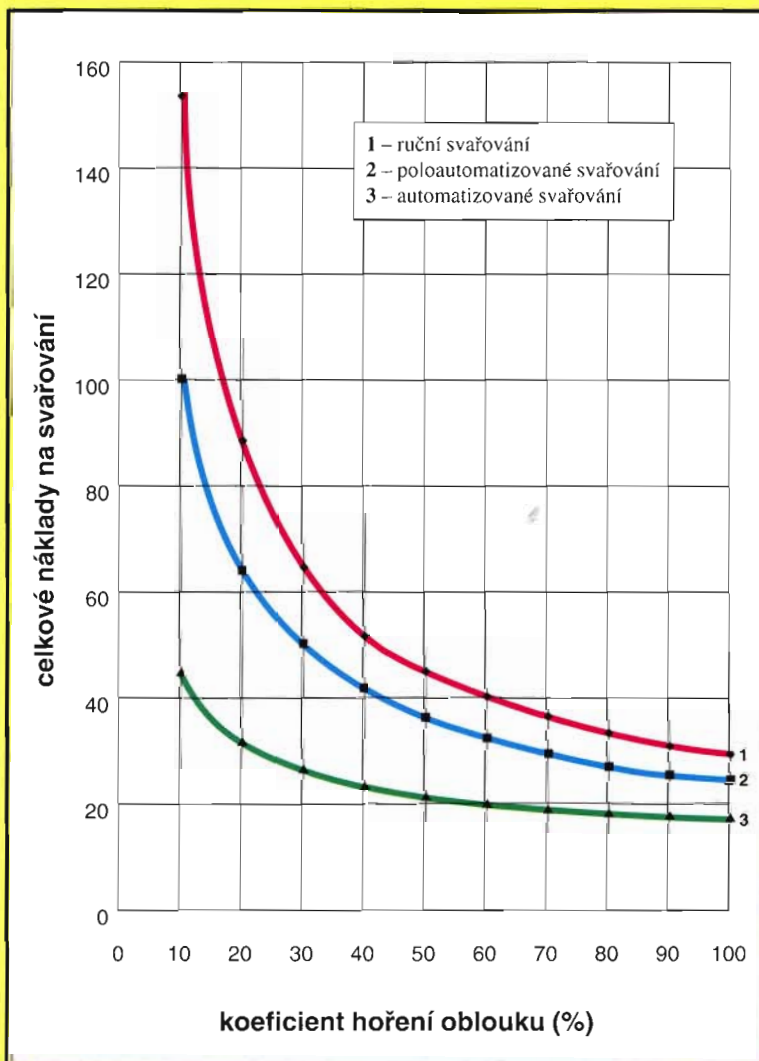


UČEBNÍ TEXTY

pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory



▼ J. Barták

▼ R. Kovařík

▼ V. Pilous

▼ a kolektiv

ČESKÁ SVÁŘEČSKÁ SPOLEČNOST ANB
ZEROSS – SVÁŘEČSKÉ NAKLADATELSTVÍ

UČEBNÍ TEXTY

pro evropské svářečské specialisty,
praktiky a inspektory

Ostrava, březen 2002

Upozornění:

Žádná část tohoto učebního textu nesmí být reprodukována nebo rozšiřována jakýmkoliv způsobem, ať již elektronicky, fotografickou reprodukcí nebo jinými prostředky, bez písemného souhlasu nakladatelství.

© Česká svářečská společnost ANB

© ZEROSS – svářečské nakladatelství

ISBN 80-85771-97-7

Učební texty jsou členěny do čtyř dílů:

1. MATERIÁLY A JEJICH SVAŘITELNOST

2. TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ A SVAŘOVACÍ ZAŘÍZENÍ

3. SVAŘOVANÉ KONSTRUKCE A JEJICH NAVRHOVÁNÍ

4. VÝROBA, TECHNICKÁ PŘÍPRAVA VÝROBY A
KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ

Autoři:

Ing. Barták Jiří, CSc.
Ing. Bělohubý Vladimír
Ing. Bubeník Vladimír
Prof. Ing. Kovařík Rudolf, CSc.
Ing. Kudělka Vladimír, PhD.
Prof. Ing. Pilous Václav, DrSc.
Ing. Pokorný Pavel
Ing. Sika Jiří

Recenzenti:

Ing. Ciompa Lumír
Prof. Ing. Koukal Jaroslav, CSc.
Ing. Minařík Václav, CSc.
Ing. Schwarz Drahomír, CSc.
Ing. Šindelka Jiří
Doc. Ing. Vejvoda Stanislav, CSc.

I. díl	Materiály a jejich svařitelnost	15
1. Materiály a jejich svařitelnost		17
1.1 Názvosloví v oblasti kovových materiálů		17
1.2 Vlastnosti kovových materiálů		17
1.3 Metalurgie výroby oceli		18
1.4 Moderní postupy výroby oceli		18
1.5 Vady oceli		19
1.6 Číselné označování ocelí		19
2. Zkoušky materiálů a svarů		22
2.1 Přehled destruktivních zkoušek		22
2.2 Zkouška tahem		22
2.3 Ohybová zkouška - zkouška lámavosti		24
2.4 Zkouška vrubové houževnatosti		25
2.5 Zkouška lomové houževnatosti K_{IC}		26
2.6 Zkouška tvrdosti		26
2.7 Zkouška únavové pevnosti		27
2.8 Speciální zkoušky		28
3. Struktura a vlastnosti kovů		29
3.1 Krystalová struktura		29
3.2 Mikrostruktura kovů		30
3.3 Rekrystalizace		31
3.4 Elastická a plastická deformace		31
3.5 Deformace v závislosti na teplotě		31
3.6 Mechanické zpevnění		32
3.7 Kovy a slitiny		33
3.8 Krystalizace		33
3.9 Struktura a typy struktur slitin		34
3.10 Intermetalické fáze		34
3.11 Mechanismus vytvrzování		34
3.12 Základní typy fázových diagramů		34
3.13 Diagram Fe – C		36
3.14 Rovnovážné strukturní složky ve slitinách železa s uhlíkem		36
3.15 Diagram IRA		36
3.16 Diagram ARA		37
3.17 Rozdělení ocelí podle chemického složení		38
4. Metalurgické pochody při svařování		39
4.1 Teplotní cyklus		39
4.2 Přeměny v tepelně ovlivněné oblasti		39
4.3 Jednovrstvé a vícevrstvé svařování		40
4.4 Předehřev při svařování		40
4.5 Vady ve svarových spojkách		41
5. Tepelné zpracování základních materiálů a svarových spojů		42
5.1 Tepelné zpracování před svařováním		42
5.2 Normalizační žihání		42
5.3 Zušlechťování		42
5.4 Popouštění		43
5.5 Homogenizační žihání		43
5.6 Rozpouštěcí žihání austenitických ocelí		43
5.7 Stabilizační žihání austenitických ocelí		43
5.8 Žihání vysokochromových feritických ocelí		44
5.9 Tepelné zpracování svarových spojů		44
5.10 Žihání ke snížení vnitřních pnutí		44

5.11 Popouštění po svařování	44
5.12 Precipitační vytvrzování	44
5.13. Diagramy průběhu tepelného zpracování	44
6. Svařitelnost materiálu a náchylnost na vznik trhlin	45
6.1 Svařitelnost	45
6.2 Trhliny za horka	46
6.3 Hodnocení náchylnosti oceli k trhlinám za horka	47
6.4 Trhliny za studena	47
6.5 Hodnocení náchylnosti k trhlinám za studena	48
6.6 Lamelární trhliny	48
6.7 Hodnocení náchylnosti k lamelárním trhlinám	49
6.8 Žíhací trhliny	49
6.9 Hodnocení náchylnosti oceli k žíhacím trhlinám	50
7. Použití jednotlivých typů ocelí a jejich svařitelnost	50
7.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí	50
7.2 Svařitelnost nízkolegovaných ocelí	51
7.3 Jemnozrné oceli, NTMZ, VTMZ	51
7.4 Vysokopevné oceli	52
7.5 Svařování ocelí pro kryogenní (mrazové) teploty	52
7.6 Svařování žárupevných ocelí	52
7.7 Svařování vysokolegovaných korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí	53
8. Úvod do koroze a opotřebení	54
8.1 Chemická koroze	54
8.2 Elektrochemická koroze	54
8.3 Pasivita kovů	55
8.4 Druhy korozního napadení	56
8.5 Korozní zkoušky	56
8.6 Ochrana materiálu proti korozi	57
8.7 Opotřebení	57
8.8 Zkoušky opotřebení	58
9. Ochranné vrstvy	58
9.1 Plátování a postup při plátování	58
9.2 Navařování	59
9.3 Postup svařování plátovaných a navařovaných materiálů	59
9.4 Žárové nástřiky – metalizace	59
9.5 Plazmový nástřik kovů	60
9.6 Klasické a moderní nátěrové systémy	61
10. Litiny a oceli na odlitky	61
10.1 Litiny	61
10.2 Bílé litiny	61
10.3 Grafitické – šedé litiny	62
10.4 Tvárná litina	63
10.5 Legované litiny	63
10.6 Svařování litin	63
10.7 Způsoby svařování litin	63
10.8 Svařování odlitků z ocelí v litém stavu	63
11. Neželezné kovy a jejich slitiny	64
11.1 Měď (Cu) a její slitiny	64
11.2 Bronzy	65
11.3 Mosazi	65
11.4 Svařování slitin mědi (bronzů a mosazí)	65
11.5 Hliník (Al) a jeho slitiny	65

11.6 Svařování hliníku a hliníkových slitin	66
11.7 Hořčík (Mg) a jeho slitiny	66
11.8 Svařování hořčíku a slitin hořčíku	66
11.9 Nikl (Ni) a slitiny niklu	66
11.10 Svařování niklu a slitin niklu	67
11.11 Titan (Ti) a slitiny titanu	67
11.12 Svařování titanu a slitin titanu	67
11.13 Tantal (Ta) a slitiny tantalu	67
11.14 Svařování tantalu a slitin tantalu	68
11.15 Zirkon (Zr) a slitiny zirkonu	68
11.16 Svařování zirkonu a slitin zirkonu	68
12. Spojování různorodých materiálů (heterogenní svarové spoje)	68
12.1 Použití Schaefflerova diagramu	68
12.2 Volba procesu svařování a účinky promíšení	69
12.3 Heterogenní svarové spoje z pohledu složení a struktury	69
12.4 Problémy při svařování a jejich řešení	71
12.5 Typický postup a použití	71
Literatura	72
II. díl Technologie svařování a svařovací zařízení	75
1. Úvod do technologie svařování	76
1.1 Rozdělení svařování	77
1.2. Používané zkratky technologií	78
1.3 Základní pojmy	78
Literatura	80
2. Plamenové svařování	81
2.1 Svařování	81
2.2 Technika svařování a svarové spoje	85
2.3 Svařovací zařízení a bezpečnost práce	85
Literatura	88
3. Základy elektrotechniky a elektrický oblouk	89
3.1 Elektrický obvod a základní elektrické veličiny	89
3.2 Elektrické teplot, elektrická práce, elektrický výkon	90
3.3 Rozdělení látek a jejich elektrická vodivost	90
3.4 Druhy elektrického proudu (napětí)	92
3.5 Pasivní příspěvky elektrických obvodů	94
3.6 Magnetismus	96
3.7 Elektromagnetická indukce	97
3.8 Aktivní prvky elektrických obvodů	99
3.9 Usměrnovače střídavého proudu	101
3.10 Elektrický oblouk	103
Literatura	109
4. Zdroje proudu pro obloukové svařování	110
4.1 Úvod, norma ČSN EN 60974-1	110
4.2 Rozdělení zdrojů podle konstrukce	111
4.3 Charakteristika svařovacích zdrojů	112
4.4 Stabilita oblouku, regulace procesu s tavící se elektrodou	115
4.5 Pulzní proud u MIG/MAG svařování	117
4.6 Úbytky napětí, rovnoměrné zatížení sítě, účinník $\cos \phi$	117
4.7 Doplňková zařízení svařovacích zdrojů	118
Literatura	119

5. Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	120
5.1 Svařování obalenou elektrodou	120
5.2 Přídavné materiály	122
5.3 Svarové spoje a technika svařování	124
5.4 Bezpečnost práce	126
Literatura	126
6. Svařování pod tavidlem	127
6.1 Princip svařování pod tavidlem, svařovací parametry a jejich vliv na rozměr a formu svaru	127
6.2 Svařovací materiály	129
6.3 Způsoby svařování pod tavidlem, výhody a nevýhody, tvary svarových úkosů	131
6.4 Zařízení pro svařování pod tavidlem	132
6.5 Speciální techniky svařování pod tavidlem	132
6.6 Zdravotní a bezpečnostní hlediska	134
Literatura	134
7. Svařování metodou TIG	135
7.1 Svařování TIG	135
7.2 Technika svařování	136
7.3 Technologie svařování	141
7.4 Netavící se elektrody	144
7.5 Ochranné plyny	145
7.6 Přídavné materiály	147
7.7 Vady svarových spojů	148
Literatura	148
8. Svařování MIG a MAG	149
8.1 Princip metody	149
8.2 Způsoby přenosu kovu v oblouku při svařování MIG/MAG	150
8.3 Charakteristiky svařovacích zdrojů a oblouku	152
8.4 Zařízení pro svařování MIG/MAG	153
8.5 Parametry a podmínky svařování	156
8.6 Ochranné plyny	159
8.7 Přídavné materiály	160
8.8 Svařování plazma – MIG	161
8.9 Elektroplynové svařování	161
8.10 Zdravotní a bezpečnostní rizika	162
Literatura	162
9. Ostatní způsoby svařování	163
9.1 Metody s koncentrovaným svazkem tepelné energie	163
9.2 Difuzní způsoby svařování	169
9.3 Svařování tlakem za studena	169
9.4 Další metody	170
Literatura	171
10. Odporové svařování	172
10.1 Jouleův zákon	172
10.2 Přečhodové a materiálové odpory	172
10.3 Vznik svarového bodu (spoje)	174
10.4 Vliv čistoty povrchu a elektrod	174
10.5 Časový průběh svařování	174
10.6 Režimy svařování	175
10.7 Parametry svařování	176
10.8 Zdroje svařovacího proudu	177
10.9 Pohybové a přítlačné mechanismy	177

10.10 Svařování bodové	178
10.11 Svařování švové	178
10.12 Svařování stykové pýchovací	179
10.13 Svařování stykové odtavením	179
10.14 Svařování na lisu výstupkové	180
10.15 Svařitelnost při odporovém svařování	182
10.16 Bezpečnost a ochrana zdraví při práci	183
Literatura	183
11. Tepelné dělení materiálu – řezání kyslíkem	
a ostatní způsoby dělení materiálu	184
11.1 Princip a podmínky pro řezání kyslíkem	184
11.2 Zařízení pro kyslíkové řezání a kvalita řezu	186
11.3 Ostatní způsoby dělení materiálů	187
Literatura	189
12. Mechanizované, automatizované a robotizované svařování	190
12.1 Mechanizované svařování	190
12.2 Automatizované svařování	190
12.3 Robotizované svařování	193
Literatura	194
13. Měkké a tvrdé pájení	195
13.1 Povrchové napětí	195
13.2 Druhy pájení a postup	198
13.3 Pájky	199
13.4 Tavidla	200
13.5 Technologie pájení	201
13.6 Bezpečnost a ochrana zdraví při práci	202
Literatura	202
14. Svařování plastů	203
14.1 Materiály a jejich svařitelnost	203
14.2 Metody svařování termoplastů	204
14.3 Svařovací zařízení a registrace parametrů svařování	204
14.4 Značení svaru na výkresech a polohy svařování	205
14.5 Vady ve svarech a zkoušky svarových spojů	206
Literatura	207
15. Navařování	208
15.1 Návary plamenem	208
15.2 Ruční návary elektrodami	209
15.3 Ruční návary metodou WIG	209
15.4 Návary automatizované metodou WIG	210
15.5 Navařování pod tavidlem- drátem	210
15.6 Navařování pod tavidlem- páskou	211
15.7 Navařování pod tavidlem- dvěma páskami	211
15.8 Ruční návary metodou MIG – MAG	212
15.9 Návary automatové metodou MIG – MAG	212
15.10 Návary plazmou s přídavným drátem	212
15.11 Návary plazmou s přídavným práškem	213
15.12 Návary automatové metodou plazma – MIG	213
15.13 Elektrovibrační svařování	214
15.14 Plátování výbuchem	214
15.15 Navařování difuzní	214
Literatura	214

III. díl Svařované konstrukce a jejich navrhování	217
1. Základy nauky o pružnosti a pevnosti	219
1.1 Základní pojmy	220
1.2 Chování kovů při zatěžování	221
1.3 Účinek vrubů	227
1.4 Vliv teploty na chování kovů	228
1.5 Napětí vzniklé účinkem tepla	230
1.6 Elastická a plastická deformace	230
1.7 Typy lomů	231
Literatura	233
2. Pnutí a deformace svarových spojů	234
2.1 Vztah mezi vnitřním pnutím a deformací	234
2.2 Činitelé ovlivňující vnitřní pnutí a deformace	235
2.3 Vznik vnitřních pnutí a deformací	236
2.4 Rozdělení a velikost vnitřních pnutí a deformací	238
2.5 Možnosti zmenšování vnitřních pnutí a deformací	242
2.6 Vliv vnitřních pnutí na chování konstrukce v provozu	245
Literatura	246
3. Úvod do lomové mechaniky a únava materiálu	247
3.1 Vliv vad na chování materiálu	247
3.2 Zkoušky odolnosti proti lomům	248
3.3 Základní přístupy lomové mechaniky	252
3.4 Únava materiálu	256
3.5 Zkoušky únavy	259
3.6 Únavová lomová houževnatost	261
Literatura	262
4. Základy výpočtu svarových spojů	263
4.1 Účinný průřez svaru	263
4.2 Napětí ve svarech	263
4.3 Kvadratický moment průřezu	265
4.4 Průřezový modul v ohybu a krutu	265
4.5 Výpočet jmenovitých napětí ve svarovém spoji	267
4.6 Výpočet únosnosti průřezů svarů	268
4.7 Příklady výpočtů jednoduchých svarů	269
Literatura	278
5. Principy návrhu svařovaných konstrukcí	279
5.1 Činitelé ovlivňující návrh svařované konstrukce	279
5.2 Základní konstrukční typy	280
5.3 Principy a zásady návrhu svařované konstrukce	285
5.4 Návrh svařované konstrukce pro mechanizovanou, automatizovanou a robotizovanou výrobu	292
5.5 Tolerance a mezní odchylky svarků	293
5.6 Návrh svaru a svarových ploch	295
5.7 Označování svarů na výkresech	298
Literatura	302
6. Chování svařovaných konstrukcí při různých způsobech namáhání	304
6.1 Vliv teploty a rychlosti zatěžování na pevnost a houževnatost	304
6.2 Vliv vrubů a vad svarů	306
6.3 Konstrukční oceli pro různé způsoby namáhání	309
6.4 Použití tupých a koutových svarů	312
6.5 Použití válcovaných profilů	314
6.6 Svařované nosníky	316

6.7 Dynamicky namáhané konstrukce	319
6.8 Prostředky ke zvětšení únavové pevnosti	322
6.9 Mosty, jeřáby, vozidla	323
Literatura	327
7. Technologičnost svařovaných konstrukcí	329
7.1 Svařovací plán	330
7.2 Zásady technologičnosti	330
7.3 Volba základního a přídavného materiálu	331
Literatura	333
8. Navrhování konstrukcí z hliníku a jeho slitin	335
8.1 Zásady návrhu	335
8.2 Hliníkové slitiny pro svařované konstrukce	338
8.3 Metody svařování	339
8.4 Pájení	340
8.5 Vady svarů a jejich vliv na únosnost konstrukce	341
8.6 Příklady návrhu konstrukcí z hliníkových slitin	342
Literatura	343
IV. díl Výroba, technická příprava výroby a kontrola svarových spojů	345
1. Ochrana zdraví a bezpečnost při svařování	347
1.1 Názvosloví	347
1.2 Oprávnění ke svařování	349
1.3 Nebezpečí při svařování	349
1.4 Svářečská pracoviště	352
1.5 Závěr	353
Literatura	354
2. Zajištění kvality svařovaných konstrukcí a řízení jakosti ve výrobě	356
2.1 Systémy řízení a zabezpečení jakosti ve výrobě	356
2.2 Příručka jakosti	359
2.3 Požadavky na jakost ve svařování a směrnice pro určování stupňů jakosti	360
2.4 Svářečský dozor - úkoly a odpovědnosti	360
2.5 Sledovatelnost, monitorování a uchovávání údajů o výrobě	362
Literatura	363
3. Normalizace ve svařování, označování svarů na výkresech, polohy svařování a jejich značení, značení technologií svařování	364
3.1 Označování svarů na výkrese	364
3.2 Polohy svařování	367
3.3 Značení technologií svařování	368
Literatura	370
4. Postupy svařování, příprava svarových ploch	371
4.1 Specifikace svařovacího postupu – WPS	371
4.2 Směrnice pro určování stupňů jakosti	376
4.3 Příprava svarových ploch	377
Literatura	380
5. Výrobní zařízení a upínací přípravky	381
5.1 Výrobní zařízení	381
5.2 Upínací přípravky	384
Literatura	384
6. Měření, regulace a záznamy při svařování	385
6.1 Měření veličin při svařování	385
6.2 Měření teploty (°C)	385

Obsah

	Strana
6.3 Kalibrace a validace	386
6.4 Monitorování a záznam veličin svařovacího procesu	386
Literatura	387
7. Nedestruktivní kontrola svarů	388
7.1 Vizualní kontrola	388
7.2 Penetrační (kapilární) zkouška	388
7.3 Metoda magnetická prášková	389
7.4 Metoda prozářením	390
7.5 Metoda ultrazvuková	391
Literatura	391
8. Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení	393
8.1 Typy vad při svařování	393
8.2 Příčiny vzniku vad	393
8.3 Hodnocení vad	394
Literatura	395
9. Opravy vad a renovace	396
9.1 Opravy vad svařováním	396
9.2 Opravy odlitků	397
9.3 Opravy ocelových konstrukcí	400
9.4 Opravy strojních součástí	400
9.5 Opravy a renovace navařováním	400
9.6 Pracoviště pro opravy a renovace	401
Literatura	401
10. Ekonomika ve svařování	402
10.1 Analýza nákladů na svařování	402
10.2 Použití softwaru a programy pro kalkulaci	405
10.3 Opatření pro snižování nákladů na svařování	406
Literatura	408
11. Příprava svářečského personálu	409
11.1 Vzdělávání, zkoušky a certifikace personálu podílejícího se na výrobě svařovaných konstrukcí	409
11.2 Stupně kvalifikace svářečských pracovníků a jejich odborná způsobilost	410
11.3 Systém vzdělávání svářečského personálu v České republice	411
11.4 Vzdělávání a zkoušky svářečů	412
11.5 Vzdělávání svářečského technického personálu	415
11.6 Vzdělávání svářečského inspekčního personálu	416
Literatura	417

ÚVOD

Tyto učební texty jsou určeny pro výuku evropských svářečských specialistů, praktiků a inspektorů. Jsou zpracovány v souladu se závaznými osnovami a požadavky předpisů EWF pro jednotlivé odbornosti (EWS – doc. IAB-004-2000/EWF 411, EWP – doc. IAB-005-2000/EWF 451 a EWI – doc. EWF 450-02).

Pro zachování kontinuity s danými osnovami jsou učební texty sestaveny do čtyř dílů:

- 1) Materiály a jejich svařitelnost
- 2) Technologie svařování a svařovací zařízení
- 3) Konstrukce a navrhování svařovaných konstrukcí
- 4) Výroba, technická příprava výroby a kontrola svarových spojů

Všechny kapitoly jsou zpracovány s přihlédnutím na nejnovější poznatky z oboru svařování, materiálů, konstrukce a výroby. Jsou respektovány české i evropské normy a zvyklosti. Publikace poskytuje ucelený přehled o celé problematice svařování, a proto může být vhodnou pomůckou v praxi nejen pro odborníky ve svařování, ale i technology a konstruktéry. Lze ji s výhodou použít i jako doplňkovou literaturu pro studenty středních a vysokých škol.

Ing. Jiří Barták, CSc.

DÍL I

MATERIÁLY A JEJICH SVAŘITELNOST

Autor: Prof. Ing. Václav Pilous, DrSc.
Recenzent: Prof. Ing. Jaroslav Koukal, CSc.

1. MATERIÁLY A JEJICH SVAŘITELNOST

Úvod do materiálové problematiky, výroba a označování ocelí

Zdroj tepla při svařování vyvolává v oblasti svarového spoje místní nerovnoměrný ohřev od teploty tavení až po teplotu okolí. Ohřevem dochází k podstatným změnám ve struktuře materiálu. Mění se fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti materiálu. Přitom výsledkem úspěšného svařování musí být svarový spoj požadovaných vlastností a jakosti.

1.1 Názvosloví v oblasti kovových materiálů

Chemický prvek - je chemicky čistá látka o určitém atomovém čísle. Každý prvek je podle své značky a atomového čísla zařazen do periodické soustavy prvků (např. Fe - železo, Cr - chrom atd.).

Chemická sloučenina - je čistá látka složená z chemických prvků (např. Fe_3C - karbid železa).

Složka - je chemicky definovaná část soustavy (prvek, sloučenina).

Směs - je soustava složená z několika prvků, - sloučenin, které lze fyzikálně rozdělit (např. vzduch o složení 78 obj.% N_2 , 21 obj.% O_2 , 0,94 obj. % Ar, He, Xe, Kr a 0,06 obj. % CO_2).

Slitina - je soustava složená z několika prvků kovů nebo kovů s nekovy, která vznikne ztuhnutím taveniny těchto kovů nebo kovů s nekovy (např. ocel, bronz).

1.2 Vlastnosti kovových materiálů

Kovové materiály se vyznačují charakteristickými vlastnostmi, které mají velký význam pro dosažení požadované kvality svarového spoje.

Chemické vlastnosti

Mezi chemické vlastnosti, které vyjadřují chování a odolnost kovových materiálů v různém pracovním prostředí a za různých teplot, patří:

- korozivzdornost (odolnost proti koroznímu činidlu),
- žárovzdornost, (odolnost proti vysokým teplotám),
- žárupevnost (pevnost při tečení za vyšších teplot),
- odolnost proti abrazi, erozi a kavitaci.

Fyzikální vlastnosti

Mezi fyzikální vlastnosti, které vyjadřují vnitřní stavbu materiálu a jeho chování v návaznosti na působení fyzikálních jevů, patří:

- měrná hmotnost ($\text{Fe} - 7870 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
- teplota tání ($\text{Fe} 1539^\circ\text{C}$),
- tepelná roztažnost (K^{-1}),
- tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),
- měrný elektrický odpor ($\Omega\cdot\text{m}$).

Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti vyjadřují odolnost materiálů vůči různým druhům namáhání. Mezi mechanické vlastnosti patří:

- pevnost (MPa),

tvrdost (HB, HRC, HV),
houževnatost ($J \cdot cm^{-2}$),
tažnost, kontrakce (%).

Technologické vlastnosti

Mezi technologické vlastnosti, které vyjadřují vhodnost materiálu pro určitý způsob technologického zpracování, patří:

slévateľnost, tvařitelnost, svařitelnost, obrobiteľnost.

Definice oceli

Ocel je vzhledem k výhodným chemickým, fyzikálním, mechanickým a technologickým vlastnostem nejdůležitějším druhem technického železa.

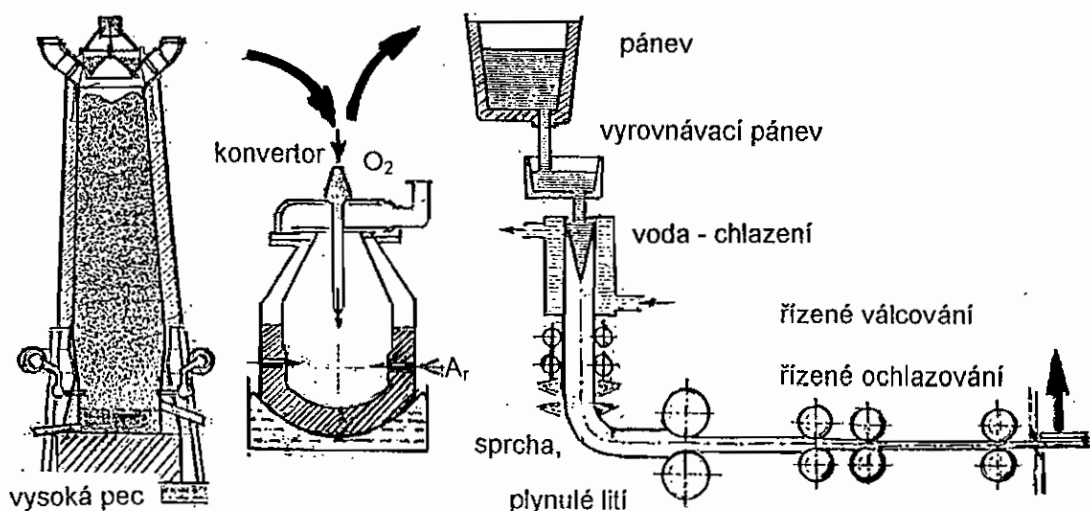
Definice oceli podle ČSN EN 10020 (upravená): Ocel je soustava prvků, u které hmotnostní podíl železa je větší než u kteréhokoliv jiného prvku a která všeobecně vykazuje méně než 2 hm.% uhlíku a přičemž obsahuje i jiné prvky.

1.3 Metalurgie výroby oceli

Ocel se vyrábí zkujňováním surového železa, což je spalování uhlíku a nežádoucích prvků (síry, fosforu) vysokou teplotou – oxidační perioda. Po oxidační periodě následuje desoxidační perioda, při které se odstraní manganem a křemíkem největší část kyslíku rozpuštěného v roztavené oceli a poté se ocel naleguje. Poslední část rozpuštěného kyslíku a rovněž i dusíku se odstraňuje přísadou hliníku ($Al-Al_2O_3$, $-AlN$).

1.4 Moderní postupy výroby oceli

Ocel se původně vyráběla v plamenných pecích (martinské pece) společně s elektrickými obloukovými pecemi. V moderních elektrických obloukových pecích se vyrábějí především z důvodu snadného legování slitinové oceli. V moderních kyslíkových konvertorech v kombinaci s rafinací v pánvi s následným kontinuálním (plynulým) litím se vyrábějí mikrolegované jemnozrné oceli, vhodné především pro válcování svařitelných plechů a profilů. Proces výroby oceli včetně plynulého odlévání s následným válcováním plechů je znázorněn na obr. 1.1.



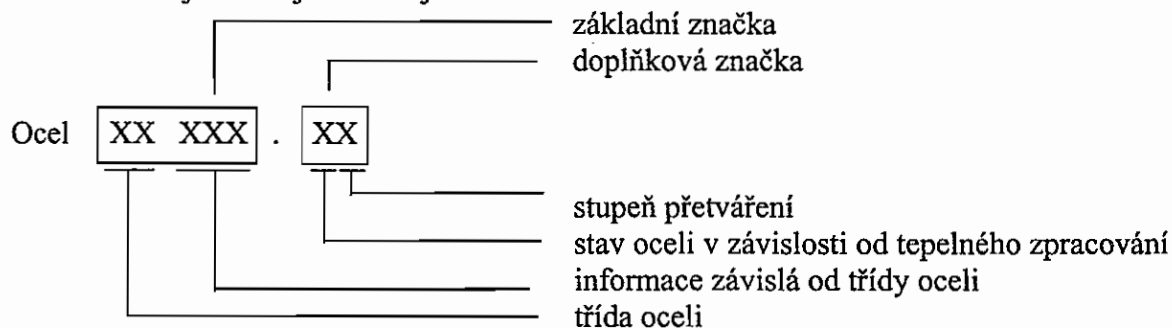
Obr.1.1 Současný metalurgický proces výroby oceli s následným válcováním plechů

1.5 Vady oceli

Ocel vyrobená v ocelářské peci nebo v konvertoru je odlita do pánve a po případné mimopecní rafinaci je odlévána do litinových, nebo ocelových kokil (forem), v nichž tuhne v ingoty, ve kterých mohou být vady typu segregací (vycezenin) a staženin. Ve spodní části ingotu je oblast sedimentačního kužele, ve středové části jsou segregáční pásma, a v horní části je hlavová staženina. V případě odlévání neuklidněných ocelí zůstává v oceli rozpuštěn kyslík, který může vést k tvorbě vad typu bublin. Odlévání do kokil se proto postupně nahrazuje kontinuálním (plynulým) litím, kde v důsledku rychlého ochlazování jsou segregáční procesy potlačeny na minimum. Pro kusovou výrobu vysokočisté oceli lze využít procesu elektrostruskového přetavování oceli.

1.6 Číselné označování ocelí

Číselné označování ocelí podle ČSN 420002 se skládá ze základní pětimístné číselné značky a z dvoumístného doplňkového čísla, které je oddělené tečkou. Základní číselná značka se čte jako dvojčíslí a trojčíslí.



Význam třetí a čtvrté číslice v základní číselné značce:

Oceli třídy 10 a 11:

U nelegovaných konstrukčních ocelí udává dvojčíslí dané třetí a čtvrtou číslicí přibližnou pevnost v tahu v desítkách MPa (s výjimkou ocelí pro výztuže do betonových konstrukcí třídy 10, kde charakterizuje mez kluzu v desítkách MPa).

Pátá číslice 3 nebo 5 nebo 8 vyjadřuje svařitelnost v závislosti na tloušťce stěny.

Ocel 11 **373**

_____ přibližná pevnost v tahu $R_m = 37 \cdot 10 = 370$ (MPa)

Oceli obvyklých jakostí nemívají zaručeno v hotovém výrobku předepsané chemické složení, čímž se liší od ocelí ušlechtilých, u nichž toto složení zaručeno je. Mimoto mívají ušlechtilé oceli menší obsah fosforu a síry. Uhlíkové i slitinové ušlechtilé oceli se většinou používají po tepelném zpracování.

Oceli třídy 12 až 16:

Ušlechtilé konstrukční oceli jsou buď uhlíkové – oceli třídy 12, nebo slitinové – oceli třídy 13 až 16, nebo slitinové oceli s vysokým obsahem přísadových prvků třídy 17. Třídy 13 až 16 jsou rozlišeny podle legujících prvků takto:

třída 13: Mn, Si, Mn – Si,

třída 14: Cr, Mn – Cr, Si – Cr, Cr – Al, Cr – Mn – Si,

třída 15: Cr – Mn, Cr – V, Mn – Cr – Mo, Mn – Cr – V, Cr – Mo – V, Cr – Mo – Al,

třída 16: Ni, Ni – Cr, Ni – Cr – Mo, Ni – Cr – W.

U konstrukčních nízkolegovaných ocelí vyšších tříd třetí číslice udává součet středních obsahů legujících prvků v procentech. Čtvrtá číslice pak udává střední obsah uhlíku v desetinách % (nad 0,92% C je čtvrtá číslice nula).

Příklady:

Ocel 15

1	2
---	---

8

Obsah uhlíku / 10, C = 0,2 hm. %
Obsah legujících prvků je do 1 hm. %

Oceli třídy 17:

Oceli třídy 17 jsou: korozivzdorné
žárovzdorné
žárupevné
speciální

U konstrukčních ocelí středně a vysokolegovaných třetí číslice v základní značce vyjadřuje druh oceli podle typu legování a čtvrtá číslice obsah chromu podle tabulky uvedené v normě.

Ocel 17

x	x
---	---

 x . x x

Obsah Cr podle tabulky uvedené v normě

0 – oceli legované Cr (feritické)

1 - oceli legované Cr a dalšími prvky Al, Mo, Ni – (feritické)

2 - oceli leg. Cr – Ni, popřípadě stabilizované Ti, Nb – (austenitické)

3 - oceli legované Cr – Ni a dalšími prvky Mo, V, W – (austenitické)

4 - oceli legované Mn – Cr, Mn-Cr-Ni a prvky Mo, Al – (austenitické)

5 - oceli legované Ni, popř. dalšími prvky

6 - oceli legované Mn

Význam první číslice doplňkového čísla u třídy ocelí 10 – 16.

První číslo za tečkou vyjadřuje stav oceli, který je daný tepelným zpracováním:

- Ocel xx xxx . 0 - přírodní nežíhaný stav
 . 1 - normalizačně žíhaný
 . 2 - žíhaný (s uvedením způsobu žíhání)
 . 3 - žíhání na měkko
 . 4 - kalený nebo rozpouštěcí žíhání (1020 °C , 20 min., voda)
 . 5 - normalizačně žíhaný a popouštěný
 . 6 - zušlechtěný na dolní pevnost
 . 7 - zušlechtěný na spodní pevnost
 . 8 - zušlechtěný na horní pevnost
 . 9 - zvláštní stav tepelného zpracování

Oceli třídy 19

U ocelí nástrojových třetí číslice v základní značce udává, že se jedná buď o nelegované oceli anebo u slitinových nástrojových a rychlořezných ocelí udává typ legování oceli jednotlivými legujícími prvky nebo skupinou hlavních legujících prvků. Čtvrtá číslice v základní značce udává střední obsah uhlíku v oceli.

Označení ocelí podle ČSN EN 287 – 1

Skupina W 01 - Nelegované nízkouhlíkové (C – Mn) oceli nebo nízkolegované oceli. Tato skupina zahrnuje také jemnozrné konstrukční oceli s mezí kluzu $R_e \leq 360$ MPa.

Skupina W 02 - Cr – Mo oceli nebo žárupevné (odolné proti tečení) CrMoV – oceli.

Skupina W 03 - Normalizačně žíhané jemnozrné oceli, zušlechťované a tepelně mechanicky zpracované oceli s mezí kluzu $R_e > 360$ MPa, jakož i podobně svařitelné Ni – oceli s obsahem Ni 2 až 5 hm. %.

Skupina W 04 - Nerezavějící feritické nebo martenzitické oceli s 12 až 20 hm. % Cr.

Skupina W 11 - Nerezavějící feriticko - austenitické nebo čistě austenitické CrNi – oceli.

Označování ocelí podle ČSN EN 10027

Zkráceného označování podle – ČSN EN 10027 – 1

Podle této normy se označují oceli charakteristickými písmeny a čísly. Písmena a čísla jsou volena tak, aby vyjadřovala základní charakteristické znaky, např. hlavní oblasti použití, mechanické, fyzikální vlastnosti (1.skupina) nebo chemické složení (2. skupina)

Příklad: Označení oceli z 1. skupiny S 235 JRG3, kde S označuje ocel pro ocelovou konstrukci, 235 je minimální mez kluzu R_e 235 MPa, JR G3 přídavný symbol dle ČSN CR 10260 – určuje jakostní třídu. Detailní vysvětlení jednotlivých označení je uvedeno v tab. 1.1.

Označení oceli z 2. skupiny C 16 E, kde C označuje nelegovanou ocel s obsahem Mn pod 1 hm.% a 16 odpovídá stonásobku hodnoty rozsahu předepsaného pro uhlík $C = 0,16$ hm. %, E dle ČSN CR 10260 – určuje předepsaný maximální obsah síry. U nízkolegovaných slitinových ocelí označení vyjadřuje kromě obsahu uhlíku též označení obsahu slitinových prvků v desetinách procenta, u ocelí jakostní třídy 17 vyjadřuje za písmenem X obsah uhlíku ve stonásobku hodnoty (X5 – 0,05 hm. % C) a za označením prvků jejich obsahy v hm. % (Cr 13 - 13 hm. % Cr).

Tab. 1.1 Označování oceli podle ČSN EN 10027 –1

Základní symboly		Přídavné symboly							
Písmeno	Vlastnosti	Pro oceli							
S = oceli pro ocelové konstrukce	nnn = min. mez kluzu (R_e) v MPa	Skupina I				M = termomechanicky válcováno N = M + normalizačně žíháno Q = M + zušlechťeno G1 = neuklidněno G2 = uklidněno G3 = uklidněno + normalizace G4 = uklidněno+normal.+popuštěno	H = pro vysoké teploty L = pro nízké teploty F = jemnozrná Z 15 = min. kontrakce 15 % Z 25 = min. kontrakce 25 %		
		Nárazová práce (J)		Zkušební teplota				°C	
		27 J	40J	60J	20				
		JR	KR	LR					
		J0	K0	L0					0
		J2	K2	L2					-20
E = oceli pro stroj. konstrukce		J3	K3	L3	-30				
		J4	K4	L4	-40				

S 235 J2 G3 L + Z25

Číselné označování podle ČSN EN 10027 –2

Podle této normy se označují oceli pouze čísly a tato čísla pak platí jako doplňková ke značkám ocelí dle ČSN EN 10027 – 1. Čísla ocelí se tvoří následovně:

1.xxxx kde číslo 1 je určeno pro označení ocelí, další dvě čísla se určují z tabulky z výše uvedené normy podle druhu materiálu.

Poslední dvě čísla jsou pořadová.

Příklad: 1.0036, kde 1 znamená ocel, 00 ocel obvyklých jakostí, 36 pořadové číslo.

Následující tabulka (tab. 1.2) uvádí příklady a porovnání značek oceli:

Tab.1.2 Označení ocelí podle ČSN 420002, ČSN EN 10027 -1, ČSN CR 10260 a ČSN EN 10027-2

OZNAČENÍ OCELÍ		
Dle ČSN 42 0002	Dle ČSN EN 10027-1 a ČSN CR 10260	Dle ČSN EN 10027-2
11 373	(EN) S 235JRG3	1.0036
12 020	(CR) C 15E	1.1141
14 220	(CR) 16 MnCr5	1.7131
15 020	(CR) 16 Mo3	1.5415
16 224	(EN) S690QL	1.8928
17 022	CR X20Cr13	1.4021
17 240	CR X5CrNi18-10	1.4301
17 246	CR X10CrNiTi18-10	1.6903
17 348	CR X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571

2. ZKOUŠKY MATERIÁLŮ A SVARŮ

2.1 Přehled destruktivních zkoušek

Základní destruktivní (s porušením) zkoušky:

- zkouška tahem,
- zkouška vrubové houževnatosti (zkouška rázem v ohybu),
- zkouška tvrdosti,
- zkouška v ohybu (zkouška lámavosti),
- zkouška únavové pevnosti,
- speciální zkoušky.

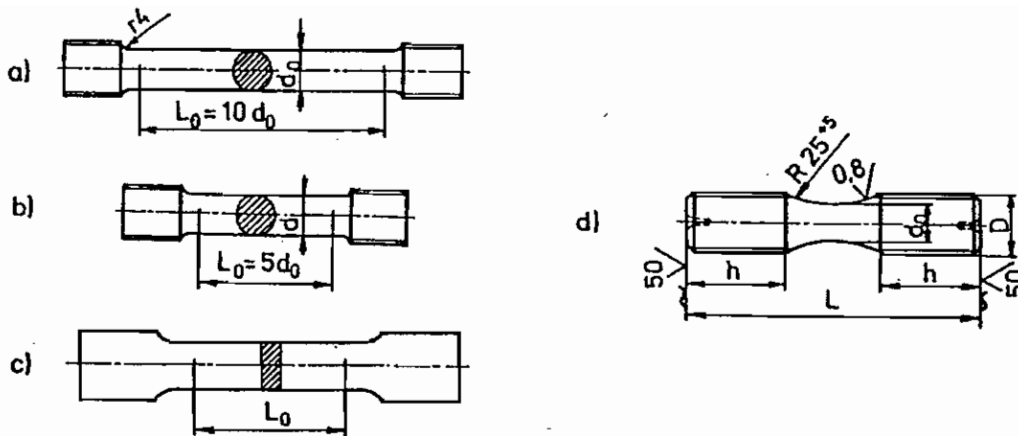
2.2 Zkouška tahem

Zkouškou tahem zjišťujeme na zkušebním trhacím stroji na zkušebních tyčích pro zkoušky tahem (viz obr. 2.1):

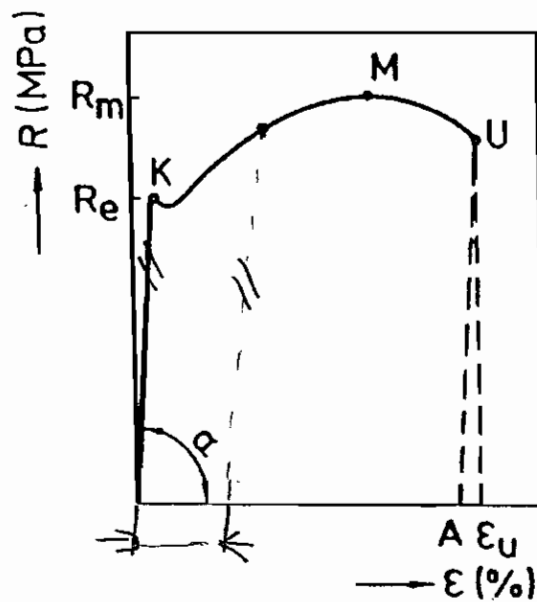
- a) Platnost lineární závislosti deformace na napětí (Hookův zákon) viz. obr. 2.2 podle rovnice

$$R = \varepsilon \cdot E,$$

- kde R napětí (MPa),
ε deformace (%),
E modul pružnosti v tahu (MPa).



Obr.2.1 Tvary zkušebních tyčí různých tvarů pro zkoušku tahem
 a) až c) ocel, d) litina
 (ČSN 420311:Zkoušení kovů. Zkušební tyče pro zkoušku tahem)



Obr. 2.2 Tahový diagram nízkouhlíkové oceli (ČSN EN 10002 - Kovové materiály - Zkouška tahem)

- b) Mez kluzu R_e (MPa), kdy dochází k prudkému nárůstu deformace (bod K). Mez kluzu je hodnota, se kterou konstruktér počítá a která se uvádí v označení materiálu podle ČSN – EN 10027 – ku př. S 235 ($R_e = 235$ MPa).
- c) Mez pevnosti R_m (MPa), tj. hodnota nejvýše dosažitelného zatížení (bod M).

- d) Tažnost A_5, A_{10} (%), která představuje schopnost materiálu plasticky se deformovat.
Tažnost :

$$A = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 (\%),$$

- kde L měřená délka zkušební tyče po přetržení (m),
 L_0 výchozí měřená délka tyče (m).

- e) Kontrakci – zúžení (%) tj. hodnotu, která je důležitou plastickou vlastností vyjádřenou vztahem

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 (\%),$$

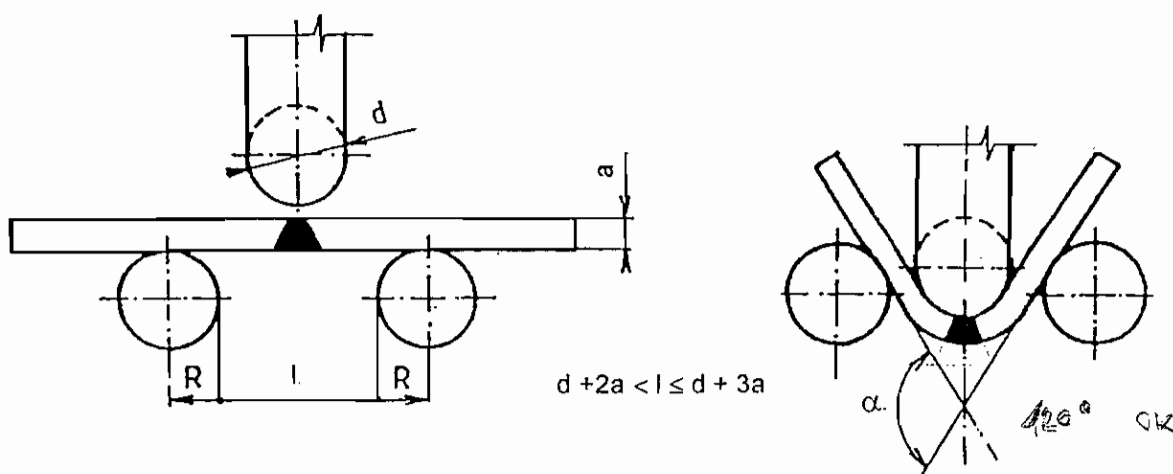
- kde S průřez tyče v krčku po přetržení,
 S_0 výchozí průřez tyče.

Kontrakce dobře vyjadřuje náchylnost ocelí k lamelárním (terasovitým) trhlinám a uvádí se po vyžádání v označení materiálu podle ČSN – EN 10027 – 1 – ku př. S 235 JR G3 + Z 35 (vyžadovaná hodnota kontrakce Z 35 %).

U svarových spojů je nutné zkušební tyče zhotovit tak, aby orientace zatížení při zkoušce byla kolmá k podélné ose svarového spoje (ČSN EN 10002 Kovové materiály - Zkouška tahem – nahrazuje ČSN 420310, ČSN EN 895 Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem – nahrazuje ČSN 051121).

2.3 Ohybová zkouška - zkouška lámavosti

Deformační schopnost tupých svarových spojů za studena se určuje podle ČSN EN 910 a u základních materiálů podle ČSN ISO 7438 Kovové materiály – Zkouška lámavosti. Z obr. 2.3 je zřejmé provedení zkoušky. Průměr ohýbacího trnu d musí splňovat požadavky odpovídající normy výrobku bez vzniku trhlin Pro zkoušky postupů svařování podle ČSN EN 288-3 je průměr ohýbacího trnu 4.t a předepsaný úhel ohybu je 120° .



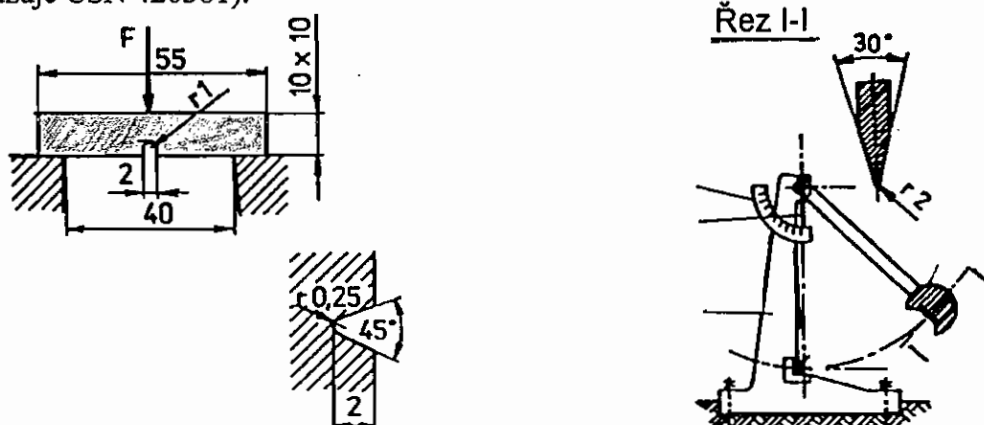
Obr. 2.3 Zkouška lámavosti

Přísnost zkoušky se zvýší s umístěním kořene svaru na tažené straně zkušebního tělesa. (ČSN EN 910 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušky lámavosti. Nahrazuje ČSN 05 1124.)

2.4 Zkouška vrubové houževnatosti

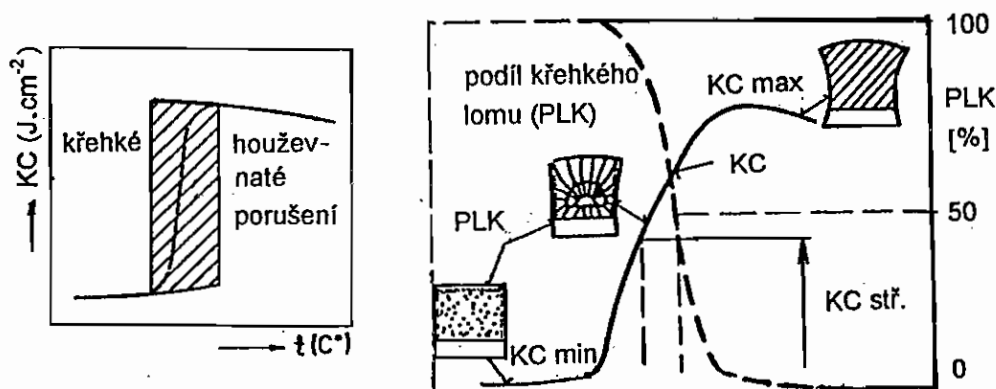
Zkouška rázem v ohybu slouží ke stanovení náchylnosti ocelí a svarových spojů ke křehkému porušení. Zkouší se na normovaném tělísku o rozměrech 10 x 10 x 55 mm, které má v příčném směru vyroben vrub. V kořenu vrubu dochází při rázu k iniciaci trhliny. Podle normy ČSN 420350 Zkoušení kovů, lze stanovit teplotu křehkosti. Standardně se používá vrub KCV 2 mm (nebo též U vrub). Zkouška se provádí na Charpyho kladivu podle obr. 2.4. Podle úhlu výkyvu kladiva po přeražení vzorku se stanovuje hodnota spotřebované práce (J), ze které lze spočítat vrubovou houževnatost ($J \cdot \text{cm}^{-2}$).

(ČSN EN 10045 Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho – nahrazuje ČSN 420381).



Obr. 2.4 Zkouška vrubové houževnatosti a používané zkušební těleso s vrubem KCV2 včetně Charpyho zkušebního kladiva

Spotřebovaná práce je vyjádřena v označení ocelí podle ČSN EN 10027 – 1 písmeny J (27 J), K (40 J), L (60 J) v závislosti na teplotě přeražení ($R + 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $2 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$ atd.). Teplotní závislost vrubové houževnatosti vyjadřuje Vidalova křivka, která je znázorněna na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Teplotní závislost hodnot vrubové houževnatosti, resp. % křehkého lomu ze zkoušek vrubové houževnatosti při různých teplotách zkoušení

Z průběhu hodnot vrubové houževnatosti KCV a z reciproční (obrácené) závislosti % křehkého lomu na teplotě je definován křehký stav s velmi nízkými hodnotami KCV (limitní hodnota 27 J odpovídá spotřebované práci $347 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$). Za vyšších teplot ($100 \text{ }^\circ\text{C}$) je dosahováno téměř plně houževnatého stavu. Vysokých hodnot vrubové houževnatosti za nízkých teplot je dosahováno u základních materiálů a svarových kovů austenitické báze

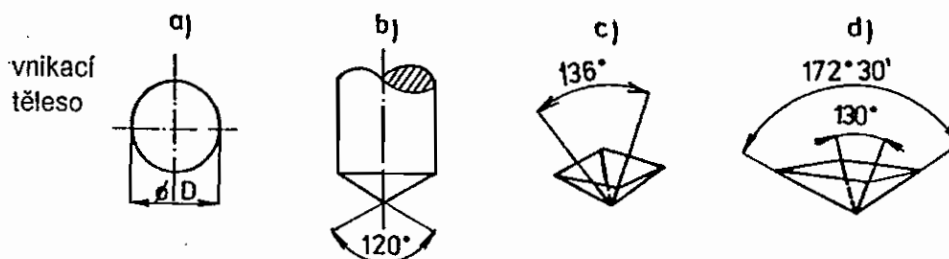
(mřížka kps). Zkoušky rázem v ohybu svarových spojů se provádějí podle normy ČSN EN 875 Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů – Zkoušky rázem v ohybu, která nahrazuje normu ČSN 051125.

2.5 Zkouška lomové houževnatosti K_{IC} (ČSN 42 0347 –74)

Při zkoušce se postupně zatěžuje vrubované zkušební těleso za podmínek rovinné deformace až do lomu a zaznamenává se závislost síla – rozevření okraje vrubu. Ze záznamu se určí síla v okamžiku dosažení určité odchylky záznamu od linearit.

2.6 Zkouška tvrdosti

Tvrdost je definována jako odpor proti vnikání cizího tělesa do povrchu zkoušeného materiálu (svarového spoje). Tvrdost lze posuzovat podle velikosti stopy, která vznikla vtláčováním tělesa podle typu zkoušky - kuličky (Brinell), kužele (Rockwell) a jehlanu (Vickers, Knoop) - viz obr.2.6, z dostatečně tvrdého materiálu (kalená ocel, slinutý karbid, až diamant) do zkoušeného vzorku určitou silou za definovaných podmínek.



Metody: a) Brinellova, b) Rockwellova, c) Vickersova, d) Knoopova

Obr. 2.6 Typy zkoušek tvrdosti

Zkoušky tvrdosti se člení na statické a dynamické.

Statické zkoušky tvrdosti

a) Tvrdost podle Brinella – HB

Kriterium tvrdosti je opticky určená plocha vtisku kalené kuličky. (ČSN ISO 6506 Kovové materiály. Zkoušky tvrdosti podle Brinella – ČSN 42 0371).

b) Tvrdost podle Vickerse – HV

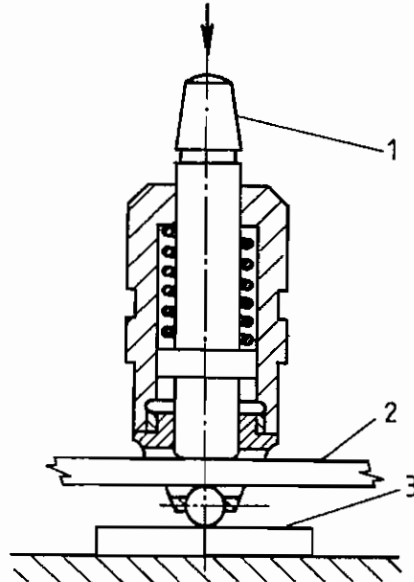
Tvrdost je hodnocena podle délky střední úhlopříčky vtisku o vrcholovém úhlu 136° . Podle ČSN EN 1043-1 je pro měření tvrdosti svarových spojů na bázi železa předepsána zkouška podle Vickerse HV 10 a HV 5. Povolená tvrdost ve svarovém spoji se podle ČSN EN 288-3 pohybuje od 300 do 450 HV 10 podle typu svarového spoje a jeho tepelného zpracování. Mikrotvrdost je měřena podle Hannemanna - HVM, rovněž na principu Vickersovy zkoušky s tím, že jehlan je umístěn přímo v optice (ČSN ISO 6507 Kovové materiály. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. Zkoušky mikrotvrdosti svarových spojů definuje ČSN EN 1043-2).

c) Tvrdost podle Rockwella – HRC

Tvrdost je hodnocena podle hloubky průniku kužele o vrcholovém úhlu 120° . Tvrdost 60 HRC představuje tvrdost rychlořezných ocelí. (ČSN ISO 1024 Kovové materiály. Zkouška tvrdosti podle Rockwella – ČSN 42 0372).

Dynamické zkoušky tvrdosti

Nejčastěji se používá Poldi kladívko (HB), znázorněné na obr. 2.7. Úderem kladiva na úderník dojde ke vtisku kuličky jak do zkoušeného materiálu, tak do srovnávací tyčinky známé tvrdosti. Komparací vtisků lze určit tvrdost zkoušeného materiálu.

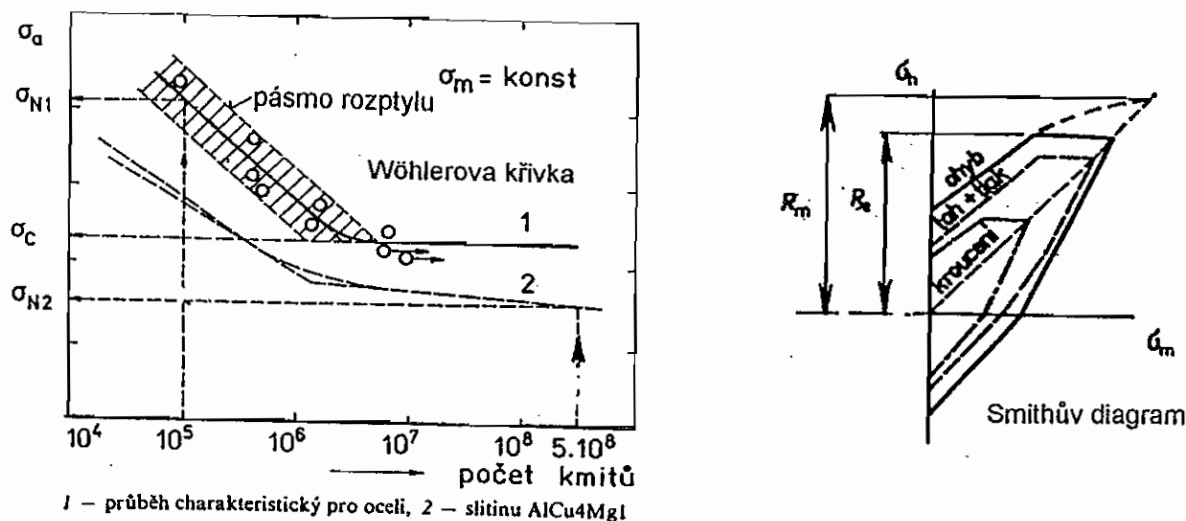


Obr. 2.7 Schéma Poldi kladívka (1. úderník, 2. srovnávací tyčinka, 3. zkoušený materiál.)

2.7 Zkouška únavové pevnosti

Podle počtu únavových cyklů, které mohou mít charakter pulzujícího mívivého, střídavého nebo náhodného napětí, lze rozlišit únavu nízkocyklovou (do 10^4 cyklů) a vysokocyklovou (nad 10^7 cyklů) v tahu, ohybu nebo v krutu.

Vlastní zkoušení únavy se provádějí na únavových strojích buď s mechanickým zatížením nebo na hydraulických resp. elektromagnetických vysokofrekvenčních pulzátorech. Výsledkem únavových zkoušek je získání tzv. Wöhlerovy křivky (obr. 2.8) v souřadnicích zatížení v závislosti na počtu cyklů. Tato křivka, kterou lze nahradit dvěma přímkami, se skládá z úseku tzv. časované meze únavy, která s počtem cyklů lineárně klesá a z úseku, ve kterém se aplikované únavové napětí s počtem cyklů už dále nemění. Toto napětí představuje u daného materiálu dosaženou mez únavy R_c . V obr. 2.8 je hodnota meze únavy označena jako σ_c .



Obr. 2.8 Příklad průběhu Wöhlerovy křivky únavy a příklad Smithova diagramu

2.8 Speciální zkoušky

Mezi speciální zkoušky, z nichž některé nemusí být předmětem běžných přejímek, se ve většině případů považují mechanické zkoušky za zvýšených nebo snížených teplot, dále zkoušky tečení, komplex metalografických šetření, korozní zkoušky atd.

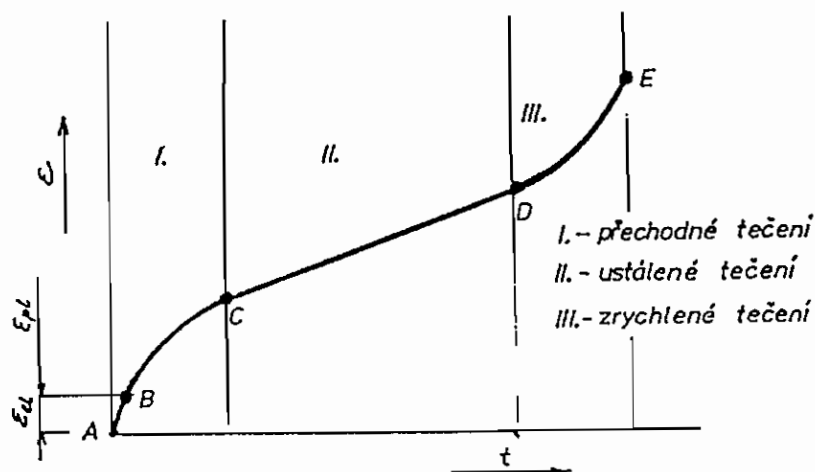
Mechanické zkoušky za snížených teplot

Za snížených a kryogenních teplot (nižších než -78°C) se pevnostní charakteristiky zvyšují až o 20 %. V případě vrubové houževnatosti je teplotní závislost určena průběhem Vidalovy křivky, kde mírný pokles vykazují pouze austenitické oceli (mřížka kps).

Mechanické zkoušky za vyšších teplot

Ke stanovení odolnosti materiálu proti dlouhodobému statickému zatížení za vysokých teplot (tečení – creep) se používají dva typy zkoušek tečení. Jedná se o zkoušky tečení s měřenou deformací a zkoušky tečení do lomu.

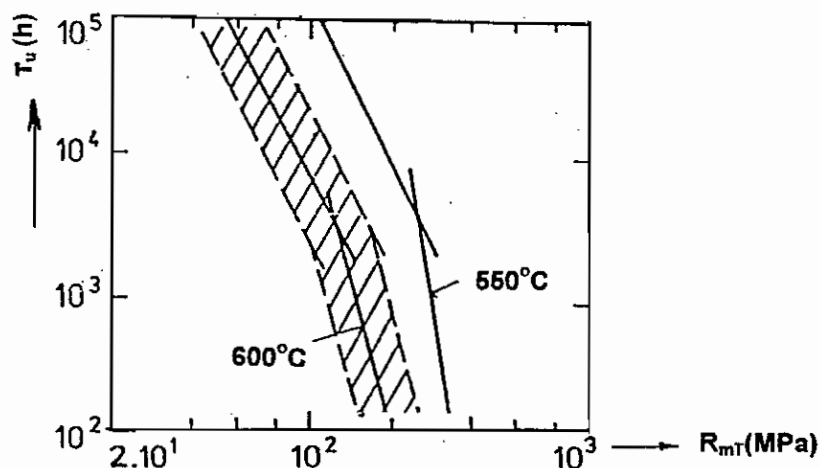
a) Zkoušky s měřenou deformací – viz obr. 2.9.



Obr. 2.9 Časový průběh deformace (křivka tečení) u žárupevné oceli za konstantní teploty a konstantního napětí

b) Zkoušky tečení do lomu

Jejich průběh a určení hodnot meze pevnosti při tečení za teplot 550 a 600°C je dobře zřejmý z obr. 2.10 (ČSN 42 05 51 – Zkoušení kovů. Zkoušky tečení za vyšších teplot.)



Obr. 2.10 Závislosti doby do lomu na aplikovaném napětí pro konstantní teploty zkoušení 550 a 600°C. Nízkoalokovaná CrMoV ocel. Šrafovaná oblast – rozptýl výsledků zkoušení.

3. STRUKTURA A VLASTNOSTI KOVŮ

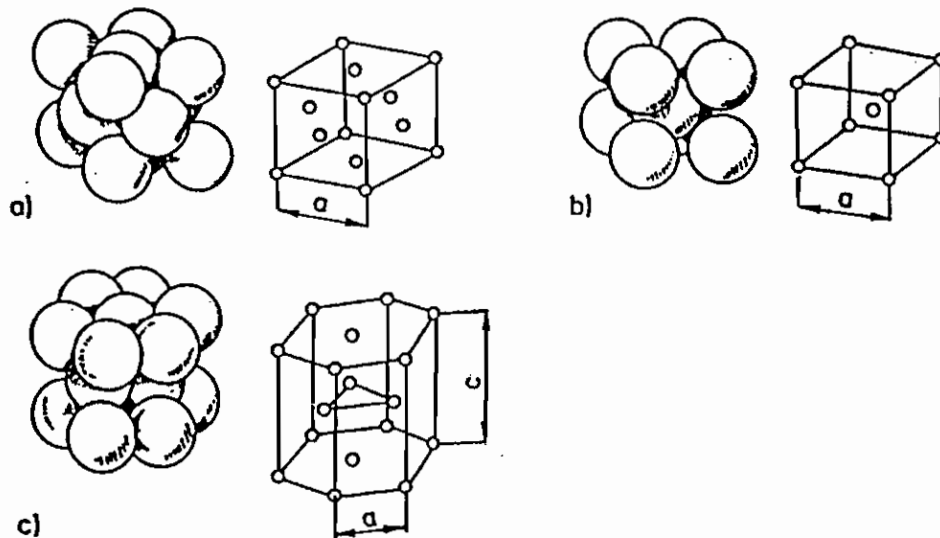
3.1 Krystalová struktura

Velká část prvků v periodické soustavě prvků se zařazuje mezi kovy. Vzájemným míšením prvků získáme kovové slitiny.

Vnitřní stavba kovových materiálů je dána především uspořádáním atomů s uvažováním sil mezi nimi působících. U kovových materiálů jsou atomy uspořádány podle chemické – kovové vazby. Představa kovové vazby je, že krystalové mřížky kovů a jejich slitin jsou tvořeny pravidelnými seskupeními kovových kationtů, mezi kterými se volně pohybují elektrony, označované jako elektronový plyn.

Kovová vazba je charakterizována krystalovou strukturou s co největší souměrností. Těmto představám vyhovují především tři krystalové struktury (obr. 3.1):

krychlová plošně středěná (k.p.s.)	- ku př. Fe _γ	- 14 atomů
krychlová tělesně středěná (k.t.s.)	- ku př. Fe _α	- 9 atomů
šesterečná těsně uspořádaná (š.t.u.)	- ku př. Zn, Cd	- 17 atomů



Obr. 3.1 Základní krystalové buňky nejčastějších mřížek kovů (model a schéma).
 a) krychlová plošně středěná (k.p.s.), b) krychlová tělesně středěná (k.t.s.),
 c) šesterečná těsně uspořádaná

3.2 Mikrostruktura kovů

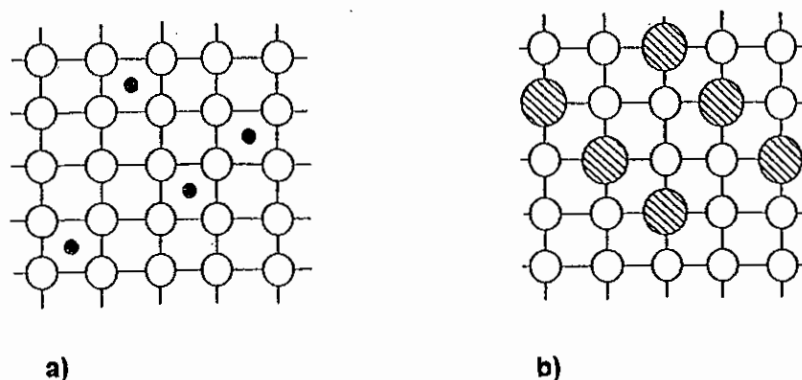
Pokud je mřížka základního kovu schopna přijímat atomy, které se v mřížce rozmístí, vzniká tzv. tuhý roztok – homogenní slitina.

Má-li druhá složka (prvek, sloučenina) jinou krystalovou formu vytváří se samostatná fáze a vznikne směs jako heterogenní slitina.

Tuhé roztoky mohou být:

- Interstitické – mezerové – adiční, u kterých interstitické prvky (ku př. C, N, O, H, B) jsou rozpouštěny v mřížce Fe.
- Substituční – atomy se navzájem zastupují (ku př. Fe, Ni, Mn, Mo).
- Intermediální fáze – mají samostatnou krychlovou strukturu (meziúsekové fáze).

Uspořádání atomů v interstitickém a substitučním tuhém roztoku je zřejmé z obr. 3.2.



Obr. 3.2 Uspořádání atomů v interstitickém (a) a substitučním, (b) tuhém roztoku

V podstatě jde o mechanismus interstitického a substitučního zpevnění tuhého roztoku. Mikrostruktura je struktura kovu nebo slitiny viditelná mikroskopicky při zvětšení 50 až 10000 x na vhodně upraveném vzorku, ku př. na metalografickém výbrusu. Je dána velikostí, tvarem a uspořádáním fází (ČSN 42 04 60 Metalografické snímky).

Fáze – je fyzikálně jednotná část soustavy bez ohledu na chemické složení, je omezená rozhraním na němž se vlastnosti mění skokem. Fáze může být tvořena jednou nebo několika složkami (chemickými prvky, sloučeninami). Fázi ku př. ferit, lze na výbrusu vzorku sledovat mikroskopicky po naleptání nitalem (láh a 5 % HNO₃) na světelném mikroskopu.

3.3 Rekrystalizace

Při svařování dochází v tepelně ovlivněných oblastech k procesům, které souvisejí s velikostí zrna. Přitom zrno je soustava krystalů kovu v polykrystalickém materiálu s nedokonalým geometrickým uspořádáním, které souvisí s omezenými možnostmi růstu zrna při krystalizaci. Z hlediska svařování je určující sekundární rekrystalizace, což je tepelně aktivovaný děj, při němž zrna stejné fáze (nejde o překrystalizaci) v rekrystalizované oblasti rostou nad původní velikost zrna před jeho deformací. Rekrystalizační teplotu (T_r) lze přibližně stanovit ze vztahu

$$T_r = (0,35 \text{ až } 0,4) \cdot T_{\text{tání}} \quad (\text{K})$$

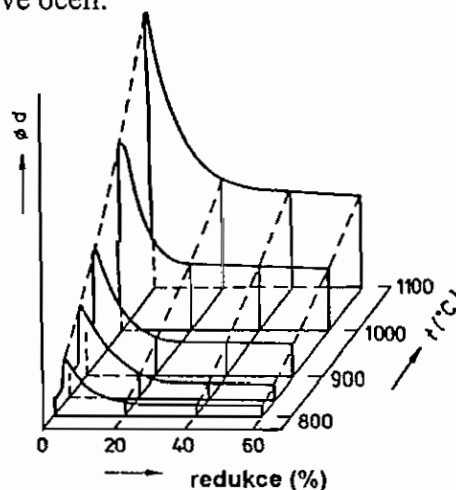
Kritické zhrubnutí nastává při deformaci 2 až 10 % tloušťky plechu za teploty 1100°C a vyšší, kdy je nebezpečí vzniku silně hrubozrnné oblasti (ku př. při elektrostruskovém svařování). Velikost zhrublého zrna lze stanovit podle ČSN 42 04 62 – Zkoušení kovů.

3.4 Elastická a plastická deformace

Deformace elastická po odlehčení vzorku vymizí a ku př. svarový spoj se vrátí do původního stavu. Deformace plastická zůstává i po odlehčení vzorku tj. svarový spoj se nevrátí do původního stavu.

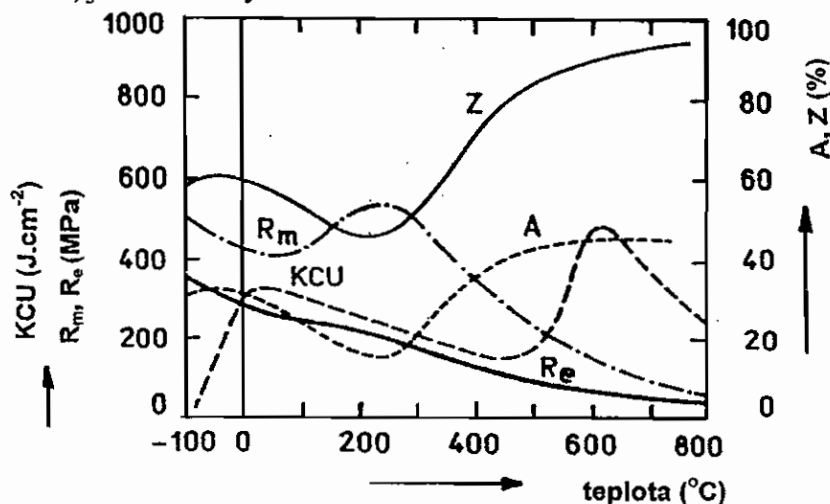
3.5 Deformace v závislosti na teplotě

Závislost velikosti zrna (μm) na deformaci (%) a na teplotě (°C) je zřejmá z obr. 3.3, znázorňujícího rekrystalizační diagram nízkouhlíkové oceli.



Obr. 3.3 Rekrystalizační diagram nízkouhlíkové oceli

Z obr. 3.3 je zřejmé, že probíhá-li deformace za vysokých teplot, je nutné přetvářet ocel redukcí 60 % při nižších teplotách (dokování za teploty těsně nad A_r3). Teplotní závislosti mechanických vlastností oceli S 355 JRG3 (ČSN 411523.1), stanovené mechanickými zkouškami, jsou uvedeny na obr. 3.4.

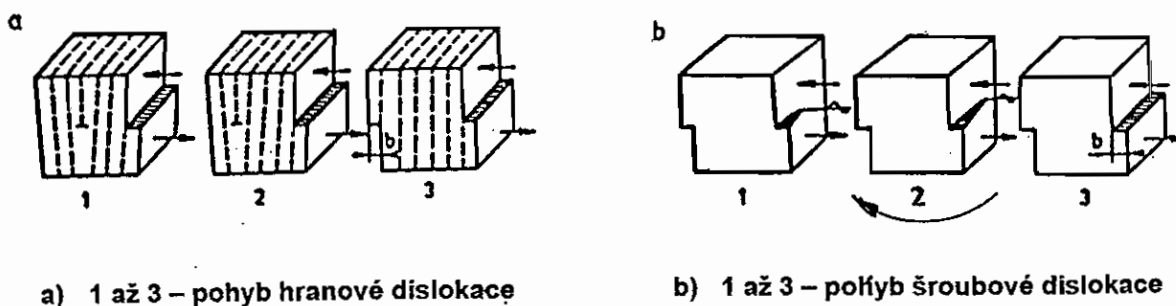


Obr. 3.4 Teplotní závislosti mechanických vlastností oceli S 355 JRG3 (ČSN 4 11 523.1)

Pro vyšší teploty (do 300 °C) musí být použity nestárnoucí oceli (kotlové oceli). Účinná je zkouška ČSN 42 01 09 Zkouška deformace a stárnutí kotlových ocelí. Stárnutí způsobuje dusík ve formě nitridu železa. Po deformaci 5 % a ohřevu na 250 °C/0,5 hod. musí být hodnota vrubové houževnatosti rovna nebo vyšší než JR (27 J). Při volbě oceli pro práci za nižších teplot musí být použity jakostní nízkouhlíkové oceli, které mají za pracovní teploty vyhovující hodnoty vrubové houževnatosti, ku př. oceli S 235 J2 G3 (ČSN 411 378.1.). Jsou to nízkouhlíkové oceli mikrolegované V a Nb (celkem do 0,15 hm. %). Pro nejnižší teploty (kryogenní) jsou vhodné austenitické oceli (mřížka k.p.s.).

3.6 Mechanické zpevnění

Přítomnost **dislokací** (hranových a šroubových) v krystalu usnadňuje plastickou formaci. K vlastnostem dislokací patří schopnost pohybovat se krystalovou mřížkou, a to především skluzem ve skluzové rovině. Schéma pohybu dislokací mřížkou je na obr.3.5.



Obr. 3.5 Schéma pohybu dislokací mřížkou

V závislosti na počtu dislokací se zvyšují pevnostní hodnoty. Při počtu dislokací 10^{10}cm^{-2} lze spolehlivě u mikrolegovaných jemnozrnných nízkouhlíkových ocelí dosáhnout hodnoty meze kluzu 480 MPa (ocel S 480 ML).

3.7 Kovy a slitiny

Kovy jsou charakterizovány kovovou vazbou, leskem, dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Technicky používané kovy obsahují doprovodné prvky. Doprovodné prvky lze rozdělit na škodlivé (fosfor, síra, kyslík, vodík, dusík) a na prospěšné (mangan, křemík, hliník). Pro dosažení požadovaných vlastností se přidávají legující prvky.

Kovová slitina je soustava tvořená nejméně dvěma prvky, z nichž alespoň jeden má kovový charakter. Podle počtu prvků jsou slitiny binární, ternární a případně komplexní.

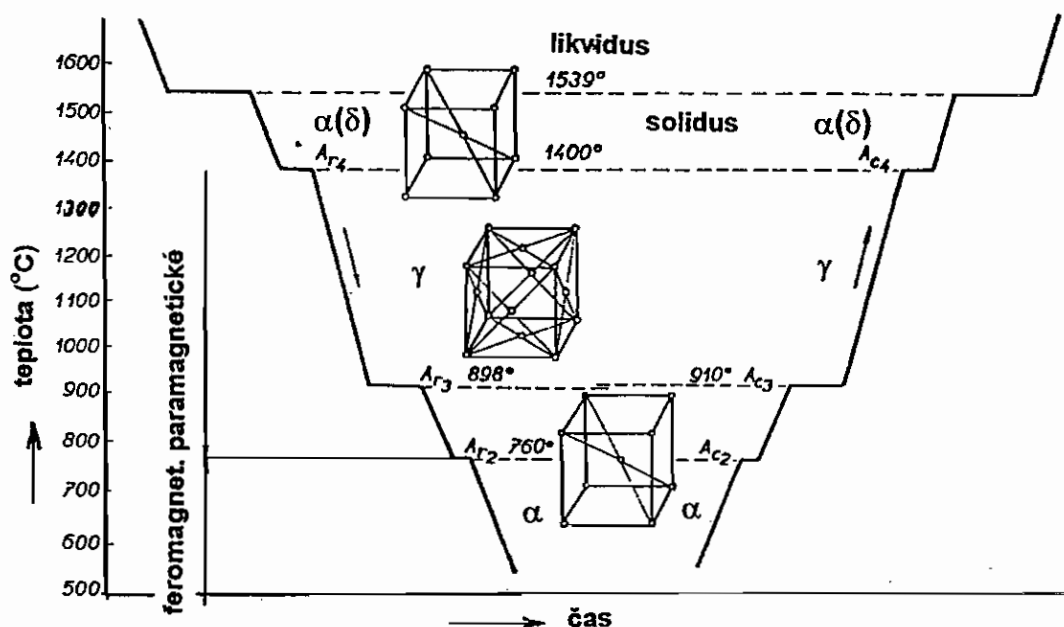
Jako slitinových (legujících) prvků se nejčastěji užívá Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, W, Ti, Al, Nb, Zr a Cu. Slitinové prvky jsou přidávány za účelem:

- zlepšení mechanických vlastností (Mn, Si, Ni, Cr, Mo, V, W),
- zvýšení kalitelnosti a prokalitelnosti (Cr, Mn, Ni, Mo, V),
- zvýšení odolnosti proti opotřebení (W, Cr, Mo, V),
- zvýšení jemnozrnnosti (V, Nb, Ti, Al, Zr),
- zvýšení žárupevnosti (Cr, Mo, V, W),
- zvýšení žáruvzdornosti (Cr, Si, Al),
- zvýšení odolnosti proti korozi (Cr, Ni, Cu).

Dále jsou slitinové prvky děleny z hlediska stability austenitu (Ni, Mn, C, N) a feritu (Cr, Si, Mo, V, W, Ti, Nb, Zr).

3.8 Krystalizace

Při ochlazování čistého kovu je při dosažení teploty tuhnutí v rovnováze kapalná (likvidus) a tuhá (solidus) fáze. Při mírném snížení teploty pod teplotu tuhnutí krystaluje čistý tak dlouho, až krystaly tuhé fáze vyplní celý objem.



Obr. 3.6 Modifikace železa

Při dalším ochlazování čistého kovu může probíhat překrytalizace tuhé fáze pouze alotropicky, tj. za přesně definované teploty v různých modifikacích $Fe\delta$, $Fe\gamma$, $Fe\alpha$, viz obr. 3.6 (modifikace Fe). U slitin probíhá krystalizace polymorfně, tj. v širším rozsahu teplot (mezi teplotami likvidusu a solidusu). Krystalizace je charakterizována rychlostí tvorby zárodků a rychlostí jejich růstu.

3.9 Struktura a typy struktur slitin

Struktura slitin je dána souhrnem fází ve slitině, charakterizovaným jejich druhem, tvarem a způsobem vyloučení a vzájemného spojení. Může být lící, rádkovitá (po tváření), primární (po odlití), nebo sekundární (po překrytalizaci nebo rekrystalizaci lící struktury).

3.10 Intermetalické fáze

Intermetalické fáze mají odlišnou krystalovou strukturu od struktury základních složek. V rovnovážném diagramu navazují na čisté složky. Pokud vznikají při přesně definované koncentraci jedná se o intermetalické fáze (ku př. fáze σ), pokud vznikají v koncentračním rozmezí jedná se o sekundární tuhé roztoky.

3.11 Mechanismus vytvrzování

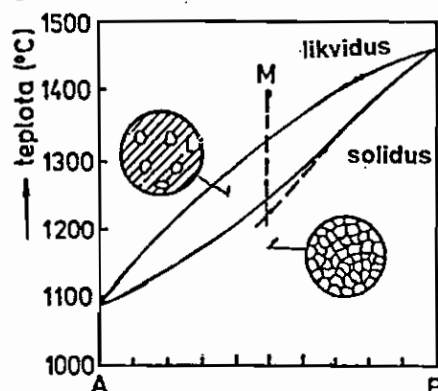
Vytvrzování je proces tepelného zpracování precipitačního charakteru charakterizovaného vylučováním fází z tuhého roztoku ocelí a slitin za účelem změny vlastností jmenovitě tvrdosti, pevnosti a žárupevnosti.

Stárnutí ocelí je způsobeno precipitací (vylučováním) stabilních nitridů železa Fe_4N nebo nestabilních nitridů $Fe_{16}N_2$ (za nižší teploty $250\text{ }^\circ\text{C}$) z přesyceného tuhého roztoku feritu. Vyloučené nitridy podstatně snižují hodnoty vrubové houževnatosti. Stárnutí je podporováno deformací za studena (5 %) s následným ohřevem na teplotu $250\text{ }^\circ\text{C}$. Stárnutí lze předejít legováním oceli hliníkem s cílem vytvořit nitridy AlN s teplotou tání $1620\text{ }^\circ\text{C}$. Kontroluje se v tavbové analýze $Al_{met} = 0,02\text{ až }0,04\text{ hm. \%}$.

3.12 Základní typy fázových diagramů

Rovnovážné diagramy popisují fáze, které jsou v rovnováze v kovových soustavách o dvou a více složkách v závislosti na teplotě.

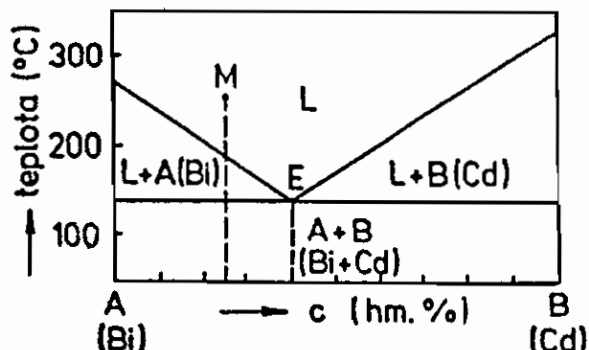
a) Diagramy s úplnou rozpustností složek (A, B) v kapalném i tuhém stavu (obr. 3.7)



Obr. 3.7 Diagram s úplnou rozpustností složek A, B v kapalném i tuhém stavu

Ztuhlá tavenina je tvořena krystaly jedné fáze (ku př. α), která se skládá ze dvou složek (A a B). Odmíšení, vzniklé při tuhnutí, lze odstranit homogenizačním žíháním.

b) Diagramy s úplnou rozpustností složek v kapalném stavu a s úplnou nerozpustností v tuhém stavu (obr. 3.8)

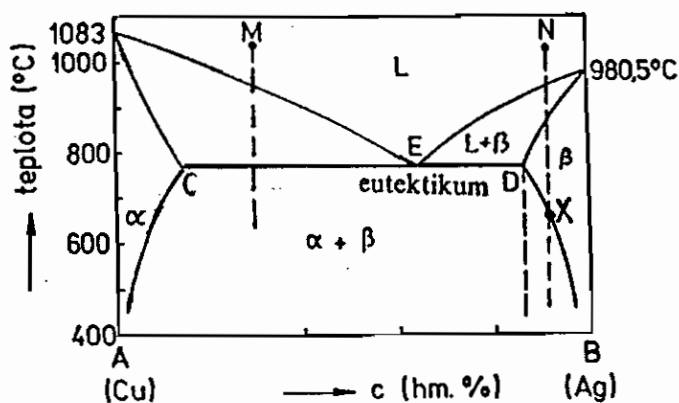


Obr. 3.8 Diagram s úplnou rozpustností složek A, B v kapalném stavu a s úplnou nerozpustností v tuhém stavu

Jestliže složky A a B nejsou v tuhém krystalickém stavu vzájemně rozpustné potom se z taveniny vylučují přímo čisté složky. Obě větve likvidu se protínají v **eutektickém** bodě, kde zbylá tavenina krystaluje za eutektické teploty eutekticky až do vymizení taveniny. Směs obou složek se označuje jako eutektikum, které může být lamelární, tyčinkovité, zrnité, globulární nebo jehlicovité.

c) Diagramy slitin s úplnou rozpustností složek v kapalném stavu a omezenou rozpustností v tuhém stavu (obr. 3.9)

Krystalizace slitin s omezenou rozpustností v tuhém stavu je obdobná jako v případě úplné nerozpustnosti složek s tím, že **eutektikum** se skládá ze směsi fází $\alpha + \beta$ ($E = \alpha + \beta$) – viz obr. 3.9. V případě složení N probíhá krystalizace stejně jako v diagramu úplné rozpustnosti složek v tuhém stavu. Při dosažení bodu X je fáze β nasycená složkou A.



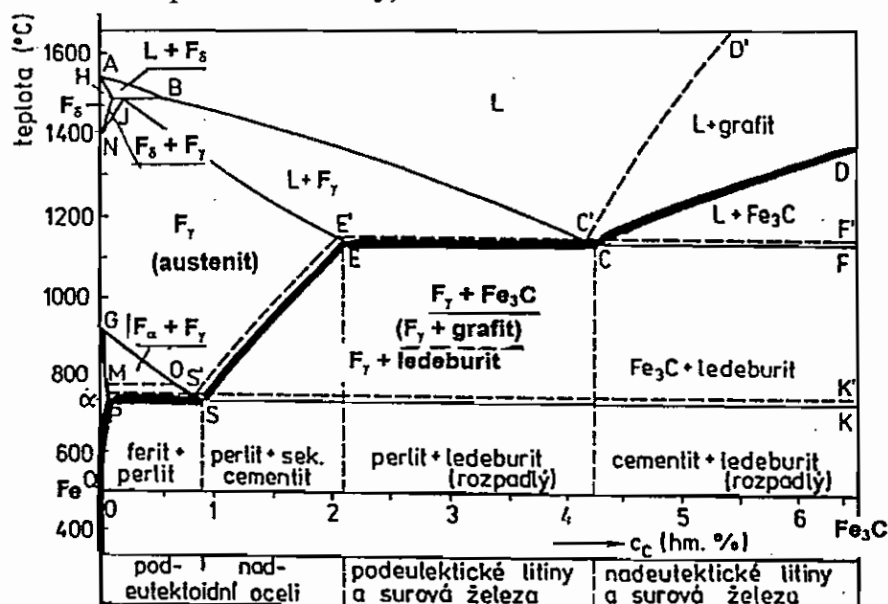
Obr. 3.9 Diagram s úplnou rozpustností složek v kapalném stavu a s omezenou rozpustností v tuhém stavu

Přebytečné množství složky A se vylučuje na hranicích zrna tuhého roztoku β jako segregát o složení fáze α . Precipitační vytvrzování probíhá po rychlém ochlazení slitiny o složení N s následným ohřevem na teplotu odměšování a tvorby segregátu (fáze α).

3.13 Diagram Fe – C

Rovnovážný diagram železa s uhlíkem se znázorňuje do obsahu uhlíku 6,68 hm. %, který odpovídá 100 hm. % karbidu železa – cementitu Fe_3C . Diagram je označován jako diagram **metastabilní soustavy Fe – Fe_3C** (viz obr. 3.10 – plné čáry).

Druhý typ rovnovážného diagramu v němž se zobrazuje rovnováha mezi železem a grafitem v závislosti na teplotě je označován jako **rovnovážný diagram stabilní soustavy Fe – C** (viz. obr. 3.10 – přerušované čáry).



Obr. 3.10 Rovnovážný diagram metastabilní a stabilní soustavy slitin železa s uhlíkem

3.14 Rovnovážné strukturní složky ve slitinách železa s uhlíkem

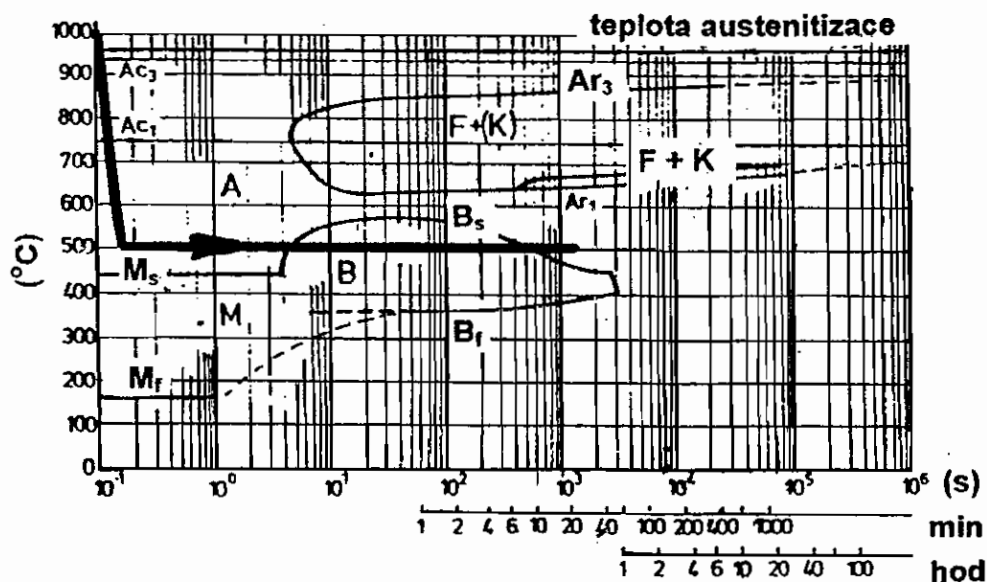
- Ferit** - interstitický (mezerový) tuhý roztok uhlíku v železe α nebo β
- Austenit** - interstitický tuhý roztok uhlíku v železe γ , který je stabilní v intervalu 911 až 1392 °C
- Cementit** - karbid železa Fe_3C – intermediální fáze. Může být primární (z taveniny), sekundární (z austenitu), terciální (z feritu), eutektický (ledeburitický), eutektoidní (perlitický)
- Grafit** - čistý krystalický uhlík
- Ledeburit** - eutektikum (směs krystalů austenitu a cementitu)
- Perlit** - eutektoid (směs feritu α a cementitu)

3.15 Diagram IRA

Diagramy **izotermického rozpadu austenitu** graficky znázorňují izotermický (za stálé teploty) rozpad austenitu po velmi rychlém ochlazení oceli z teplot. nad A_{c3} na předem určenou teplotu (ku př. 500 °C), za které se sleduje magnetometrickou nebo dilatometrickou metodou doba počátku, průběhu a konce rozpadu austenitu – viz obr. 3.11.

Přechlazený austenit prodělává základní transformace:

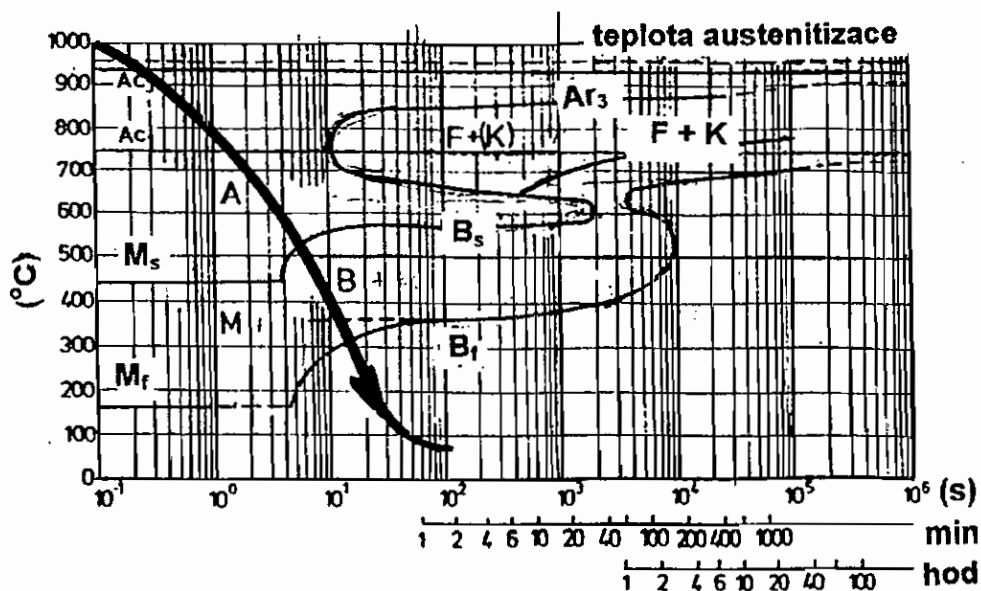
- Feriticko-perlitická transformace – probíhá při nejvyšších teplotách.
- Bainitická transformace – probíhá ve střední oblasti transformačních teplot.
- Martenzitická transformace – probíhá bezdifuzně při nízkých teplotách.



Obr. 3.11 Diagram izotermického rozpadu austenitu (IRA) nízkolegované žárupevné CrMoV oceli

3.16 Diagram ARA

Diagramy anizotermického (kontinuálního) rozpadu austenitu znázorňují rozpad podchlazeného austenitu stanovený při plynulém ochlázování oceli z teploty nad Ac_3 (obr. 3.12).



Obr. 3.12 Diagram anizotermického rozpadu austenitu (ARA) nízkolegované žárupevné CrMoV oceli

V aplikaci na svařování diagramy slouží ke stanovení doby ochlazování v rozsahu teplot 800 až 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) s cílem získání požadované struktury po svařování. Pro přesnější stanovení očekávaných strukturních stavů ve svarových spojích v závislosti na $\Delta t_{8/5}$ se používají ARA diagramy „In situ“ konstruované pro podmínky obloukového svařování.

Strukturní složky v **IRA** a **ARA** diagramech:

- **bainit** - struktura tvořená směsí feritu a karbidů, vznikající přeměnou přechlazeného austenitu,
- **dolní bainit** – vzniká převážně bezdifuzně a je tvořen jehlicovitým feritem a jemnými karbidy,
- **horní bainit** – vzniká s umožněním difuze interstitických prvků a je tvořen jehlicovitým feritem a jemnými karbidy,
- **martenzit** – struktura tvořená přesyceným nestabilním tuhým roztokem uhlíku v Fe_α , vznikající bezdifuzní přeměnou austenitu při ochlazování nadkritickou rychlostí v rozmezí teplot M_s a M_f .

ARA diagramy mají při svařování velký význam při určování teploty předehřevu, dohřevu a tepelného příkonu při svařování, který rovněž podstatně ovlivňuje rychlost ochlazování.

Popouštěním základních struktur se tvoří:

Bainit popouštěný – je směs jemných karbidů a feritu.

Martenzit popouštěný – je směs popouštěného martenzitu a karbidů vzniklých v závislosti na výši popouštěcích teplot.

Všechny přísadové prvky (Cr, Mo, Ni, Mn, V atd.) s výjimkou Co a Al zvyšují stabilitu austenitu což znamená, že posouvají křivky přeměny přechlazeného austenitu doprava směrem k delším časům.

3.17 Rozdělení ocelí podle chemického složení

Podle stupně legování se oceli dělí na:

- **nelegované**, jejichž určující obsahy jednotlivých prvků nedosahují mezních obsahů pro rozdělení ocelí na nelegované a legované, např. mezní obsah (hm. v %):

pro mangan 1,65
pro chrom 0,30
pro křemík 0,50

- **legované**, jejichž obsahy jednotlivých prvků minimálně v jednom případě dosahují nebo překračují mezní obsahy uvedené v normě ČSN EN 10020.

Základní prvky v oceli a zároveň jejich vliv na vlastnosti ocelí názorně ukazuje tab. 3.1.

Tab.3.1 Vliv chemických prvků na vlastností ocelí (* příznivý, + dobrý, - nepříznivý)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	W	V	Mo	Co
Pevnost	*	*	+		-	*	+	+	+	*	+
Tvrдость	*	*	+	+		*	+	+	+	*	
Pružnost	+	+	*			+			+	+	
Houževnatost	-	+		-	-		*			+	
Svařitelnost	-	+	-		-		+		+	+	
Žáruvzdornost		-	*			*	+	+			

4. METALURGICKÉ POCHODY PŘI SVAŘOVÁNÍ

4.1 Teplotní cyklus

Teplotní cyklus při svařování udává změnu teploty v závislosti na čase v daném místě svarového spoje a to především v tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Velikost a charakter změn je možné hodnotit podle

- času ohřevu na maximální teplotu, nebo rychlosti ohřevu ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),
- nejvyšší teploty cyklu T_{max} ($^{\circ}\text{C}$),
- doby výdrže na dané teplotě (s),
- rychlosti ochlazování ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$).

Hodnoty uvedených parametrů závisí zejména na svařovaném materiálu (na chemickém složení, na rozměrech) a na technologii svařování (způsobu, parametrech a na postupu).

Rozložení teploty ve svařovaném materiálu je závislé zejména na **zdroji tepla, rychlosti svařování a na druhu svařovaného materiálu**. Hodnota maximální hustoty výkonu (Wm^{-2}) z hlediska jeho koncentrace, pro různé zdroje energie s výkonem 1 kW je nejvyšší u laserového paprsku, dále následují elektronový paprsek, plazma, el.oblouk a plamen.

Efektivně využitý výkon (**účinnost**) při elektrostruskovém svařování je nejvyšší (až 90 %, účinnost 0,9), nízké je využití při svařování TIG (66 %, účinnost 0,6).

Z hlediska svařování je důležitý tepelný příkon Q ($\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$), počítaný podle rovnice

$$Q = k \cdot E = k (U \cdot I / v) \cdot 10^{-3} \quad (\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}),$$

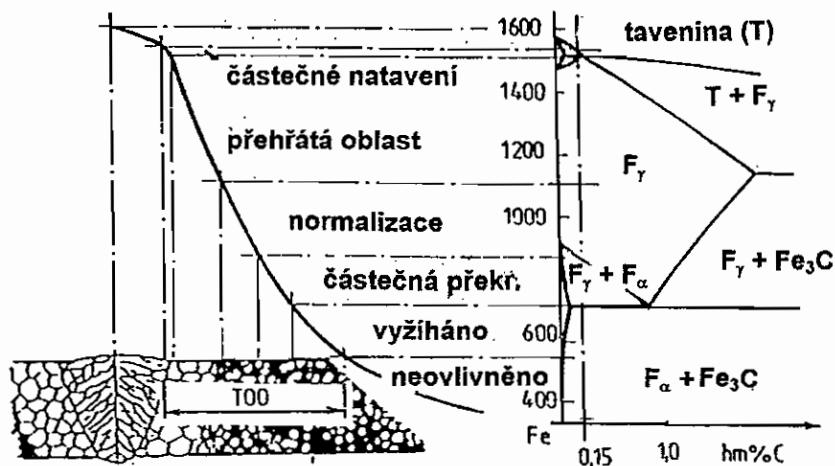
kde U je napětí (V), I proud (A), v rychlosti svařování ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$) a k koeficient účinnosti postupu svařování (ruční svařování 0,8).

4.2 Přeměny v tepelně ovlivněné oblasti

V případě svařování kovů a slitin bez polymorfni přeměny nedochází v TOO ke změně mikrostruktury a probíhají pouze **substrukturní** změny a **rekrytalizace**, tj. růst nebo zjemnění zrn. V kovech a ve slitinách s polymorfni přeměnou (oceli) dochází v TOO k výrazným strukturním změnám, které mají vliv na vlastnosti svarových spojů. Při svařování nelegovaných, případně legovaných ocelí s polymorfni přeměnou můžeme podle obr. 4.1 teplem ovlivněnou oblast rozdělit na charakteristická pásma:

1. Oblast částečného natavení tvoří přechod z TOO do svarového kovu. U většiny ocelí se tato oblast redukuje na linii stavení (fúzní zóna), protože rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je minimální.
2. Oblast přehřátí, tj. oblast s teplotami vysoko nad A_3 , při kterých dochází k intenzivnímu růstu zrn (teplota podle složení oceli 1100 až 1300 $^{\circ}\text{C}$).
3. Oblast vyhřátá nad teplotou nad A_{c3} s úplnou transformací (normalizace).
4. Oblast s neúplnou polymorfni přeměnou, tj. mezi teplotami A_1 až A_3 .
5. Oblast pod teplotou A_1 , ve které probíhají změny buď v rámci tuhého roztoku F, případně substrukturní změny. Pozornost je nutné věnovat oblastí ohřáté na teplotu okolo 250 $^{\circ}\text{C}$ a to z hlediska stárnutí ocelí.

Šířka jednotlivých oblastí TOO je rozdílná pro různé technologie svařování a je ve velké míře závislá na svařovacích parametrech. Celkové šířky TOO se pohybují pro ruční obloukové svařování a MAG okolo 3 až 6 mm, z toho šířka přehřáté oblasti okolo 0,2 mm. Pro svařování pod tavidlem je celková šířka 5 až 15 mm, z toho přehřátá oblast je 0,5 mm a u elektrostruskového svařování je celková šířka TOO až 50 mm, z toho přehřátá oblast až 5 mm. Při svařování elektronovým paprskem a laserem jsou šířky velmi malé a nepřesahují 0,80 mm.



Obr. 4.1 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje

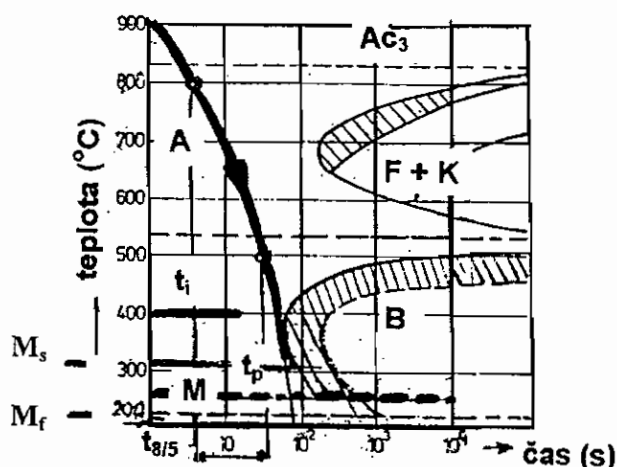
4.3 Jednovrstvé a vícevrstvé svařování

Teplotní cyklus má vliv na překryštalizační a na difúzní procesy. Jak již bylo uvedeno charakterizuje se především dobou chladnutí mezi teplotu 800 až 500 °C ($\Delta t_{8/5}$ nebo $K_{8/5}$). Při vícevrstvě svařování nebo navařování je teplotní cyklus shodný s obr. 4.1 s tím, že při vícevrstvě svařování je tvar teplotních cyklů složitější. Princip je v tom, že po převarování první housenky druhou housenkou je TOO od první housenky znovu tepelně zpracována, tj. oblast je vyžihána druhou housenkou. V případě navaření třetí housenky je oblast znovu žihána, což je z hlediska snížení napjatosti výhodné. Při navaření krycí housenky s převýšením můžeme tuto housenku hodnotit jako „žihací“, tj. po opracování povrchu převýšení housenky obdržíme svarový spoj s podstatně sníženou hladinou pnutí.

Při vícevrstvě svařování dochází tudíž k žihání již navařené housenky další housenkou. Jev může řešit problematickou oblast TOO, kde funkcí „žihací“ housenky můžeme žihat - **popouštět** – zákalné struktury.

4.4 Předehřev při svařování

Předehřevem při svařování lze podstatně přispět ke zvýšení kvality svarového spoje. Předehřevem je možné snížit tepelný spád (gradient), zmenšit náchylnost ke vzniku strukturních fází zákalného charakteru a snížit hladinu vnitřních pnutí. Z diagramu anizotermického rozpadu austenitu nízkolegované Ni oceli (obr. 4.2) plyne, že předehřevem obdržíme v rámci platnosti atermie martenzitické přeměny pouze určité množství okamžitě vzniklého martenzitu, kdežto množství zbylého austenitu se rozpadá za daleko příznivějších podmínek (na bainit) z hlediska kritické hladiny vnitřních napjatostí. Předehřevem v oblasti teplot 150 až 200 °C lze využít příznivých procesů v rámci prvního stadia rozpadu martenzitu na rozpadové produkty a procesu zotavení. Rovněž tak dochází k rozpadu zbytkového austenitu na fáze, které vznikají příznivým difúzním mechanismem.



Obr. 4.2 Diagram anizotermického rozpadu austenitu oceli o složení 0,18 hm. % C, 2 hm. % Ni.

Předehřevem se řídí rychlost ochlazování svarového spoje v TOO (vyjádřená Δt 8/5) a tím i výsledná struktura ve sledovaném místě. Předehřev lze do jisté míry nahradit v návaznosti na svařovanou tloušťku tepelným příkonem. Výše teploty předehřevu je limitována teplotou interpassu (mezihousenkovou teplotou), která by měla zabránit nadměrnému zhrubnutí zrna v TOO a stabilizaci austenitu v pásmu jeho nejvyšší stability (viz obr. 4.2 – teplota nejvyšší stálosti austenitu 540 °C, teplota interpassu 400 °C, teplota předehřevu 250 °C).

Teplotu předehřevu předehřevu je možné měřit pomocí termočlánků, termokříd, pyrometrů, termovizí a pod.

ČSN EN ISO 13916 Svařování – Směrnice pro měření teploty předehřevu, teploty interpassu a teploty ohřevu (05 0220).

4.5 Vady ve svarových spojkách

Póry a bubliny

Bubliny ve svarech vznikají v důsledku vylučování plynů, obsažených ve svarové lázni při chladnutí. Pokud svarový kov chladne příliš rychle krystalizující kov klade odpor unikajícím plynům a ty zůstávají ve svaru v podobě bublin a pórů. Ve svarové lázni mohou vznikat plyny z důvodu vlhkosti přídavného materiálu, vlivem okolní atmosféry a desoxidačních procesů ve svarovém kovu, z nečistot a pod. Vyskytují-li se bubliny ojediněle, jsou jen málo nebezpečné. Naproti tomu shluky plynových bublin jsou škodlivé a z hlediska kvality svaru nepřijatelné. Je-li větší počet bublin blízko sebe je nebezpečí jejich propojení lomovou plochou.

Snížení výskytu bublin pomáhá z metalurgického hlediska dokonalé vysušení přídavných materiálů a předehřev svařovaného materiálu.

Vměstky

Vměstky jsou nejčastějšími vadami ve svarových spojkách. Lze je rozdělit na **struskové, oxidické a kovové**. Vměstky mají ostré okraje a proto jsou na rozdíl od bublin značně nebezpečné, zvláště u svarových spojků namáhaných na únavu. Vyskytují se buď ojediněle, nebo tvoří řádky, kdy jsou seřazeny v přímce rovnoběžné s osou svaru.

Neprovařený kořen

Neprovařený kořen vzniká tehdy, když svarové plochy v kořenu svaru nejsou dostatečně nataveny a nespojí se svarovým kovem. Neprovařený kořen významně zeslabuje nosný průřez svaru a při únavovém namáhání působí jako **nebezpečný vrub**.

Vruby, zápaly

Vruby a zápaly jsou povrchové vady a vyskytují se především na okrajích svarové housenky. Zmenšují průřez svaru a při únavovém namáhání se projevují jako velmi nebezpečné vady, ze kterých vznikají a šíří se trhliny. Mezi vruby lze řadit obdobně jako neprovařený kořen také studený spoj, který je též nebezpečným typem vady ve svarovém spoji.

Směrnice pro určování stupňů jakosti a tím i přípustnosti chyb ve svarových spojkách: ČSN EN 25817 Svarové spoje ocelí zhotovené obloukovým svařováním.

5. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH MATERIÁLŮ A SVAROVÝCH SPOJŮ

5.1 Tepelné zpracování před svařováním

Účelem tepelného zpracování ocelí před svařováním je vytvořit optimální stav oceli pro svařování. Tepelným zpracováním lze zajistit požadované mechanické, fyzikální, chemické a technologické vlastnosti, které zvyšují odolnost oceli proti poškození. Pro stanovení postupu tepelného zpracování jsou určeny diagramy izotermického a anizotermického rozpadu austenitu oceli. Diagramy jsou důležité též pro stanovení teplot předehřevu, dohřevu, mezioperační teploty, interpass teploty a tepelného zpracování po svařování.

V podstatě lze rozdělit tepelné zpracování na zpracování:

- a) **s překrytalizací** (přeměna mřížky),
- b) **bez překrytalizace** (bez přeměny mřížky).

Před svařováním se nízkouhlíkové a nízkolegované oceli tepelně zpracovávají těmito způsoby žíhání:

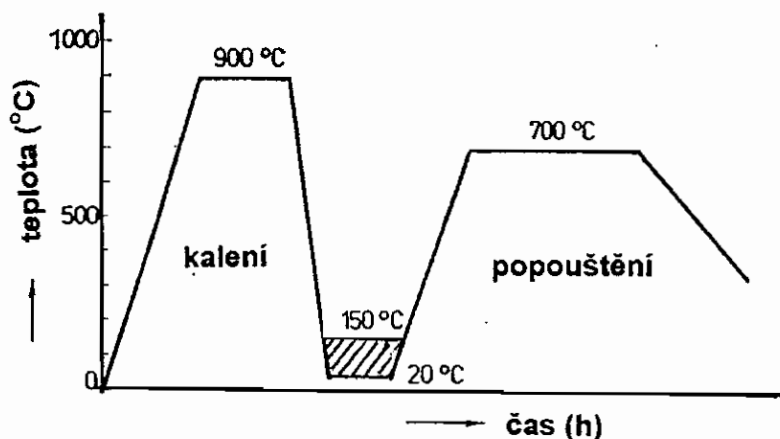
5.2 Normalizační žíhání (překrytalizační tepelné zpracování)

Skládá se z ohřevu 50 °C nad teplotu A_{c3} s následujícím vyrovnáním teploty v celém průřezu materiálu a z následného ochlazení na vzduchu. Účelem normalizačního žíhání je zrovnoměnit a **překrytalizací zjemnit** strukturu ocelí a odstranit nerovnoměrnosti ve velikosti zrn.

5.3 Zušlechťování (obr. 5.1)

Zušlechťování spočívá v **kalení a popouštění** oceli na požadované mechanické hodnoty. Kalení (překrytalizační tepelné zpracování) se uskutečňuje rychlým ochlazením

z teploty 80 °C nad A_{c3} na mezioperační teplotu 20 až 150 °C, ze které se ocel ohřívá na popouštěcí teplotu (pod překryštalizační teplotu). Výsledkem rychlého ochlazení (voda, olej) z kalící teploty jsou v závislosti na chemickém složení struktury zákalného charakteru (martenzit, bainit).



Obr. 5.1 Kinetický diagram závislosti teploty na času při zušlechťování

5.4 Popouštění (žihání bez překryštalizace)

Popouštění je součástí zušlechťování. Slouží ke snížení napjatosti a tvrdosti vzniklé po kalení. Popouštěním v rámci prvního, třetího a čtvrtého stadia rozpadu martenzitu, tj. za teplot 150 až 700 °C se tvoří struktura popouštěného martenzitu, který je charakterizován sníženou tvrdostí. Popouštěním za teplot 50 až 100 °C pod A_{c1} vzniká struktura vysokopopouštěného martenzitu – sorbitu. Popouštěním bainitu vzniká struktura popouštěného bainitu. V závislosti na výši popouštěcí teploty se snižuje tvrdost, vnitřní napjatost a zvýší se hodnoty charakterizující plasticitu a houževnatost.

5.5 Homogenizační žihání (překryštalizační zpracování)

Používá se zejména u odlitků a velkých výkovků a uskutečňuje se ohřevem na teplotu 1200 °C s cílem vyrovnání **heterogenity** (nestejnorodosti) chemického složení. Provádí se před normalizačním žiháním.

5.6 Rozpouštěcí žihání austenitických ocelí (bez změny mřížky)

Rozpouštěcí žihání spočívá v ohřevu na rozpouštěcí teplotu karbidů v austenitických ocelích cca 1030 °C a výdrži na teplotě do 20 minut s následujícím rychlým ochlazením na teplotu okolí. Účelem je získat čistě austenitickou strukturu oceli, která vzdoruje mezikryštalové korozi do teploty 350 °C.

5.7 Stabilizační žihání austenitických ocelí (bez změny mřížky)

Účelem stabilizačního žihání za teplot 850 až 900 °C po dobu 2 až 4 hodin je získat austenitickou strukturu s rovnoměrně vyloučenými karbidy především uvnitř zrn s velmi

nízkou hladinou vnitřních pnutí. Žihání se používá u korozivzdorných nestabilizovaných austenitických ocelí.

5.8 Žihání vysokochromových feritických ocelí (bez překrystalizace)

Struktura feritu delta vysokochromových ocelí vzniká přímo z taveniny a nelze zpracovat překrystalizačním žiháním. Proto se doporučuje oceli před svařováním žíhat za teplot 700 až 800 °C, kdy dochází k podstatnému snížení tahové napjatosti. Nedoporučuje se zvyšovat teplotu žihání z důvodu nárůstu zrn a poklesu plasticity po ochlazení na teplotu okolí.

5.9 Tepelné zpracování svarových spojů

Pokud je nutné svarové spoje po svařování tepelně zpracovat z důvodu snížení vnitřních pnutí, nebo v důsledku vzniku strukturních stavů zákalného charakteru, potom lze doporučit pouze žihání bez překrystalizace, tj. za teplot pod A_{c1} .

5.10 Žihání ke snížení vnitřních pnutí (bez překrystalizace)

Používá se u svařených konstrukcí složitých tvarů a o velkých tloušťkách určených pro opracování. Žihá se za teplot 620 až 650 °C s tím, že pnutí se snižuje relaxačním mechanismem na hodnotu meze kluzu spoje za žihací teploty. Doba žihání je pro různé typy ocelí uvedena v ČSN 050211 (cca 4 minuty na 1mm tloušťky stěny svarku). Po žihání následuje pomalé ochlazování až do teploty 200 °C a poté se ochlazuje na vzduchu. Používá se především u konstrukcí svařených z nízkouhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí.

Vnitřní pnutí lze snížit též mechanicky s využitím vibrátorů plastickým přetvořením (odstraněním špiček napětí).

5.11 Popouštění po svařování (bez překrystalizace)

Při popouštění svarových spojů se zákalnou strukturou (martenzit, bainit), dochází ke vzniku nízko až vysoko-popouštěného martenzitu (sorbit) a popouštěného bainitu. Princip je stejný, jako při popouštění po kalení. Popouští se za teplot do $A_{c1} - 50$ °C, avšak nejvýše za teplot o 50 °C nižších než byla popouštěcí teplota základního materiálu před svařováním. Popouštěním se rovněž sníží hladina vnitřních pnutí, tvrdost, pevnostní hodnoty a zvýší se plasticita.

5.12 Precipitační vytvrzování

Precipitační vytvrzování kovových materiálů probíhá mechanismem rozpadu přesyceného tuhého roztoku za současného vzniku nové fáze (precipitátu), vyloučené v jemné disperzi, ku př. karbidů při popouštění martenzitické struktury (přesycené uhlíkem).

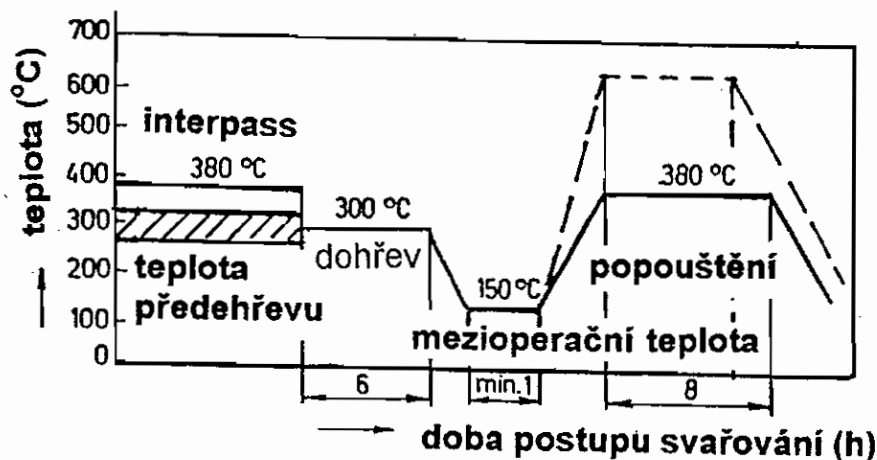
5.13. Diagramy průběhu tepelného zpracování

Diagramy průběhu tepelného zpracování svarových spojů jsou součástí WPS (svářečských postupů) a vyjadřují závislost žihací teploty na době setrvání na teplotě. Žihání po svařování je nejlépe provádět v pecích se záznamem průběhu teploty a doby, zaručujících stejnoměrný ohřev a prohřátí ve všech částech svařeného dílu. V případech, kde nelze

po svařování žíhat v peci, lze žíhat místně, např. plynovými hořáky, el.odporovými topnými články, nebo indukčně a to v šíři rovné alespoň desetinásobku tloušťky materiálu na každou stranu svaru. Žíhací teplota je ve většině případů 620 až 650 °C. Ohřev na žíhací teplotu musí být pomalý tj. 150 °C/hod. Na žíhací teplotě se svarový spoj udržuje po dobu 1 až 5 minut na každý mm tloušťky stěny, nejméně však 20 minut. Chlazení je optimální v uzavřené peci rychlostí cca 100 °C/hod. až do teploty 200 °C, kdy se svarový spoj vyjme z pece. Uvedené hodnoty jsou pouze informativní. Šířku žíhané oblasti, výši teploty žíhání, rychlosti ohřevu a ochlazování při žíhání, dobu žíhání udává pro běžné oceli ČSN 050211. Pro speciální oceli mohou platit jiné hodnoty, především rychlosti ohřevu a ochlazování.

K záznamu teplot v peci se používají přesné termočlánky umístěné v různých částech pece. Při místním žíhání se používají termokřídly, termočlánky dotykové a bezdotykové teploměry až po moderní termovize. Příklad průběhu teplot při svařování a po svařování vysokotlaké skříně turbíny ze žárupevné nízkolegované oceli typu CrMoV je na obr. 5.2.

Detailní postupy tepelného zpracování jsou uvedeny v normách pro zpracování uhlíkových a legovaných ocelí ve tvářeném a v litém stavu, které jsou zpracovány podle užití v zařízeních, ku př. ČSN 42 0283, 42 0284, 420 285 (oceli pro tlakové nádoby, kotle a potrubí). Tepelné zpracování svarových spojů nelegovaných a nízkolegovaných ocelí je uvedeno v ČSN 05 0211 a v ČSN EN ISO 13916 Svařování – Směrnice pro měření teploty předehřevu, interpassu a ohřevu (ČSN 05 0235).



Obr. 5.2 Průběh teplot při svařování a tepelném zpracování odlitku z nízkolegované CrMoV oceli

6. SVAŘITELNOST MATERIÁLU A NÁCHYLNOST NA VZNIK TRHLIN

6.1 Svařitelnost

Svařitelnost je komplexní charakteristika, vyjadřující vhodnost materiálu vytvořit svarový spoj požadovaných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností při určitých metalurgických, konstrukčních a technologických možnostech s cílem dosažení požadované jakosti, spolehlivosti a životnosti svarového spoje.

Metalogické vlastnosti se zajišťují způsobem výroby oceli, chemickým složením, způsobem odlévání, tváření a tepelným zpracováním.

Konstrukční požadavky se zajišťují pevnostními vlastnostmi materiálu, tloušťkou, tvarem spoje, přípravou svarových hran, tuhostí spoje a přístupností ke spoji.

Technologické požadavky se zajišťují metodou svařování, přídavným materiálem, postupem svařování, tepelným režimem svařování a tepelným zpracováním po svařování.

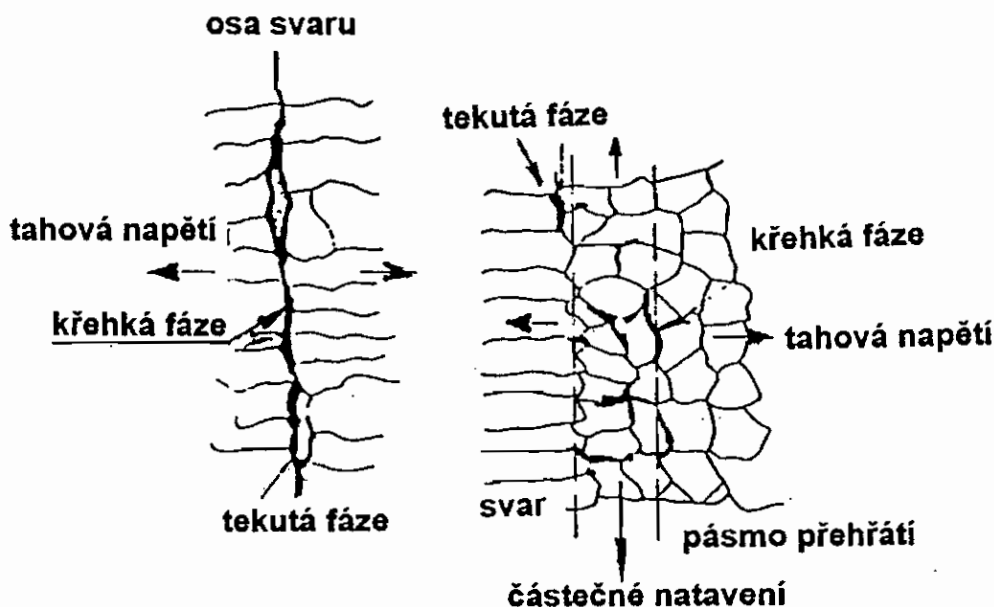
Svařitelnost podle IIW-IIS se určuje především podle chemického složení tj. podle obsahu uhlíku, nečistot, legujících prvků, povrchově aktivních prvků, vodíku a podle tloušťky svařovaného materiálu. Teplotu přehřevu lze určit v relaci s tepelným příkonem.

Při svařování a po svařování mohou vzniknout trhliny za horka, za studena, lamelární trhliny a žíhací trhliny.

6.2 Trhliny za horka

Trhliny za horka vznikají ve svarovém kovu a v teplem ovlivněné oblasti (viz obr. 6.1) při setrvání na teplotě (u ocelí nad 680 °C) a při ochlazování svarových spojů a jsou **interkrystalického** (mezikrystalického) charakteru. Lze je rozdělit na:

- krystalizační (dendritické), které vznikají ve svarovém kovu v průběhu tuhnutí (krystalizace),
- likvační, které se tvoří ve vysokoohřátém podhouseňkovém pásmu TOO základního materiálu, nebo ve svarovém kovu při znovu natavení eutektika (několika vrstvé svařování). Do této skupiny lze zařadit též polygonizační trhliny, které rovněž probíhají po hranicích zrn, jsou však charakteristické jen pro vysokolegované austenitické oceli a pro slitiny s niklem (eutektikum NiS-Ni – teplota tání 680°C).



Obr. 6.1 Oblast vzniku krystalizačních trhlín v místech dendritů a na hranicích zrn

Za hlavní metalurgické příčiny vzniku krystalizačních a likvačních trhlin v ocelích se považují nečistoty S a P, které tvoří se železem nízkotavitelné sulfidy FeS (1190 °C) a fosfidy Fe₃P (1166 °C), které dále vytvářejí se železem nízkotavitelná eutektika ve formě filmu ku př. FeS-Fe (980 °C).

6.3 Hodnocení náchylnosti oceli k trhlinám za horka

Náchylnost svarového kovu a TOO k trhlinám za horka lze určit parametrickými rovnicemi H.C.S a U.C.S, zohledňujícími nepříznivý vliv síry, fosforu spolu s uhlíkem. Ku př. parametr U.C.S:

$$U.C.S = 230C + 190S + 75P + 45Nb + 40Ni + 12Si + 5,4Mn \quad (\text{hm. \%}).$$

Ocel je náchylná k trhlinám za horka, když $10 < U.C.S < 30$.

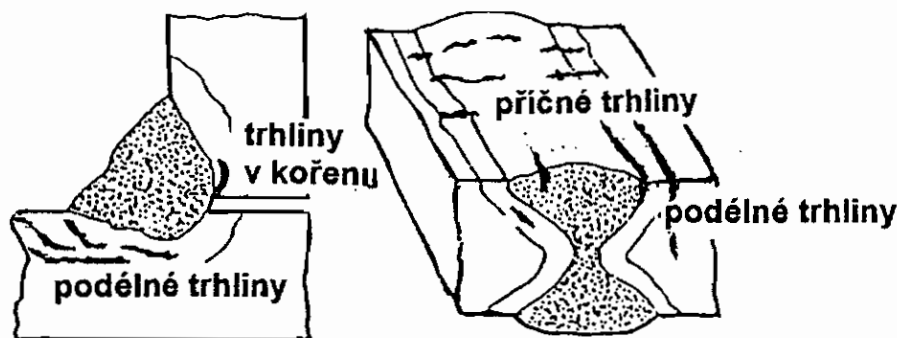
Moderní zkoušky náchylnosti k trhlinám za horka se provádějí na simulátorech podmínek svařování.

K zamezení vzniku trhlin za horka je nutné:

- používat oceli a přídavné materiály s velmi nízkými obsahy nečistot, jmenovitě P a S, dolegovanými manganem (MnS teplota tání 1610 °C – vyplave do strusky),
- snížit tepelný příkon při svařování a tím i množství nataveného kovu, stupně segregace a růstu zrna,
- omezit deformace a stavy napjatosti vhodnou technologií svařování, tvarem svarového spoje a předehřevem.

6.4 Trhliny za studena

Trhliny za studena – indukované vodíkem jsou poruchy, které vznikají při teplotách pod 250 °C. Vyskytují se nejčastěji v podhousenkové oblasti svarových spojů a návarů. Dále se vyskytují také v kořenové oblasti, v koncových oblastech svaru a ve svarovém kovu. (viz obr. 6.2). Trhliny za studena jsou **transkrystalického** charakteru, povrch je lesklý, neoxidovaný na rozdíl od trhlin vzniklých za horka.



Obr. 6.2 Typy trhlin za studena

Hlavní příčinou vzniku trhlin za studena je přítomnost zákalné martenzitické struktury, citlivé na působení vodíku. S tím souvisí i přítomnost vodíku ve svarovém spoji. Trhliny vznikají především za spolupůsobení tahového stavu napjatosti.

Zdrojem vodíku ve svaru je nejčastěji atmosférická vlhkost, vlhkost z obalu elektrod, tavidel a ze svařovacích drátů po jejich nevhodné povrchové úpravě. Obsah vodíku lze zjistit

rtuťovou a glycerinovou zkouškou. Obsah vodíku v základním materiálu by měl být nižší než $2 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$, ve svarovém kovu méně než $4 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$.

Náchylnost oceli na vznik trhlin za studena souvisí s jejich kalitelností a prokalitelností tj. s transformačním zkrěhnutím. Souhrnný vliv chemického složení na náchylnost oceli na zakalení v TOO a tím i náchylnost na vznik trhlin za studena lze vyjádřit uhlíkovým ekvivalentem, např. podle IIW-IIS.

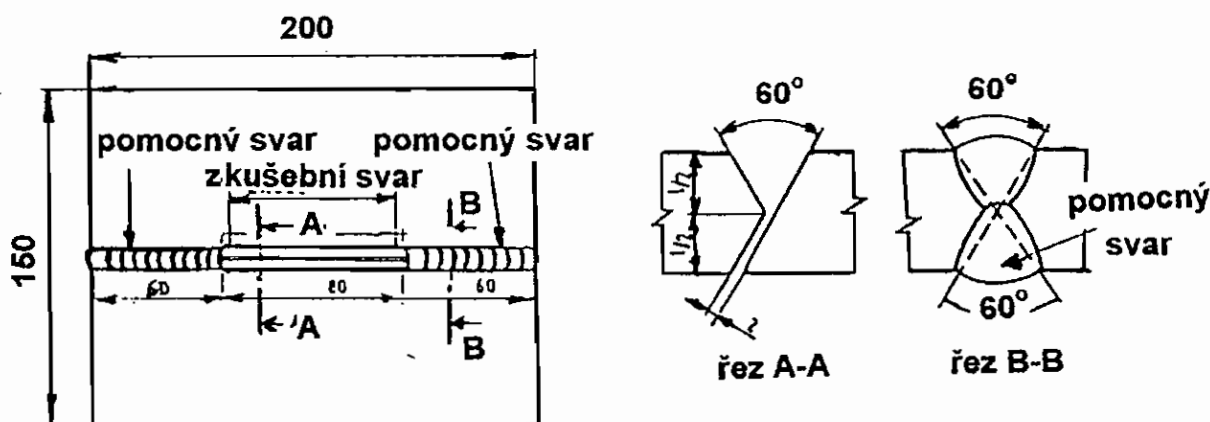
$$C_e(\text{IIW-IIS}) = C + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15 \quad (\text{hm. \%}).$$

Mezní hodnoty C_e pro C 0,20 hm. % a pro tloušťku 25 mm jsou 0,45. Jsou-li vypočítané hodnoty C_e vyšší, je nutný předehřev, nebo vyšší tepelný příkon v kombinaci s předehřevem.

Parametrické rovnice k vyjádření náchylnosti k trhlinám za studena zahrnují vliv chemického složení, vliv difúzního vodíku a vliv tuhosti svarového spoje (tloušťky).

6.5 Hodnocení náchylnosti k trhlinám za studena

Experimentální zkoušky náchylnosti k trhlinám za studena lze uskutečnit skutečným svařováním a simulovaným svařovacím cyklem (na simulátoru). Osvědčila se zkouška náchylnosti k trhlinám Tekken (viz obr. 6.3), která je technologickou zkouškou pro tloušťky plechů 12 až 150 mm. Zkouška se používá pro stanovení parametrů svařování kořenové oblasti tupých svarových spojů.



Obr. 6.3 Zkouška náchylnosti k trhlinám za studena Tekken

K zamezení vzniku trhlin za studena je nutné:

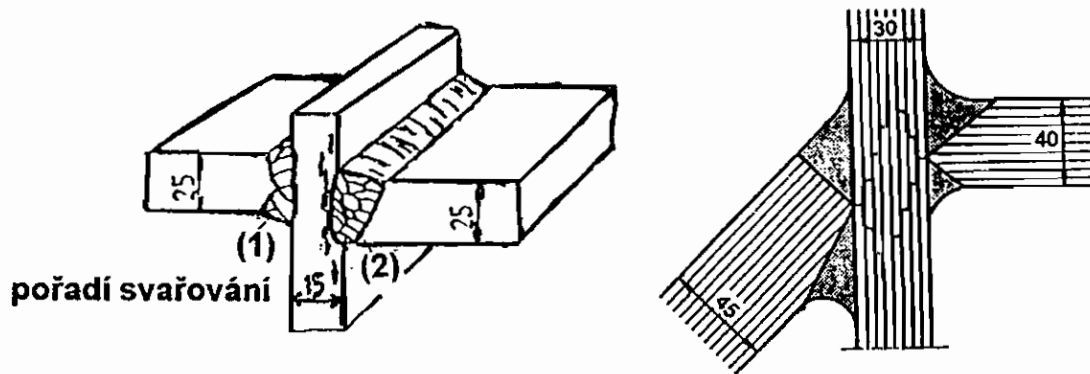
- používat přídavné materiály s nízkým obsahem vodíku. Pokud je to možné elektrody s bazickým obalem s obsahem difúzního vodíku do $4 \text{ ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$,
- dokonale vysušit přídavné materiály před svařováním ($300 \text{ }^\circ\text{C}$ podle předpisu),
- svařovat s předehřevem, dohřevem, vyšším tepelným příkonem,
- potlačit vznik zbytkových napětí a deformací na minimum,
- vyloučit vruby ve svarových spojih.

6.6 Lamelární trhliny

Lamelární (terasovité) trhliny vznikají v základním (především válcovaném) materiálu v důsledku namáhání kolmo k jeho povrchu (obr. 6.4). Mají kaskádovitý, stupňovitý tvar, zpravidla rovnoběžný s povrchem materiálu (plechu). Hlavní činitelé, jež ovlivňují vznik lamelárních trhlin, jsou:

- plastické vlastnosti ve směru kolmém k povrchu plechu, jmenovitě kontrakce (Z),
- způsob svařování a svařovací parametry (výhodné je polštářování),
- konstrukce svařovaného uzlu - tahové namáhání materiálu ve směru jeho tloušťky,
- přítomnost velkého počtu plastických rozválcovaných vměstků,
- zvýšený obsah difuzního vodíku.

Podle ČSN EN 10027-1 jsou v označení oceli uvedeny požadované hodnoty zkoušky tahem ve směru kolmém k povrchu plechu (ve směru tloušťky), jmenovitě poměrné zúžení (kontrakce) Z_z , které vyjadřuje náchylnost oceli větších tloušťek na lamelární trhliny.



Obr. 6.4 Lamelární trhliny ve svarových spojích ocelových konstrukcí

6.7 Hodnocení náchylnosti k lamelárním trhlinám

Náchylnost oceli k lamelárním trhlinám je hodnocena podle kritérií poměrného zúžení Z_z :

- Z_z do 10 % - oceli jsou náchylné k lamelárním trhlinám,
- Z_z 10 % až 25 % - oceli jsou běžně odolné vůči lamelárním trhlinám,
- Z_z více než 25 % - oceli nejsou náchylné k tvorbě lamelárních trhlín.

K omezení vzniku lamelárních trhlín je nutné:

- používat základní materiály se zaručenou kontrakcí Z_z větší než 15 % což znamená používat materiály s velmi nízkým obsahem nečistot (P a S), vměstků a vodíku,
- eliminovat tahová napětí změnou tvaru spoje na minimum. Doporučuje se používat polštářování na svarové ploše, kde působí tahová napětí kolmo k povrchu plechu.

6.8 Žíhací trhliny

Žíhací trhliny vznikají při tepelném zpracování svarových spojů, případně při vícevrstevném svařování. Žíhací trhliny mohou vznikat:

- za nízkých teplot, tj. v průběhu ohřevu na teplotu žhání (při ochlazování z teploty žhání), při vysoké rychlosti ohřevu (ochlazování) - důvodem je vznik velkého gradientu teplot po tloušťce žháného materiálu,
- za nízkých teplot, tj. v průběhu ohřevu na teploty žhání v oblasti teplot 200 až 250 °C v důsledku rozpadu přesycených tuhých roztoků (martenzit, bainit), nebo mechanismem stárnutí ocelí (precipitace nitridických fází železa),
- v oblasti ohřevu na žhací teploty (475 °C - oblast popouštěcí křehkosti, především precipitace karbidů chromu nevhodného tvaru),
- v oblasti žhacích teplot 500 až 650 °C (vysokoteplotní žhací trhliny) a to především v důsledku potlačení relaxačních procesů při precipitaci karbidů slitinových prvků (VC a dalších),
- jako podnávarové trhliny vznikají ve zhrublé podhousenkové oblasti při ohřevu další housenkou v oblasti teplot pod A_{c1} .

Náchylnost oceli k trhlinám zvyšují povrchově aktivní prvky (Cd, Sn, Sb, As), jejichž množství by nemělo přesáhnout 0,003 až 0,005 hm. %.

6.9 Hodnocení náchylnosti oceli k žhacím trhlinám

Náchylnost k žhacím trhlinám lze hodnotit simulací žhacích procesů na zkušebních modelech s následným defektoskopickým a metalografickým vyhodnocením. Důsledky náchylnosti lze minimalizovat snížením rychlosti ohřevu v teplotní oblasti okolo 250 a 475 °C. Rychlost ohřevu se má pohybovat okolo 15 až 50 °C.h⁻¹. Dalším doporučením je dohřev po svařování na teplotě předehřevu 30 minut s ochlazením na mezioperační teplotu 150 °C a ohřev na žhací teplotu. V případě, ve kterém zjistíme, že ocel je náchylná na žhací teploty (např. v oblasti 580 až 650 °C) je možné použít dvojstupňové žhání, tj. relaxační za teplot 500 až 530 °C (2 hodiny) a poté se zvýší teplota na běžnou žhací teplotu. Omezení výskytu žhacích trhlin je možné použitím dvojvrstvého navařování na principu funkce „žhací“ housenky.

7. POUŽITÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ OCELÍ A JEJICH SVAŘITELNOST

7.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí

Uhlíkové oceli jsou vhodné pro svařování je-li obsah uhlíku do 0,22 hm. % včetně a ekvivalent uhlíku $Ce(IIW-IIS)$ – viz stať 6.4 pro tloušťku stěny 25 mm roven nebo menší než 0,45. Při svařování větší tloušťky se zvětšuje ochlazovací rychlost, tím i možnost vzniku zákalné struktury. Znamená to volit ocel o jiném chemickém složení, nebo svařovat s předehřevem a snížit tak ochlazovací rychlost. V případě volby oceli vhodné ku př. pro svařování tloušťky 40 mm bude u oceli podstatně snížen obsah uhlíku a jeho zpevňující účinek bude nahrazen manganem. Svařují-li se uhlíkové oceli s předehřevem doporučuje se předehřev na teploty 100 až 150 °C. Pro svařování se doporučují oceli v normalizačně zpracovaném stavu, ku př. ocel S 235 J2 G3, což je ocel uklidněná a normalizačně zpracovaná, vhodná pro práci za teploty až -20 °C (ČSN 411378.1), nebo ekvivalentní oceli termomechanicky zpracované, ku př. S 235 J2 M (nebo S 235 J2 N). Pro svařování se používají přídatné materiály shodných mechanických vlastností.

7.2 Svařitelnost nízkolegovaných ocelí

Svařitelnost nízkolegovaných ocelí kromě uhlíku ovlivňují i legující prvky (Cr,Mo,V,Ni), které zvyšují jejich kalitelnost a prokalitelnost. Svařitelnost se hodnotí podle uhlíkového ekvivalentu $Ce(IW,IIS)$, který má být nižší nebo roven 0,45. Je-li vyšší nízkolegované oceli potom vyžadují předehřev, dohřev, mezi ochlazení na teplotu 100 až 150 °C a případně se popouštějí. Teploty předehřevu se počítají podle parametrických rovnic, nebo lépe je určit teploty podle anizotermických diagramů rozpadu austenitu. Pro svařování se používají přídatné materiály obdobného složení jako má svařovaný materiál.

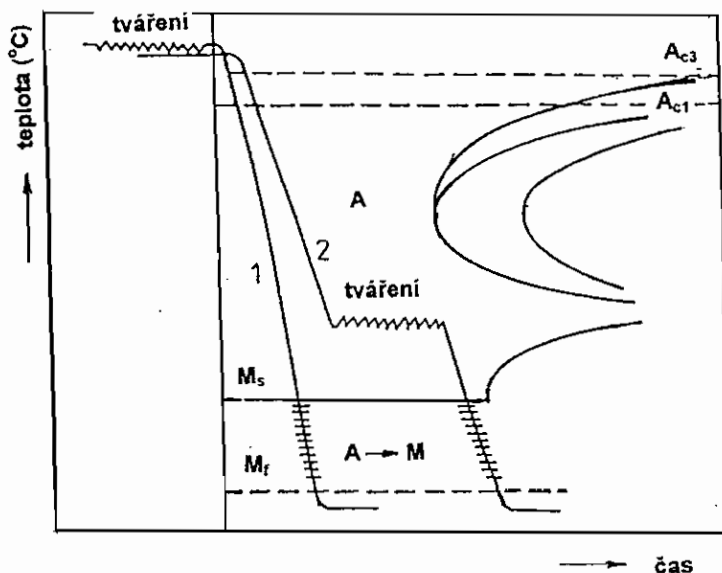
7.3 Jemnozrnné oceli, NTMZ, VTMZ (termomechanicky zpracované oceli)

Mez kluzu oceli lze kromě substitučního a interstitického zpevnění úspěšně zvýšit dislokačním zpevněním a dále mikrolegováním materiálu malými obsahy prvků V,Nb,Ti a Al, které umožňují vznik jemnozrnné struktury. Dále spolu s uhlíkem a dusíkem formou precipitačního zpevnění zvyšují pevnostní vlastnosti oceli. Obsahy mikrolegujících prvků jsou poměrně malé a jsou součtově limitovány 0,15 hm. %. Nejdůležitější funkcí mikroprecipátů (VC, NbC, TiC, AlN) je bránění migrace (pohybu) hranic zrn při rekrystalizaci a tím hrubnutí zrn.

Jemnozrnné oceli se vyrábějí v moderních kyslíkových konvertorech s následným plynulým odléváním do bram, mnohonásobným řízeným válcováním a ochlazováním. Vyrábějí se podle ČSN EN 10027-1 v jakosti M, N a Q s velmi nízkým obsahem uhlíku (0,08 hm. %). Oceli se svařují do hodnoty meze kluzu 480 MPa bez předehřevu (do 25 mm včetně). Dislokačně zpevněné vysokopevné oceli lze při svařování větších tloušťek žíhat za nejvyšší teploty 400 °C, jinak je nebezpečí snížení pevnostních hodnot.

a) Vysokoteplotní – termomechanické zpracování (VTMZ)

V procesu VTMZ (viz obr. 7.1) je ocel tvářena v oblasti stabilního austenitu, tj. nad teplotou A_{c3} . Vzniklá jemnozrnná struktura bez umožnění rekrystalizace a většího stupně zotavení se prudce ochladí za vzniku velmi jemné martenzitické struktury. Výsledkem je dosažení vysokých pevnostních charakteristik s mezí pevnosti až 1800 MPa.



Obr. 7.1 Základní typy termomechanického zpracování oceli:
1 – VTMZ, 2 – NTMZ

b) Nízkoteplotní - termomechanické zpracování (NTMZ)

NTMZ (viz obr. 7.1) se používá u ocelí majících širší oblast metastabilního austenitu. Principem je austenitizace oceli s následným ochlazením do oblasti metastabilního austenitu, pod jehož rekrystalizační teplotou se ocel intenzivně tváří a poté zakalí. Vysoká hustota dislokací (mřížkových poruch) vede k dosažení vysoce jemného martenzitu s vysokou hodnotou meze pevnosti.

7.4 Vysokopevné oceli

V aplikaci na moderní způsoby výroby svařitelných mikrolegovaných jemnozrnných ocelí (V, Nb) o hodnotě meze kluzu 480 až 980 MPa se při výrobě využívá termomechanické zpracování s řízeným mnohonásobným válcováním a s řízeným ochlazováním (dochlazováním). Svařování vysokopevných mikrolegovaných jemnozrnných ocelí je zjednodušeno v důsledku využití deformačně-dislokačního zpevnění při velmi nízkém obsahu uhlíku (0,04 až 0,08 hm. %) a mikrolegování (do 0,15 hm. % V a Nb). Postup svařování je uveden ve stati 7.3. Je nutné upozornit, že svarový kov není deformačně zpevněný a tudíž je potřebné využít substitučního zpevnění Ni (až 2,5 hm. %), Cr (až 1,5 hm. %), Mo (až 0,6 hm. %) a mikrolegování (V, Nb).

7.5 Svařování ocelí pro kryogenní (mrazové) teploty

Pro nízké teploty jsou doporučovány:

- nízkouhlíkové oceli (ku př. 11503.1, 11419.1) do teploty: -50 °C,
- 3 hm.%Ni (16320.3) do -120 °C, -9 hm. %Ni (17501.9) do -120 °C,
- austenitické oceli (17242.4) do -190 °C.

Oceli musí být jemnozrnné a musí mít nižší přechodovou teplotu než je pracovní teplota svařované konstrukce.

Oceli feritické báze pro nízké teploty se svařují odpovídajícími přídavnými materiály stejné báze a stejných vlastností jako má základní materiál. Snížený obsah uhlíku ve svarovém kovu se nahrazuje niklem. Oceli s niklem se svařují s předehřevem na teploty 100 až 150 °C a po svařování se spoj popouští za teplot 520 až 540 °C.

Oceli austenitické báze se svařují bez předehřevu a bez tepelného zpracování po svařování austenitickými elektrodami. Austenitické elektrody je možné použít i pro svařování feritických ocelí. Osvědčily se elektrody 18Cr8Ni se 7 hm. % Mn (tzv. přechodové elektrody).

7.6 Svařování žárupevných ocelí

Žárupevné oceli jsou určeny pro práci za vyšších (a vysokých) teplot v t.zv. creepové oblasti (oblast tečení). Oceli musí vzdorovat tečení za provozních teplot a musí mít vyhovující hodnotu meze pevnosti při tečení po dobu 10^5 až $2 \cdot 10^5$ hodin.

Žárupevné oceli lze rozdělit na:

uhlíkové tř. 11 a 12 (do 0,2 hm. % C) – max. do 480 °C; **nízkolegované** tř. 15 (Cr, Mo, V) – max. do 580 °C; **martenzitické** tř. 17 (13 hm. % Cr, Mo, V) – max. 620 °C; **austenitické** tř. 17 (18Cr8Ni, Mo) – max. do 650 °C, **austenitické vytvrditelné** tř. 17 – max. do teploty 750 °C.

Nízkolegované žárupevné oceli se svařují přídatnými materiály a postupem, který zaručí ve svarovém spoji co nejnižší snížení žárupevnosti ve srovnání se základním materiálem (obvykle o cca 20 % nižší). Ve většině případů svařujeme přídatnými materiály stejné báze jako má základní materiál. Oceli ČSN 415128 (CrMoV) se svařují s předehřevem 250 °C, s dohřevem na teplotě předehřevu 30 minut, s ochlazením na 150 °C, s následujícím ohřevem na teplotu o 30 °C nižší než byla popouštěcí teplota základního materiálu.

Žárupevné oceli 13 % Cr se svařují s předehřevem 200 až 300 °C, s dohřevem na teplotě předehřevu 30 minut, s mezi ochlazením na 150 °C (30 minut), s následným tepelným zpracováním za teploty o 50 °C nižší než popouštěcí teplota základního materiálu. Elektrody jsou stejné báze jako je tomu u svařované žárupevné oceli. Žárupevné austenitické oceli se svařují bez předehřevu elektrodami shodného složení.

7.7 Svařování vysokolegovaných korozivzdorných a žárupevných ocelí

Chromové – martenzitické oceli (13 hm. % Cr) jsou korozivzdorné, samokalitelné oceli, u kterých vzniká martenzit za teplot 200 až 300 °C. Svařují se s předehřevem na teploty 200 až 300 °C, s dohřevem a s mezi ochlazením na teplotu těsně pod M_f (cca 100 °C) s následným popouštěním za teplot 720 až 750 °C. Používají se přídatné materiály shodného složení jako má svařovaný materiál.

Chromové oceli feritické (25 hm. % Cr) a poloferitické jsou nekalitelné, protože mají strukturu, která krystalizovala z taveniny (ferit delta) a je strukturně stálá za všech teplot. Mají malou houževnatost a jsou křehké v důsledku zhrubnutí a zkřehnutí (precipitací karbidů a nitridů na hranicích zrn) feritu delta. Feritické oceli se svařují z důvodu malé plasticity s předehřevem 150 °C. Poloferitické oceli obsahují částečně austenit. Oceli se svařují s předehřevem 150 °C a po svařování se žíhají (popouštějí) na snížení vnitřních napětí. Svařují se přídatnými materiály shodného složení, případně austenitickými materiály. V případech pracuje-li svarový spoj v oblasti teplot 400 °C lze použít rovněž austenitické svarové kovy.

Chromniklové (CrNi) a chromniklomolybdenové (CrNiMo) austenitické oceli jsou nekalitelné, paramagnetické (téměř nemagnetické) oceli. Hlavními legujícími prvky jsou chrom (16 až 25 hm. %), nikl (8 až 20 hm. %) a případně molybden (do 6 hm. %). Jejich charakteristickou vlastností je odolnost proti korozi, velká houževnatost a tažnost i při vysokých teplotách (až 1200 °C).

Austenitické oceli lze rozdělit na:

- **nízkouhlíkové** - s obsahem uhlíku max. 0,03 hm. % (rozpuštěné množství v austenitu) – X2CrNi19-11,
- **nestabilizované** - X5CrNi18-10 – korozivzdorné do teploty 400 °C,
- **stabilizované** – s přísadami stabilizačních prvků Ti, Nb, Ta, které spolu s uhlíkem tvoří přednostně (před chromem) stabilní karbidy TiC, NbC, TaC a zabraňují tak tvorbě karbidů chromu $Cr_{23}C_6$ po hranicích zrn a tím předcházejí vzniku mezikrystalové korozi. Ocel vzdoruje teplotě 400 °C a vyšším teplotám. Obsah prvků se řídí podle atomové hmotnosti prvků tvořících karbidy TiC, NbC (Ti = 5 x C, Nb = 10 x C).

Austenitické oceli se svařují bez předehřevu přídatnými materiály shodné báze.

Duplexní oceli (CrNi) mají dvojfázovou strukturu skládající se z austenitu a feritu delta. Svařují se bez předehřevu přídatnými materiály shodné báze.

8. ÚVOD DO KOROZE A OPOTŘEBENÍ

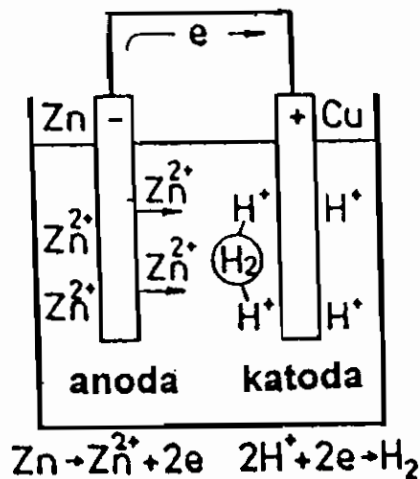
Podle charakteru korozních dějů lze korozi rozdělit na chemickou a elektrochemickou.

8.1 Chemická koroze

Chemická koroze je porušování kovových materiálů (svarových spojů) vlivem chemického působení vnějšího prostředí. Představitelem chemické koroze je oxidace s tvorbou oxidů. Za vysokých teplot oxidačně působí sloučeniny kyslíku, které se absorbují na povrchu za současného rozkladu na atomy. Atomy kyslíku se sloučí s atomy kovu na oxidy. Pokud oxidy dokonale lnou k povrchu (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , SiO_2) a vytvářejí nerozpustnou vrstvu potom brání další oxidaci.

8.2 Elektrochemická koroze

Zahrnuje případy koroze při styku kovu s elektrolytem, tj. s roztoky kyselin, zásad a solí. Podobně jako v galvanickém článku probíhá elektrochemická koroze anodovou a katodovou reakcí. Anodová reakce odpovídá oxidaci kovu, tj. korozi, při které přecházejí z anody ionty kovu do elektrolytu, kdežto v kovu zůstávají elektrony. Anodovou reakci lze zbrzdit (a tím i korozi) polarizací. Katodová reakce spotřebovává elektrony a to buď vybíjením iontů vodíku (depolarizace vodíková) nebo redukcí kyslíku rozpuštěného v elektrolytu (depolarizace kyslíková). Schéma dějů v galvanickém článku je na obr. 8.1.

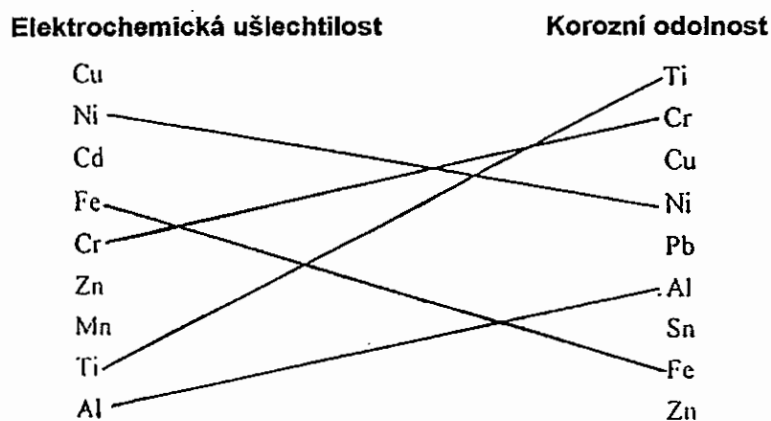


Obr. 8.1 Schéma dějů v galvanickém článku

Redoxový potenciál vyjadřuje ustavení rovnováhy mezi ionty kovu a elektrony v případě ponoření elektrody do elektrolytu, která se ustaví při rovnosti iontů kovu a elektronů (viz obr. 8.1). Rovnováze odpovídá rovnovážný potenciál E_r (Redoxový potenciál), který je závislý na standardním potenciálu kovu (E_0) a na aktivitě iontů kovu v roztoku.

Z hlediska odolnosti kovu proti korozi je důležitý potenciál elektrody, který je závislý především na standardním potenciálu, na množství převedených iontů z kovu do roztoku (elektrolytu), na koncentraci iontů v elektrolytu a na teplotě. Standardní potenciál (potenciál

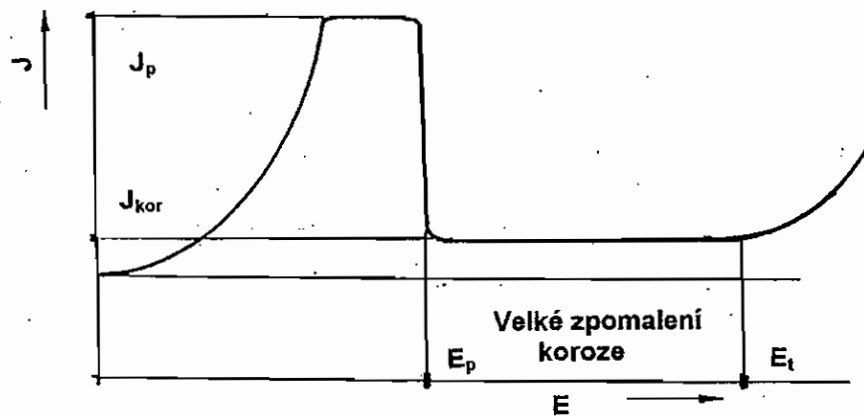
proti standardnímu potenciálu vodíkové elektrody) charakterizuje chemickou ušlechtilost čistého kovu (ušlechtilé kovy mají E_0 kladné, neušlechtilé záporné). Je nutné upozornit na skutečnost, že i když ku př. chrom má standardní potenciál $-0,56$ a je tudíž málo ušlechtilý, vzdoruje korozi velmi intenzivně tehdy, proběhla-li jeho pasivace, tj. po vytvoření oxidu Cr_2O_3 na jeho povrchu, ku př. provzdušňováním. Obdobně je tomu u hliníku, u kterého se na povrchu tvoří velmi odolná vrstvička Al_2O_3 . Provzdušňováním lze získat reálný stav kovu, tj. korozní potenciál, podle kterého lze posoudit korozní odolnost kovového materiálu v daném prostředí. Srovnání elektrochemické ušlechtilosti a korozní odolnosti kovů je na obr. 8.2.



Obr. 8.2 Srovnání elektrochemické ušlechtilosti a korozní odolnosti kovů (elektrochemické potenciály byly stanoveny proti vodíkové elektrodě, korozní potenciály v provzdušněném roztoku chloridu sodného)

8.3 Pasivita kovů

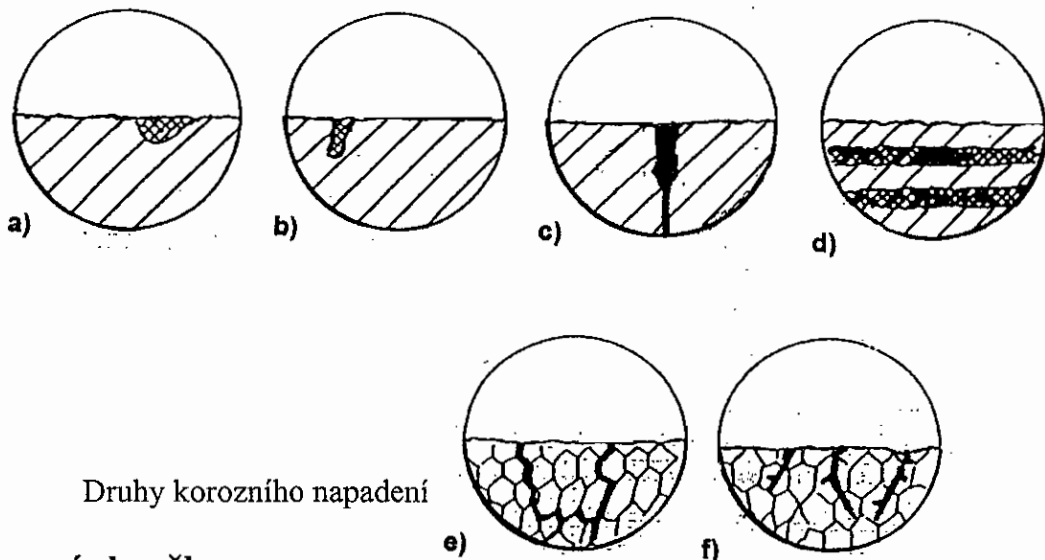
Pasivita kovů je z hlediska ochrany povrchu materiálů výhodná. Vede ke zpomalení případně k úplnému zastavení korozního děje. Při přechodu kovu do pasivního stavu má rozhodující úlohu pasivační potenciál. Průběh potenciostatické křivky anodického děje při přechodu kovu z oblasti koroze v aktivním stavu do pasivního stavu je na obr. 8.3, ze kterého je dobře patrná oblast velkého zpomalení koroze (mezi pasivním a transpasivním potenciálem).



Obr. 8.3 Polarizační křivka kovu přecházejícího do pasivního (E_p) a transpasivního stavu (E_t)
 I_p je kritický proud, I_{kor} je korozní proud

8.4 Druhy korozního napadení

V podstatě lze korozní napadení rozdělit na důlkovou korozi (obr. 8.4a), bodovou korozi (8.4b), stěrbinovou korozi (8.4c), selektivní korozi (obr. 8.4d), mezikrystalovou korozi (obr. 8.4e) a transkrystalovou korozi (obr. 8.4f). Druhem mezikrystalové koroze je nožová koroze, která se vyskytuje u nestabilizovaných CrNi austenitických ocelí ve svařováním ovlivněných pásmech na teplotu 400 °C a dále ponechaných v korozivním činidlu.



Obr. 8.4 Druhy korozního napadení

8.5 Korozní zkoušky

Zkoušky laboratorní používají zkušební vzorky definovaných rozměrů a tvarů, které se podrobují účinku určitého korozního prostředí. Jsou to zkoušky, které modelují po určitou dobu působení rozhodující činitele korozního prostředí. Nejčastěji se sledují změny hmotnosti, změny povrchu a rozměrové změny (mm.rok^{-1}). Zkoušky dávají poměrně spolehlivé výsledky. Zkoušky jsou obvykle dlouhodobé (měsíce), což umožňuje spolehlivě

usuzovat na charakter chování kovu i na návržení a vyzkoušení nejvhodnější povrchové ochrany.

Zkoušky reálných součástí v provozních podmínkách jsou doplňkem laboratorních zkoušek za skutečných provozních podmínek.

8.6 Ochrana materiálu proti korozi

Povrchová úprava dává kovovému materiálu kvalitativně nové vlastnosti, odlišné od vlastností základního materiálu. Z hlediska charakteru povrchové úpravy lze aplikovat:

- a) úpravu korozního prostředí odstraněním složky způsobující korozi,
- b) elektrochemickou ochranu kovového povrchu,
- c) volbu vhodného konstrukčního materiálu (13 hm. % Cr),
- d) tvorbou chemických kovových nebo nekovových ochranných povlaků na základním materiálu s kvalitativně odlišnými protikorozními vlastnostmi.

Všeobecné zásady korozních zkoušek jsou uvedeny v ČSN ISO 11845 Koroze kovů a slitin.

8.7 Opotřebení

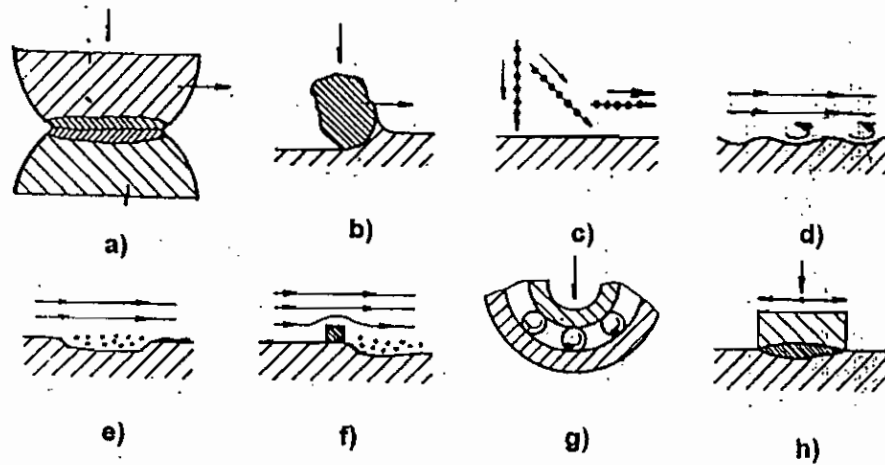
Opotřebení je složitý děj, ke kterému dochází při vzájemném styku a relativním pohybu těles. Projevuje se odstraňováním částic hmoty z povrchu materiálu mechanickým účinkem, který je doprovázen jevy fyzikálními, chemickými a elektrickými. Opotřebení se hodnotí jako komplexní jev především porovnávacími (komparačními) tribologickými zkouškami.

Namáhání v rámci procesu opotřebení se projevuje:

- a) mikroplastickou deformací způsobenou zatlačováním tvrdých částic do měkčího povrchu druhého materiálu a dále únavou povrchových vrstev při opakovaném dynamickém namáhání. Oba jevy vedou po určité době ke vzniku poruch (trhliny, vylamování částic).
- b) vznikem oxidů za současného zvýšení teploty v místě styku materiálů, což se dále projeví změnou struktury a termodynamickou aktivitou povrchových vrstev materiálu.

Podle vnějšího projevu a podmínek vzniku opotřebení lze rozdělit opotřebení na adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. Jednotlivé typy opotřebení jsou znázorněny na obr. 8.5.

Adhezivní opotřebení -	nastává při klouzavém pohybu vytrháváním částic z jednoho povrchu materiálu a přenášením částic na druhý materiál. Opotřebení vzdorují rychlořezné oceli a návarové tvrdokovy.
Erozivní opotřebení -	je rozrušování materiálu stykem s tuhými částicemi unášenými proudem média (voda, plyn a další). Opotřebení vzdorují oceli a návarové kovy na bázi 13 hm. % Cr s 0,6 hm. % C.
Kavitační opotřebení -	způsobují dynamické účinky kapaliny vyvolané vznikem a zánikem bublin vyplněných sytou párou v místech, ve kterých náhle klesne tlak kapaliny pod tlak syté páry a následně stoupne nad tlak syté páry. Tento druh opotřebení se významně projevuje u vodních turbin a čerpadel. Opotřebení vzdorují oceli a svarové kovy s obsahem 13 hm. % Cr (Ni) s nízkým obsahem uhlíku.



Obr. 8.5 Druhy poškození materiálů aktivním opotřebením:
 a) adhezivním, b) abrazivním, c, d) erozivním, e, f) kavitačním, g) únavovým, h) vibračním

- Únavové opotřebenění -** se projevuje především při valivém tření v převodových soukolích a valivých ložiskách. Únavovému opotřebenění vzdorují oceli a svarové kovy s obsahem 2,5 hm. % NiCrMo s 0,2 C.
- Vibrační opotřebenění -** vzniká v důsledku vzájemného kmitavého pohybu o různé amplitudě, frekvenci a proměnlivém zatížení částí, které jsou ve vzájemném styku. Opotřebenění vzdorují oteruvzdorné vysokopevné oceli a svarové kovy na bázi 2,5 hm. % NiCrMo s 0,2 C.

8.8 Zkoušky opotřebenění

Zkoušky opotřebenění se uskutečňují na speciálních zkušebních zařízeních, u kterých se základní způsob namáhání simuluje vhodnou úpravou zkušebních podmínek a tvarem zkušebního tělesa (konstrukčního prvku – tribologické zkoušky). Stanovení odolnosti materiálů proti opotřebenění uvádí ČSN 015082 až 015088 – Stanovení odolnosti materiálů proti opotřebenění.

9. OCHRANNÉ VRSTVY

9.1 Plátování a postup při plátování

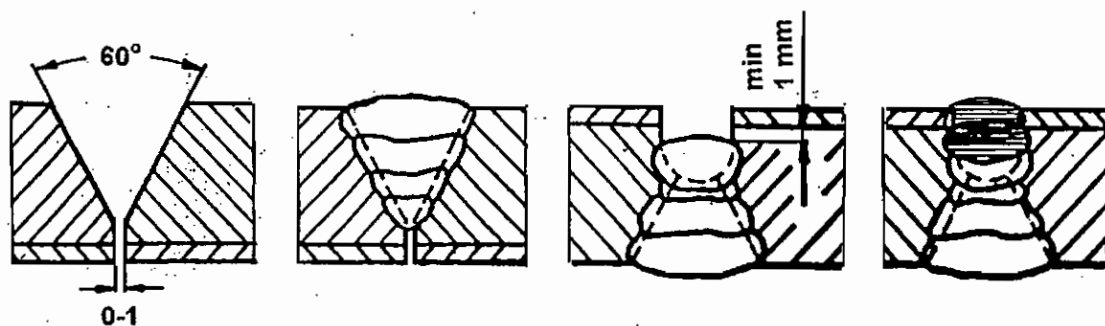
Nosné plochy ocelových plechů nebo trubek bývají jednostranně plátovány korozivzdornými austenitickými nebo feritickými ocelmi. Větší tloušťku tvoří „nosná“ pevnostní vrstva z levné nízkouhlíkové oceli o tloušťce 8 až 40 mm, zbývající část celkové tloušťky tvoří cenově náročnější austenitická (nebo feritická) ocel s tím, že tloušťka korozivzdorné oceli je 2 až 4 mm. Dokonalé difúzní spojení obou vrstev v celé styčné ploše se dosáhne tlakovým metalurgickým svařením při válcování za tepla v hutích vzájemným rozválcováním dvou na sebe položených brám. Další možnost plátování plechů je plátování výbuchem. Z plátovaných plechů se vyrábějí svařované tlakové nádoby především pro chemický průmysl.

9.2 Navařování

Navařování je z hlediska tvorby ochranné vrstvy velice operativní způsob výroby. Na základní „nosný“ materiál z nízkouhlíkové nebo nízkoлегované oceli se navařuje elektrickým obloukem ručním svařováním obalenými elektrodami, způsobem MIG drátem, nebo pod tavidlem páskou (drátem) ochranný materiál. Osvědčila se následující technologie **navařování**: První vrstva vysokolegovaným svarovým kovem o složení 25 hm. % Cr, 13 hm. % Ni (z důvodu možného zředění svarového kovu), druhá a další vrstvy o složení 18 hm. % Cr, 10 hm. % Ni. Lze tak dosáhnout vysokoodolných ochranných vrstev proti korozi s možností použití do teplot 350 až 400 °C. Postup byl využit při navařování tlakových nádob jaderných reaktorů. Předehřev při navařování se řídí teplotou předehřevu „nosného“ materiálu a nejčastěji se pohybuje okolo 150 °C.

9.3 Postup svařování plátovaných a navařovaných materiálů

Svařování plátovaných a navařovaných materiálů musí být uskutečněno za respektování podmínek zachování povrchové korozní odolnosti svarového spoje. Osvědčený postup je uveden na obr. 9.1 a je obdobný jako při navařování s tím, že „nosný“ svar svařujeme v případě plechů menší tloušťky (do 12 mm) přechodovou austenitickou elektrodou (18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni, 7 hm. % Mn). Při svařování větší tloušťky se svaří nejdříve „nosný“ svar elektrodou shodné báze jako má „nosný“ základní materiál a poté, po dokonalém vybroušení kořenu svaru se svaří polštář elektrodou Cr25Ni13 a krycí vrstva elektrodou Cr18Ni10. „Nosný“ svar se svařuje s teplotou předehřevu odpovídající základnímu materiálu.



Obr. 9.1 Postup svařování plátovaných a navařovaných ocelí

9.4 Žárové nástřiky – metalizace

Žárové nástřiky - metalizace - se uskutečňují technologií, při které se jemné natavené částice kovu s dostatečnou kinetickou energií nanášejí na připravený (otryskaný) povrch, kde po ztuhnutí vytvoří požadovaný ochranný povlak. Nanášejí se kovové povlaky zvyšující

tvrdost, korozivzdornost, odolnost proti opotřebení případně žáruvzdornost povrchu materiálu.

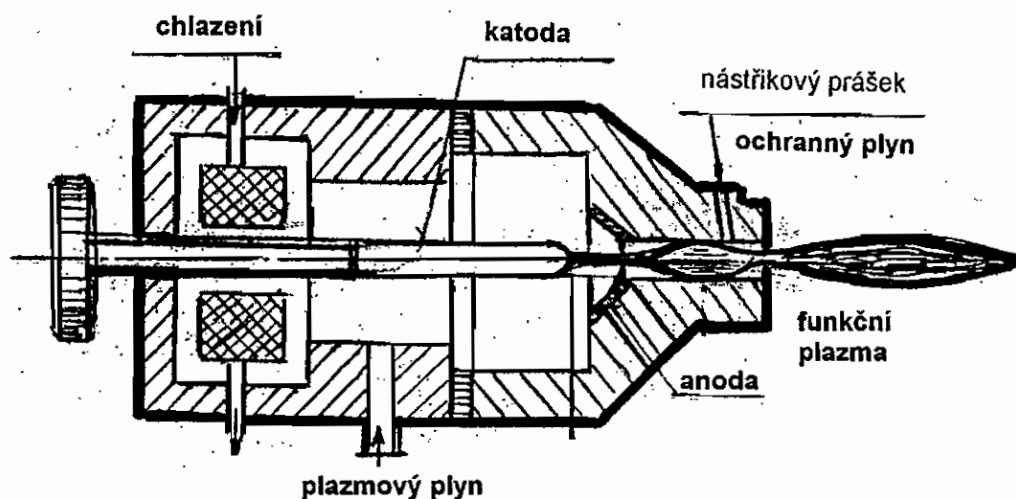
Žárový nástřik vyžaduje velmi pečlivou přípravu povrchu, nejčastěji otryskáním velmi ostrými a tvrdými prášky (korundové prášky) z důvodu dokonalého zakotvení nástřiku s možností lokálního difuzního spojení. Po tryskání se ve většině případů stříkají mezivrstvy z niklových slitin, které zaručují dokonalý adhezně-difuzní spoj se základním materiálem.

Způsoby nanášení žárových nástřiků:

- Nástřik roztaveným kovem je vhodný pro kovy s teplotou tání do 600 °C (Sn, Pb, Zn). Princip spočívá ve stříkání tekutého kovu z elektrické kelímkové pícky stlačeným vzduchem nebo inertními plyny na povrch základního materiálu.
- Nástřik práškovými kovy se používá pro nanášení kovového prášku pistolí kyslíko-acetylenovým plamenem, do kterého je stlačeným vzduchem nebo jiným plynem vháněn prášek.
- Nástřik pistolí s drátem je určen pro nástřikový materiál ve formě drátu (Al, Cu). Způsob natavení se děje kyslíko-acetylenovým plamenem nebo el. obloukem.

9.5 Plazmový nástřik kovů

Při plazmovém nástřiku se práškový nástřikový materiál natavuje v plazmě velmi vysokou teplotou, řádově 10000 K. Plazmou je možné stříkat vysokotavitelné kovy, oxidy kovů a jiné sloučeniny kovů. Lze tak získat vrstvy o vysoké tvrdosti a vzdorující opotřebení. Plazmové tavení prášku se děje v ionizovaném prostředí plazmového plynu. Schéma hořáku pro stříkání plazmou je na obr. 9.2.



Obr. 9.2 Schéma hořáku pro stříkání plazmou

Jako plazmové plyny se používají argon (14000 K), helium, dusík, vodík.

Z kovových materiálů se používají W a Mo prášky. S použitím titanu a dusíku vzniká nástřik nitridu titanu (TiN). Dále jsou stříkány prášky niobu, chromu, hliníku a též niklu (přechodová vrstva). Z oxidických prášků se používají oxidy Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 . Velmi tvrdé jsou nástřiky z prášků karbidů TaC, ZrC, TiC, WC, SiC.

Normy pojednávající o žárovém stříkání: ČSN EN 675, 1395, 582, 1274 – Žárové stříkání.

9.6 Klasické a moderní nátěrové systémy

Klasické nátěrové systémy jsou charakterizovány použitím základních barev s velmi účinnými antikorozními pigmenty (suřík, suboxid olova, zinkochromáty). Použitím nátěrových hmot na bázi pojiv lze dosáhnou tenké, pomalu se vytvrzující nátěry.

Moderní nátěrové hmoty jsou založeny na zinečnatých fosfátech. Jako odolná pojiva se používají akryláty, epoxydy a polyuretany. Použití nátěrů vyžaduje velmi dobrou přípravu tryskáním s možností nanášení poměrně tenkých vrstev.

Nátěrové hmoty pro nátěry ocelových konstrukcí podle pojiv jsou:

- zasychající odpařením rozpouštědla (asfaltové, vinilové, chlorkaučukové, a akrylátové),
- vytvrzované chemicky vzdušným kyslíkem (alkydové, olejové),
- vytvrzené vzdušnou vlhkostí (jednosložkové polyuretany a zinkosilikáty),
- vytvrzené chemickým přípravkem (epoxydy, dvojsložkové polyuretany),
- vytvrzené chemickým teplem (silikony),
- modifikované (vinylalkydové, akryluretanové a epoxydehtové) se zinkovým povrchem.

Z toho moderní nátěrové hmoty, které jsou optimální z hlediska poškození jsou epoxydové a zinkosilikátové, dále polyestery a polyuretany.

Nátěry se provádějí jako vícevrstvé s tím, že z hlediska kontroly je nutné nanášet každou vrstvu v jiném odstínu. Tloušťka jedné vrstvy bývá 80 μm .

Při spojování částí na montáži svařováním je potřebné dbát na dokonalou úpravu svařených míst broušením a stejně jako tomu je u neporušeného nátěru musí být svařené místo opatřeno stejným počtem vrstev barev odpovídajících odstínů.

Postupy nanášení nátěrů musí odpovídat normám a předpisům ČSN EN, jmenovitě ČSN ISO 8501 až 8504 - Příprava povrchů před nanesením nátěrových hmot, ČSN EN ISO 12944 Nátěrové hmoty a dalším normám.

10. LITINY A OCELI NA ODLITKY

10.1 Litiny

Litiny jsou slitiny železa a uhlíku (více než 2 hm. % C) a případně slitinových prvků. Litiny lze rozdělit na:

- bílé (soustava metastabilní rovnováhy železa s ledeburitem)
- grafitické – šedé (soustava stabilní rovnováhy železa s grafitem).

10.2 Bílé litiny

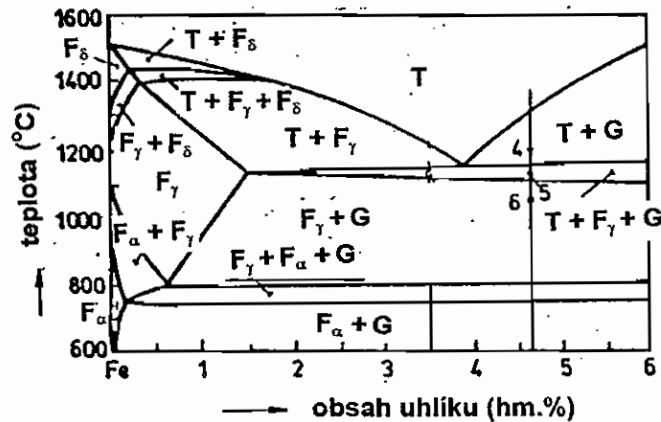
Výsledná struktura podeutektických bílých litin (viz diagram Fe-Fe₃C) obsahuje perlit a ledeburit. Eutektické bílé litiny mají ledeburitickou strukturu. Nadeutektické bílé litiny mají

strukturu tvořenou ledeburitem a primárním cementitem. Bílé litiny jsou velmi křehké a vzdorují opotřebení.

Bílé litiny jsou výchozím materiálem při výrobě **temperované litiny s bílým lomem** (1000 °C – oduhličující prostředí – struktura se skládá po ochlazení z feritu se zbytky sferoidizovaného grafitu) a s tmavým lomem (1000 °C – neutrální prostředí – rozpad bílé litiny a po pomalém ochlazením se struktura skládá z feritu a grafitu). Temperované litiny s lomem bílým lze svařit nízkouhlíkovými feritickými nebo austenitickými elektrodami, svarový spoj však má nízké mechanické hodnoty. Temperované litiny se svažují obdobně jako tvárné litiny.

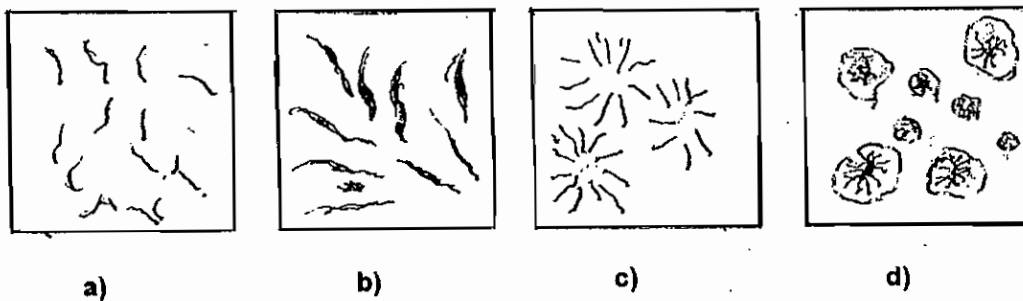
10.3 Grafitické – šedé litiny

Grafitické – šedé litiny jsou slitiny železa s 2,8 – 3,6 hm. % C a se 2 hm. % Si. Zjednodušený rovnovážný kvazistacionární diagram soustavy Fe–C–Si (2 hm. % Si) je na obr. 10.1, ze kterého je zřejmé, že grafitická - šedá litina má strukturu složenou z feritu a grafitu.



Obr 10.1 Rovnovážný diagram soustavy Fe–C–Si (2 hm.% Si)

Základním kritériem pro rozdělení grafitických – šedých litin je tvar grafitu, který může být lupínkový, červíčkovitý, vločkovitý, zrnitý, jak je znázorněno na obr. 10.2.



Obr. 10.2 Tvar grafitu v grafitických – šedých litinách
a) lupínkový, b) červíčkovitý, c) vločkovitý, d) zrnitý

10.4 Tvárná litina

Tvárná litina se vyznačuje strukturou feritu (perlitu) se zrnitým grafitem. Vyrábí se po natažení grafitické – šedé litiny v autoklávech legováním hořčíkem (Mg) a vápníkem (Ca). Hodnota meze pevnosti se pohybuje od 350 do 600 MPa podle typu mateční fáze (tažnost až 17 %). Obsah S a P je velmi nízký a pohybuje od 0,02 do 0,05 hm. %.

10.5 Legované litiny

Vlastnosti litin lze měnit legujícími prvky jako u oceli. U grafitických – šedých litin se dosahuje vyšších pevnostních hodnot legováním Ni, Cr, Mo, korozivzdornosti a žáruvzdornosti legováním Cr, Ni, Si, Al tím, že se zvyšuje odolnost mateční fáze (feritu).

10.6 Svařování litin

Svařování litin se používá především při opravách vad odlitků ve slévárnách nebo při navařování určitých částí především na odlitky tvárné litiny. Dále se opravují porušené části odlitků. Vysoká ochlazovací rychlost při svařování grafitické - šedé litiny vede z důvodu vysokého obsahu uhlíku (3 hm. %) k tvorbě cementitu, ledeburitu a též vysokouhlíkového martenzitu, což má za následek vzniku vysoké hladiny napjatosti, tvrdosti a tím i vznik trhlin za studena. Proto se grafitické – šedé litiny svařují **za vysokých teplot** předehřevu s cílem vytvořit ve svarovém kovu obdobné podmínky ochlazování, jako při tuhnutí odlitku, nebo se svařují **ultrastudenou metodou** s cílem vytvořit co nejužší pásmo stavení. Zároveň při navařování první vrstvy přítomnost vysokého obsahu uhlíku způsobuje velké množství plynů. Proto se používá odplyňovací návar, který se z poloviny obrousí.

10.7 Způsoby svařování litin

- a) Vyžadují-li se od svarového spoje přibližně shodné vlastnosti jako má nesvařovaný materiál, potom je nutné svařovat plamenem nebo el. obloukem s přídavným materiálem z litiny. Svařuje se s předehřevem 600 až 650 °C, s dohřevem 30 minut a s velmi pomalým řízeným ochlazováním 15 °C.hod⁻¹. Výsledkem svařování je struktura grafitické – šedé litiny feritického charakteru s jemným grafitem.
- b) Jestliže se od svarového kovu nevyžadují stejné vlastnosti jako má základní materiál použije se přídavný materiál, který brání difúzi uhlíku z litiny do svarového kovu, tj. slitiny s niklem (až 96 hm. % Ni) nebo s mědí (50 hm. % Cu, 50 hm. % Fe). Svařuje se s předehřevem 50 °C, s interpassem 80 °C (navarování za „studena“). Pro svařování lze s úspěchem použít metodu TIG, MIG, svařování trubičkovým drátem a svařování ruční bazickými elektrodami.
- c) Pájení plamenem – pájí se plamenem pájkami na bázi mědi a niklu s tavidlem typu borax. Teploty předehřevu se pohybují podle typu pájek od 150 do 450 °C.

10.8 Svařování odlitků z ocelí v litém stavu

Odlitky je potřebné před svařováním tepelně zpracovat z důvodu vyrovnání rozdílů v chemickém složení překrytizačním homogenizačním žiháním za teploty 1200 °C. Po homogenizačním žihání následuje normalizační žihání s následným žiháním na snížení vnitřních pnutí za teploty 620 až 650 °C. Oceli v litém stavu se svařují v podstatě jako oceli v tvářeném stavu stejného chemického složení podle následujících technologických postupů:

- a) **Nízkouhlíkové lité oceli** (do 0,22 hm. % C se svařují s předehřevem podle tloušťky stěny, nejlépe za teplot předehřevu 100 až 150 °C. Po svařování následuje žíhání na snížení pnutí za teploty 620 až 650 °C.
- b) **Nízkolegované lité oceli** se svařují s předehřevem na teplotu 150 až 200 °C, s dohřevem. Dále se ohřívají na popouštěcí teplotu 30 až 50 °C pod popouštěcí teplotu odlitku před svařováním, případně se dále meziochladí na 150 – 100 °C s následujícím ohřevem na teplotu 650 °C (žíhání na snížení pnutí).
- c) **Martenzitické lité oceli** 13 hm. % Cr se svařují s předehřevem 200 až 300 °C s dohřevem na teplotě 200 °C, s následujícím popouštěním za teploty 50 °C pod původní popouštěcí teplotu odlitku.
- d) **Austenitické lité oceli** (18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni) v litém stavu se svařují po rozpouštěcím žíhání bez předehřevu, bez dalšího tepelného zpracování po svařování.

Pro svařování se používají elektrody a dráty shodného chemického složení se základním materiálem (s nižším obsahem uhlíku) s bazickým obalem (s nízkým obsahem vodíku), obdobně jako je tomu při svařování ocelí ve tvářeném stavu.

11. NEŽELEZNÉ KOVY A JEJICH SLITINY

11.1 Měď (Cu) a její slitiny

Měď má kubickou, plošně středěnou mřížku, teplotu tání 1083 °C, měrnou hmotnost 9,80 kg.dm⁻³ a koeficient tepelné roztažnosti 16,42.10⁻⁶.K⁻¹. V litém stavu má měď mez pevnosti až 160 MPa, v tvářeném stavu za tepla až 210 MPa. Měď má velice dobrou plasticitu a deformací za studena je ji možno zpevnit (dislokačně) až na 370 MPa. Na povrchu mědi se tvoří oxid mědi, který zvyšuje odolnost mědi proti oxidaci, reaguje však se sírou.

Hlavními nečistotami v mědi je kyslík, fosfor a železo. Obsah kyslíku je limitován 0,04 hm. %, jinak je za spolupůsobení vodíku nebezpečí vzniku „vodíkové nemoci“.

Tepelné zpracování

Základní tepelné zpracování mědi je rozpouštěcí žíhání za teploty 700 až 740 °C (1 hod.) s ochlazením ve vodě, po kterém má měď vysokou plasticitu a je vhodná pro svařování.

Svařování mědi

Měď je z důvodu její vysoké tepelné vodivosti a vysoké tekutosti možné svařovat s předehřevem na teplotu 200 až 500 °C (v závislosti na tloušťce) s cílem snížení měrného příkonu při svařování. Přednostně se svařuje v poloze do úžlabí především metodou TIG s ochranným plynem Ar (99,5 obj. %). Svařuje se přidavným drátem Cu + 1 % Sn s desoxidacími přísadami Si, Mn, B, stejnosměrným proudem (přímá polarita). Rovněž lze svařovat kyslíko-acetylenovým neutrálním plamenem, ultrazvukem, výbuchem, tlakem za studena, elektronovým paprskem, laserem, plazmovým obloukem a menší průřezy stykové odporově. Lze též úspěšně difuzně pájet.

Tvrdé pájení mědi

Pájí se kyslíko-acetylenovým plamenem (neutrálním), pájkami typu Cu60ZnAg (800 °C) za použití tavidla.

11.2 Bronzy

Bronzy jsou slitiny mědi především s cínem (232 °C). Bronzy jsou nazývány podle hlavního slitinového prvku, např. bronzы cínové, hliníkové, křemíkové, beryliové, olověné, niklové, křemíkové a pod. Svařitelnost bronzů je dána především jejich složením.

Tepelné zpracování bronzů před svařováním je rozpouštěcí žihání za teploty 620 °C s ochlazením ve vodě.

11.3 Mosazi

Mosazi jsou slitiny mědi a zinku (419 °C), nebo vícekomponentní slitiny (Cu – Zn – slitinový kov). Podle struktury se mosazi dělí na:

- jednofázové mosazi bez překrytalizace - do 32 hm. % Zn,
- jednofázové s překrytalizací – 32 až 38 hm. % Zn,
- dvojfázové – nad 38 hm. % Zn.
- Známé jsou též mosazi niklové, manganové a křemíkové.

Tepelné zpracování mosazí před svařováním je rozpouštěcí žihání za teploty 640 °C s ochlazením ve vodě.

11.4 Svařování slitin mědi (bronzů a mosazí)

Bronzy a mosazi lze svařovat kyslíko-acetylenovým plamenem neutrálního až oxidačního charakteru. Přídavné materiály jsou dány chemickým složením svařovaných slitin. Svařování elektrickým obloukem lze uskutečnit metodou TIG, MIG stejnosměrným proudem s přímou polaritou. Při svařování el. obloukem lze použít bazické elektrody na bázi CuSi nebo CuSn.

Hliníkové bronzы se svařují metodou TIG střídavým proudem. Při svařování metodou MIG se svařuje stejnosměrným proudem nebo pulzně nepřímou polaritou.

Všeobecně vytvrditelné slitiny se svařují po rozpouštěcím žihání. Žihací teploty na snížení pnutí se pohybují okolo 300 až 350 °C.

11.5 Hliník (Al) a jeho slitiny

Hliník má malou měrnou hmotnost 2,7 kg.dm⁻³, teplotu tání 658 °C, mřížku kubickou plošně středěnou a koeficient tepelné roztažnosti 24,7.10⁻⁶.K⁻¹. Hliník má velmi dobrou korozní odolnost, která je dána tenkým oxidickým filmem Al₂O₃ (2050 °C) na jeho povrchu. Hodnota meze pevnosti čistého hliníku je 70 MPa a lze zvýšit legováním. Hliníkové slitiny lze rozdělit na:

- Slitiny určené k tváření**
 - nevytvrditelné (přísady nepřekročí rozpustnost v tuhém roztoku). Mají vysokou odolnost proti korozi (Al-Mg-Mn),
 - vytvrditelné (Al - 4 hm. % Cu, Mg-dural).
- Slévárenské slitiny**
 - nevytvrditelné Al - Si (siluminy). Si od 5 do 25 hm. %,
 - vytvrditelné Al - Si - Mn - Cu, Al - Cu.

Tepelné zpracování - hliníku a hliníkových slitin

Tepelné zpracování vytvrditelných slitin hliníku se skládá z rozpouštěcího žhání (homogenizace) za teploty 480 °C a z vytvrzování za teplot 100 až 180 °C, nebo při teplotě okolí (tzv. přirozené vytvrzování). Nevytvrditelné slitiny se pouze homogenizačně žhají.

11.6 Svařování hliníku a hliníkových slitin

Hliník a jeho slitiny lze svařovat všemi způsoby obloukového svařování, el.odporem, elektronovým paprskem, laserem, plazmou, difuzně, ultrazvukem, výbuchem a tlakem za studena. Za určitých předpokladů (odstranění Al_2O_3 tavidlem) lze svařovat i plamenem. Metodou **TIG** lze svařovat hliník a všechny hliníkové slitiny. Svařuje se střídavým proudem, u kterého se využívá jeho čistícího účinku. Princip je dán porušením oxidu Al_2O_3 na povrchu svarové lázně ionty (elektrony) v okamžiku, kdy je na elektrodě plus pól. Průchodem iontů povlakem Al_2O_3 dochází k jeho rozrušování za jeho současné disociace vysokou teplotou a k přechodu Al do tuhého roztoku. Při svařování metodou **MIG** se svařuje stejnosměrným proudem pulzně s nepřímou polaritou. Při svařování TIG a MIG se používá velice čistého Ar, případně směsi Ar + He (50/50).

11.7 Hořčík (Mg) a jeho slitiny

Hořčík má nízkou měrnou hmotnost $1,66 \text{ kg.dm}^3$. S ohledem na hexagonální krystalovou strukturu má v porovnání s hliníkem malou deformační schopnost. Teplota tání hořčíku je 654 °C. Koefficient teplotní roztažnosti je $10 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

Slitiny hořčíku jsou legovány hliníkem, zinkem, thoriem a kovy vzácných zemin. Korozní odolnost hořčíkových slitin je v běžných atmosférách obdobná, jako u hliníkových slitin. Osvědčila se slitina MgAlZn ($\text{Mg}_6\text{Al}_3\text{Zn}$).

11.8 Svařování hořčíku a slitin hořčíku

Hořčík a jeho slitiny je nutné svařovat s předeřevem na teplotu 150 až 300 °C. Svařují se metodou TIG a MIG v ochranné atmosféře Ar. Je nutné zabránit přístupu kyslíku z důvodu možnosti vznícení hořčíku.

Tepelné zpracování – hořčík a jeho slitiny se po svařování tepelně nezpracovávají.

11.9 Nikl (Ni) a slitiny niklu

Nikl je kov s kubickou plošně středěnou mřížkou. Teplota tání je 1453 °C. Koefficient tepelné roztažnosti je $4,14 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Tažnost niklu je vysoká a dosahuje 50 %.

Slitiny niklu jsou materiály, které odolávají korozi (technický nikl a slitiny Ni + Cu), materiály žárupevné a žáruvzdorné (slitiny Ni - Cr, Ni - C - Fe, typu Nimonic 80 hm. % Ni, 20 hm. % Cr, typu Monel 65 hm. % Ni, 35 hm. % Cu), materiály se zvláštními fyzikálními vlastnostmi (Ni - Fe, Ni - Fe - Cu - odpor, magnetičnost, roztažnost aj.). Slitiny niklu využívají substituční (Cr, Al, Co, Cu, Mo, Cu, Mo, Ti, V, W, Fe), precipitační (karbonitridy) a disperzní (Ni_3TiAl) zpevnění.

Tepelné zpracování - nikl a jeho slitiny se tepelně zpracovávají rozpouštěcím žiháním (1030 °C – voda). Vytvrditelné slitiny se vytvrzují za teploty 650 °C.

11.10 Svařování niklu a slitin niklu

Nikl je velmi dobře svařitelný, avšak jeho svařitelnost je závislá na jeho čistotě, jmenovitě na obsahu síry. Při vyšším obsahu síry (více než 0,01 hm. % S) je nebezpečí vzniku nízkotavitelného eutektika (Ni-NiS) s teplotou tání 644 °C ve formě velmi tenké vrstvy (filmu) a to především po **hranicích zrn**, kdy při svařování může dojít k jeho natavení a ke vzniku trhlin za horka.

Nikl a jeho slitiny se svařují bez přehřevu metodou TIG, MIG s ochrannou svaru a kořene argonem (99,9 obj. %). Rovněž lze svařovat všemi moderními způsoby svařování přídatnými materiály shodného složení se základním materiálem.

11.11 Titan (Ti) a slitiny titanu

Základ titanu tvoří šesterečná mřížka. Titan má bílou barvu, měrnou hmotnost 4,5 kg.dm⁻³, a teplotu tání 1668 °C. Tažnost titanu se pohybuje okolo 20 %. Na degradaci vlastností titanu mají rozhodující vliv nečistoty, jmenovitě kyslík, dusík, vodík. Titan má velkou odolnost proti korozi s tím, že se na povrchu vytvářejí pasivační vrstvy (oxidy).

Slitiny titanu se vyrábějí jako jednofázové s tím, že jsou legovány hliníkem, nebo jako dvojfázové s tím, že jsou legovány vanadem, molybdenem, tantalem a niobem.

Tepelné zpracování. Základní tepelné zpracování je rozpouštěcí žihání (950 °C), žihání na snížení vnitřních pnutí (600 °C) a případně rekrystalizační žihání (450 °C).

11.12 Svařování titanu a slitin titanu

Titan a jeho slitiny se svařují metodou TIG a MIG s ochranou argonu (99,9 hm. % Ar) přídatnými materiály stejného složení. Při svařování je nutné zajistit dokonalou ochranu svarového spoje (i kořene svaru) a jeho okolí. Dále lze svařovat elektronovým paprskem, laserem, ultrazvukem a el. odporem stykově i s odtavením. Svařuje se s teplotou přehřevu 100 až 150 °C. Po svařování se spoje žihají na snížení vnitřních pnutí.

11.13 Tantal (Ta) a slitiny tantalu

Tantal má kubickou tělesně středěnou mřížku. Specifická hmotnost tantalu je 16,6 kg.dm³, teplota tání 2996 °C. Tantal má velmi dobrou odolnost v kyselinách, chloridech i sulfidech.

Představitelé **slitin tantalu** mají složení: 90 hm. % Ta – 10 hm. % W, 90 hm. % Ta – 8 hm. % W – 2 hm. % Hf. Slitiny jsou dále mikrolegovány niobem.

Tepelné zpracování. Tantal a jeho slitiny se žihají na snížení vnitřních pnutí za teploty 680 °C.

11.14 Svařování tantalu a slitin tantalu

Tantal a jeho slitiny se svařují metodou TIG, elektronovým paprskem a laserem. Při TIG svařování se doporučuje předehřev na teplotu 150 až 200 °C a přídavný materiál stejného chemického složení jako má základní materiál. Po svařování se spoje žihají na snížení vnitřních pnutí.

11.15 Zirkon (Zr) a slitiny zirkonu

Zirkon je velmi odolný vůči korozi (ZrO_2). Má měrnou hmotnost $6,5 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ a teplotu tání 1852 °C. Zirkon vzdoruje kyselinám, solím, vodě a roztaveným kovům.

Slitiny zirkonu jsou legovány hliníkem beriliem, cínem a niobem. Nejznámější slitiny zirkonu jsou slitiny typu zirkaloy ($Zr + 2 \text{ hm. } \% \text{ Sn} + 2 \text{ až } 3 \text{ hm. } \% \text{ Nb}$).

Tepelné zpracování. Zirkon a slitiny zirkonu se žihají na snížení vnitřních pnutí za teploty 650°C.

11.16 Svařování zirkonu a slitin zirkonu

Zirkon a jeho slitiny se svařují metodou TIG, MIG, elektronovým paprskem a laserem. Při svařování se doporučuje předehřev na 100 až 150 °C a přídavný materiál shodného složení, jako má základní materiál. Po svařování se spoje tepelně zpracovávají žiháním na snížení vnitřních pnutí.

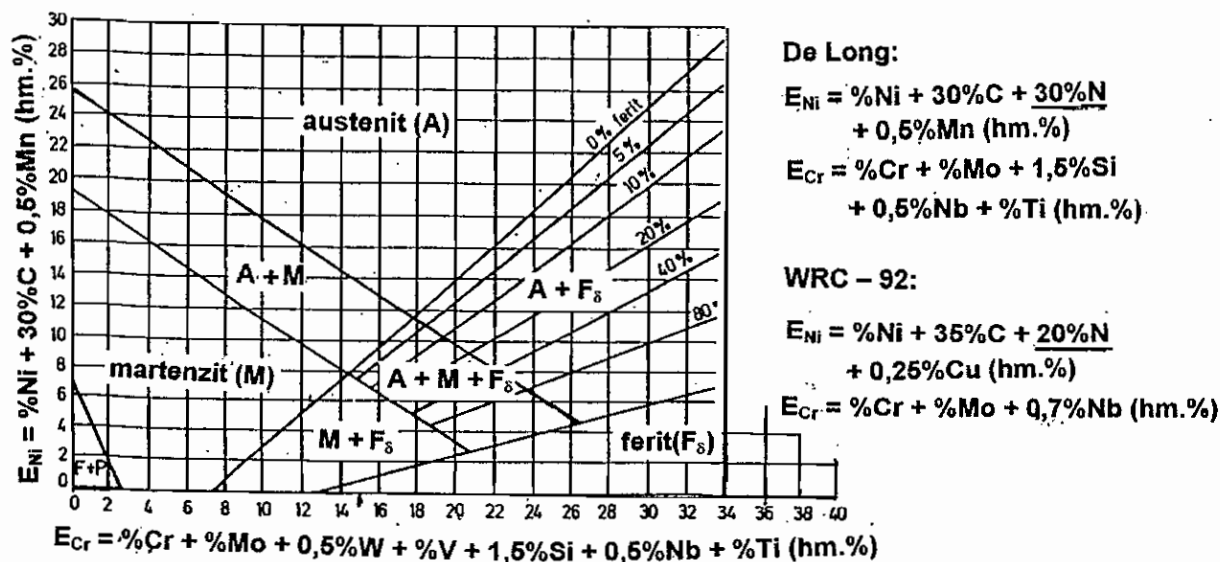
12. SPOJOVÁNÍ RŮZNORODÝCH MATERIÁLŮ (HETEROGENNÍ SVAROVÉ SPOJE)

Svařování různorodých materiálů nestejného chemického složení a rozdílných strukturních bází (A – F) vede vždy k degradaci jednoho nebo obou svařovaných materiálů z důvodu, že v přechodech vzniklá natavená – fuzní – zóna, která má odlišné chemické složení. Při tepelném zpracování a během dlouhodobého provozu za vyšších teplot než 350 °C probíhají mezi základními materiály a svarovým kovem výrazné difúzní pochody především uhlíku, které mají za následek tvorbu oduhličených a nauhličených pásem, snižující spolehlivost, životnost a bezpečnost svarového spoje.

12.1 Použití Schaefflerova diagramu

Postup svařování různorodých materiálů (WPS) je určován svařovanými materiály, provozní teplotou, dobou a namáháním svarového spoje. Strukturní stavy v oceli v závislosti na jejím chemickém složení po rychlém ochlazení z rozpouštěcí teploty (1050 °C) na teplotu 20 °C, lze zjistit ze Schaefflerova diagramu. V přiblížení lze Schaefflerův diagram použít ke stanovení strukturních stavů mezi základními materiály a svarovým kovem. Schaefflerův diagram je uveden na obr. 12.1 a je z něho zřejmé, že v přechodu mezi feritickou ocelí a austenitickým svarovým kovem se vyskytuje směs struktur, jmenovitě martenzitická struktura. Při existenci martenzitu je bezpodmínečně nutné svařovaný předmět předehřívát a předejít tak vzniku martenzitu s vyšším obsahem uhlíku. Předehřevem na teplotu 150 °C dochází k popuštění martenzitu za současné polygonizace dislokací a k eliminaci možnosti

vzniku trhlin indukovaných vodíkem z vlhkosti ovzduší a obalu elektrod s výsledkem snížení stavu napjatosti spoje po svařování.



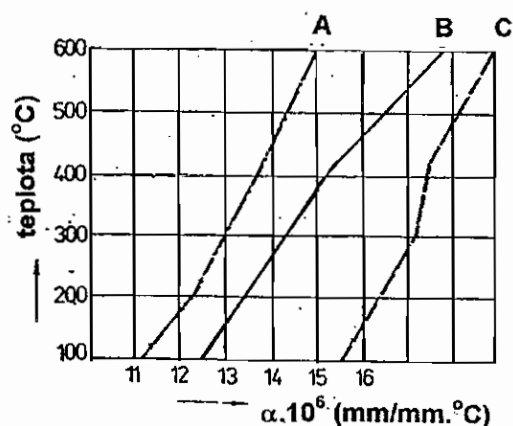
Obr.12.1 Schaefflerův diagram strukturních stavů po rychlém ochlazení oceli z rozpouštěcí teploty na teplotu 20 °C. Diagram je v pravé části doplněn ekvivalenty niklu a chromu počítanými podle DeLonga a podle WCR postupů zohledňujících účinek dusíku

12.2 Volba procesu svařování a účinky promíšení

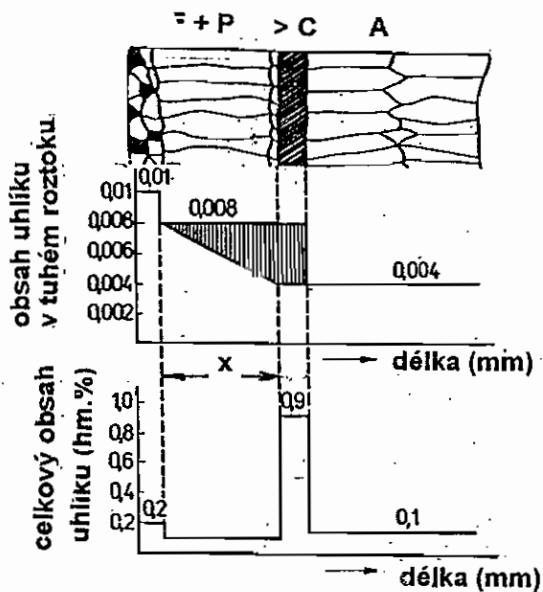
Při svařování různorodých materiálů je důležité z důvodu co nejnižšího nalegování svarového kovu svařovat s minimálním množstvím tepla. Optimální procesy, jako svařování laserem, elektronovým paprskem, svařování třením, mikroplazmou, lze realizovat jen omezeně a tudíž potom je vhodné použít z dostupných způsobů ruční obloukové svařování (111) s malými tepelnými příkony, tj. svařování malými průměry elektrod, nízkými proudy a vyššími rychlostmi svařování. Úspěšně lze využít svařování MAG (135). Velká promísení se dosahují při svařování a navařování pod tavidlem a při elektrostruskovém svařování. Uvedené způsoby svařování lze použít v případě, pracuje-li svarový spoj do teploty 350 °C. Za vyšších teplot dochází k degradaci svarového spoje tvorbou nauhličených a oduhličených pásem se sníženými mechanickými vlastnostmi

12.3 Heterogenní svarové spoje z pohledu složení a struktury

V důsledku rozdílných koeficientů tepelné roztažnosti svarového kovu austenitické báze 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni a feritického základního materiálu (obr. 12.2) dochází při cyklickém tepelném namáhání za teplot vyšších než 350 °C k poruše svarového spoje. K tvorbě trhliny dochází mezi nauhličenou a oduhličenou oblastí spoje, tj. mezi feritickou a austenitickou ocelí. Rozbor svarového spoje dlouhodobě namáhaného za pracovní teploty 550 °C je uveden na obr. 12.3.



Obr. 12.2 Křivky tepelné roztážnosti ocelí rozdílných strukturních bází:
 A – austenitický svarový kov 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni,
 B – Svarový kov 60 hm. % Ni, 18 hm. % Cr,
 C – nízkolegovaná bainitická (feriticko-karbidická) ocel



Obr. 12.3 Rozbor svarového spoje ocelí rozdílných strukturních bází provozovaného za teploty 550 °C (x šířka oduhličené oblasti se sníženými mechanickými vlastnostmi)

Šířka pásma (x), ve kterém proběhla difúze uhlíku z feriticko-karbidické oceli s vyšší aktivitou uhlíku do austenitické oceli s nižší aktivitou uhlíku tj. v gradientu uhlíku v tuhém roztoku obou ocelí

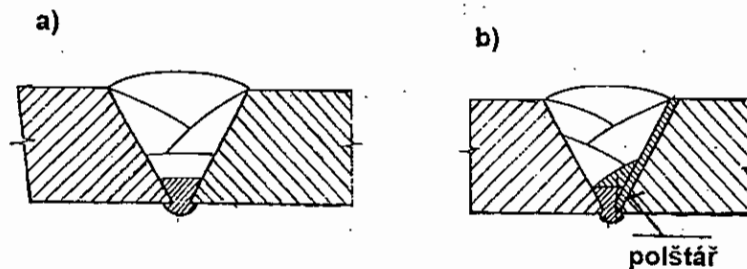
$$x = 2 \sqrt{D_{Cef} \cdot t}, \quad (\text{cm}),$$

kde D_{Cef} je koeficient difuze uhlíku ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),
 t čas (s).

12.4 Problémy při svařování a jejich řešení

Pokud svarový spoj oceli pracuje do 350 °C, svařuje se austenitickými elektrodami, které dávají plastický svarový kov s vysokou houževnatostí. Teoreticky je možné pro svařování použít též elektrod dávajících nízkolegovaný svarový kov s velmi nízkým obsahem uhlíku a vodíku.

Svarový spoj pracující za teplot vyšších než 350 °C se svařuje postupem, který zaručí stabilní svarový spoj, tj. přidavným materiálem, zabráňujícím difuzi uhlíku. Bariéru proti difuzi uhlíku vytvářejí nejlépe elektrody s vyšším obsahem niklu než 60 hm. % Ni, 20 hm. % Cr - obr. 12.4a. Svařují-li se materiály různých strukturních bází o velkých tloušťkách stěn, zhotovuje se svarový spoj tak, že se vysokolegované přidavné materiály 60 až 80 hm. % Ni, 18 hm. % Cr, nebo elektrody s vysokým obsahem niklu (ENiCr20Mo9Nb) použijí pouze pro navaření protidifuzní bariéry (polštáře) ve 2 až 3 vrstvách (min. tloušťky 4 mm) na straně feritického materiálu, kdežto pro výplňový svar se použijí stabilizované austenitické elektrody typu E-08Cr18Ni10Mo2Nb s nízkým obsahem uhlíku (viz obr. 12.b).



Obr. 12.4 Svarové spoje ocelí rozdílných strukturních bází, pracující za teplot vyšších než 350 °C:

- Klasický spoj, svařený vysokoniklovými elektrodami (E-NiCr20Mo9Nb) v celém průřezu.
- Spoj s polštářem navařeným vysokoniklovými elektrodami, s výplňovým svarem ze stabilizovaných austenitických elektrod s nízkým obsahem uhlíku (E-08Cr18Ni10Mo2Nb)

12.5 Typický postup a použití

Postupy svařování různorodých ocelí se zabývá ČSN EN 288-3. V normě jsou konstrukční oceli rozděleny do skupin 1 – 11.

Je-li svarový spoj rozdílných strukturních bází vystaven teplotám do 350 °C a ocel feritické báze má nízký obsah uhlíku (do 0,16 hm. % - jemnozrné nestárnoucí oceli), postačí spoj svařit klasickými austenitickými elektrodami (nejlépe E08Cr18Ni10Mo2Nb nebo přechodovými E08Cr18Ni8Mn7). Svarový spoj se po svařování tepelně nezpracovává, případně se pouze žihá za snížených teplot na snížení vnitřních pnutí.

Technologický předpis svařování spoje pracujícího za teploty **nad 350 °C** musí respektovat důsledek **tepelně aktivovaných dějů**, projevujících se především difúzí uhlíku za vzniku oduhličeného a nauhličeného pásma se změněnými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Potom je nutné doporučit svařovat s využitím **polštářování** přídatnými materiály **s vysokým obsahem niklu** (E-NiCr20Mo9Nb), tvořícími účinnou **bariéru proti difuzi uhlíku** a zabezpečujícími za pracovní teploty koeficient difuze uhlíku svarového spoje D_{Cef} nižší než $10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ což je mezní hodnota strukturní stability během jeho životnosti. Postup je obzvláště důležitý při svařování žárupevné austenitické CrNi nerezavějící oceli s nízkolegovanými CrMoV žárupevnými oceli, případně se žárupevnými feritickými oceli 13 hm. % CrMoV. Zásadně se polštář navařuje na feritickou ocel podle předpisu svařování, který odpovídá feritické oceli. Po navaření polštáře a jeho opracování (obroušení) se spoj mezi polštářem a austenitickou ocelí svařuje bez přehřevu elektrodou austenitické báze a dále se tepelně nezpracovává.

Literatura

- PILOUS, V: Konstruktor a tavné svařování ocelí, SNTL, Praha,1964.
PILOUS, V., VÁCLAV, J.: Nové metalurgické postupy svařování ocelí, SNTL, Praha 1985.
PÍŠEK, F.: Nauka o materiálu I., Nakladatelství ČSAV, Praha,1957.
PLUHAŘ, J.: Nauka o materiálech, SNTL-Alfa, 1989.
PILOUS, V.: Vysokopevné mikrolegované jemnozrnné oceli a jejich svařitelnost, Vodní stavby, a.s. – SDP KOVO Plzeň, 1999.
Kolektiv autorů: Materiály a jejich svařitelnost, Zeross, Ostrava, 1999.
Katalog přídatných materiálů pro svařování ESAB Vamberk a.s.,1996.
Související normy ČSN, ČSN EN a ČSN ISO



ROTUMO

vyrábí

WOLFRAMOVÉ SVAŘOVACÍ ELEKTRODY

Druh elektrody	Chemické složení			Barevné označení
	Oxidy % hm.	Nečistoty % hm.	W % hm.	
-	-	-	-	-
WP	-	max. 0,040	99,9	zelená
WLYC 10	$\text{La}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$ 0,8 ÷ 1,2	max. 0,020	zbytek	zlatá
WT 10	ThO_2 0,8 ÷ 1,2	max. 0,020	zbytek	žlutá
WT 20	ThO_2 1,7 ÷ 2,2	max. 0,020	zbytek	červená

Wolframové svařovací elektrody se dodávají v následujících průměrech :
1,0 – 1,6 – 2,0 – 2,5 – 3,0 – 3,2 – 4,0 – 4,8 – 5,0 – 6,0 – 6,8 – 8,0 mm.

Wolframové svařovací elektrody se dodávají v následujících délkách :
50 – 75 – 150 – 175 mm.

Vyráběné wolframové svařovací elektrody odpovídají ČSN EN 26848.

ROTUMO spol. s r.o.
Televizní 2618, P.O.BOX 83
756 64 Rožnov pod Radhoštěm 3

tel. 00/420/651/602484, 603222
fax. 00/420/651/604443



SVV Praha s.r.o.

● Certifikační činnost

- **Certifikace systémů jakosti prováděné na základě Osvědčení o akreditaci vydaného ČIA:**
ČSN EN ISO 9001/95, ČSN EN ISO 9002/95, ČSN EN 729-2, ČSN EN 729-3,
ČSN EN 729-4, ČSN EN ISO 9001/2000 (od 1. pololetí 2002)
- **Mimo rámec akreditace:**
Velký a malý průkaz způsobilosti podle ČSN 73 2601 Z2 nepodléhá akreditaci ČIA.
Certifikaci mohou provádět certifikační orgány akreditované pro systémy jakosti.
CO SVV Praha tuto podmínku splňuje.
ČSN 73 2601 Z2 čl. 203, ČSN 73 2601 Z2 čl. 204, ČSN 73 2601 Z2 čl. 205
- **Jako koordinační středisko GSI pro ČR a SR zajišťujeme přípravu a organizaci průkazu způsobilosti podle norem:**
DIN 18800, DIN 6700, DIN 4113, DIN 4099

● Školení svářečského personálu

- **Svářečská škola**
Školení svářečů podle ČSN 050705, ČSN 050710, ČSN EN 287 – 1 a 2, DIN EN 287 – 1 a 2, ČSN a DIN EN 1418, evropský svářeč dle EWF a ČSN a DIN EN 287 – 1 a 2.
- **Výuka vyššího svářečského personálu podle směrnic EWF**
Kvalifikační kurzy EWE, EWT, EWS, EWP
- **Odborné semináře a kurzy**
Jakost při svařování – posuzování vad svarových spojů podle ČSN EN 25 817
Přípravný seminář k získání (obnovení) Průkazu způsobilosti podle normy DIN 18 800 a DIN 6 700

● Zkušební organizace SVV Praha č. 19 pro zkoušky svářečů

- **Působí v systému školení a zkoušek svářečů České svářečské společnosti ANB, s akreditací ČIA. Provádí zkoušky svářečů podle:**
ČSN 050705, ČSN 050710 (betonářské výztuže, řetězy)
ČSN EN 287 – 1 a 2, ČSN 1418, evropský svářeč dle EWF (od 2. pololetí 2002)
DIN EN 287 – 1 a 2, DIN EN 1418
při jedné společné zkoušce ČSN a DIN EN 287 – 1,2, ČSN EN 1418

● Zkoušky postupů svařování

- **podle norem:**
EN 288 -3, EN 288-4, EN 288-5, EN 288-6, EN 288-7, EN 288 –8, EN ISO 14555,
DVS 1702, SEP 1390

● Inspekční činnost

- **Kontrola jakosti u výrobců ocelových konstrukcí**
- **Zastupování odběratelů při přejímkách svařovaných ocelových konstrukcí, odlitků a dalších výrobků**

SVV Praha, s.r.o., U Michelského lesa 370, 140 75 Praha 4

tel: 02-444 718 65, 02-414 710 76, fax: 02-444 708 54

e-mail: svv.praha@svv.cz

www.svv.cz

DÍL II

TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ A SVAŘOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Autoři:	Ing. Jiří Barták, CSc.	kapitola 1, 6, 12, 14
	Ing. Vladimír Bělohubý	kapitola 3, 4
	Ing. Vladimír Bubeník	kapitola 2, 5, 11
	Ing. Vladimír Kudělka, PhD.	kapitola 7, 8
	Ing. Pavel Pokorný	kapitola 10, 13
	Ing. Jiří Sika	kapitola 9, 15
Recenzent:	Ing. Jiří Šindelka	



1. ÚVOD DO TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

Úvod

Svařování patří mezi nerozebíratelná spojení, kdy ke spojení dílů dochází v důsledku dodání určitého množství energie do místa styku dílů. Dodávaná energie je buď ve formě tepla (svařování ve stavu tekutém) nebo kinetické energie (svařování ve stavu tuhém), případně jejich kombinace.

Převážná většina svarových spojů se vytváří metalurgickými pochody, kdy dochází k lokálnímu roztavení základního a přídavného materiálu. Dva základní rysy však výrazně odlišují svařování od běžných metalurgických pochodů. Je to především skutečnost, že tavení současně podléhá jak svarové plochy tak přídavný materiál a dále pak se jedná o záležitost lokální (místní), což vyvolává tepelnou nestejnorodost ve svařovaném dílu. Při tavném svařování se jedná o mikrometalurgický proces, při kterém se taví malé množství kovu. Podmínkou úspěchu je krátkodobé a koncentrované dodávání tepelné energie tak, aby se v co největší míře zabránilo šíření tepla v důsledku tepelné vodivosti kovů. Důsledkem tohoto procesu je potom vznik místních strukturálních změn a dále pak vznik vnitřních napětí případně deformací.

1.1 Rozdělení svařování

Svařování rozdělujeme podle způsobu vzniku spojení a dále pak podle stupně mechanizace.

A) podle způsobu

- svařování ve stavu tekutém
- svařování ve stavu tuhém
- ostatní způsoby svařování

B) podle stupně mechanizace

- ruční
- mechanizované
- automatizované
- robotizované

Svařování ve stavu tekutém dále rozdělujeme podle zdroje tepla na:

- svařování plamenem
- svařování elektrickým obloukem (obalenou elektrodou, pod tavidlem, v ochranném plynu)
- svařování elektrickým odporem (bodové, švové, výstupkové, stykové)
- fyzikální způsoby svařování (laserem, elektronovým paprskem, plazmou)

Svařování ve stavu tuhém:

- tlakem za studena
- výbuchem
- třením
- ultrazvukem
- difuzní

Ostatní způsoby svařování:

- aluminotermické
- elektrostruskově
- elektroplynové
- indukční
- přivařování svorníků

1.2. Používané zkratky technologií

Metody svařování jsou definovány v normě ISO 857 a jejich číselné označení pro potřeby zobrazení na výkrese, respektive označení zkoušky svářeče, jsou uvedeny v normě ČSN EN 24063. Vzhledem k tomu, že v zahraniční literatuře případně ve výkresové dokumentaci jsou uváděna ještě i jiná označení, jsou v tabulce 1.1 uvedena některá z nejčastěji používaných označení.

Tabulka 1.1

Název technologie	Označení podle ČSN EN	Označení podle DIN	Označení podle ASME
Ruční obloukové svařování	111	MMA	SMAW
Svařování plamenem	311	G	GW
Svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu	135	MAG	GMAW
Svařování tavící se elektrodou v inertním plynu	131	MIG	SMAW
Svařování netavící se elektrodou v inertním plynu	141	WIG	GTAW

1.3 Základní pojmy

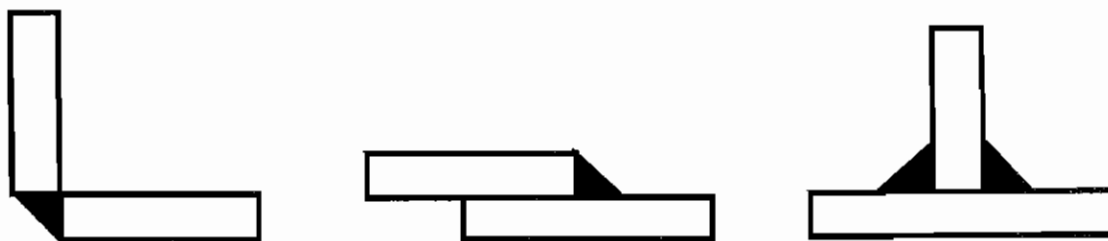
- druhy svarů

Ve svářečské praxi rozeznáváme tyto druhy svarů:

- tupý svar** (obr. 1.1) – může mít tvar I, Y, V U,W respektive $\frac{1}{2}$ V,U,W. U větších tloušťek se mohou používat svary oboustranné. Doporučené rozměry tvarů svarových úkosů jsou uvedeny v normě ČSN EN 29 692.
- koutový svar** (obr. 1.2) – je to svar rohového, přeplátovaného nebo T spoje. Doporučené rozměry koutových svarů uvádí norma ČSN EN 29 692.
- bodový svar** – uplatňuje se zejména při odporové svařování
- lemový svar** (obr. 1.3) – vznikne roztavením olemovaných okrajů slabých plechů. Provádí se převážně bez přídavného materiálu pouhým roztavením.
- děrový svar** (obr. 1.4) – vznikne vyplněním otvoru, vytvořeném v jednom ze svařovaných dílů



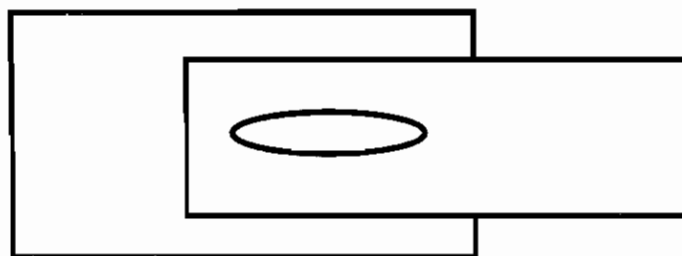
Obr. 1.1.



Obr. 1.2



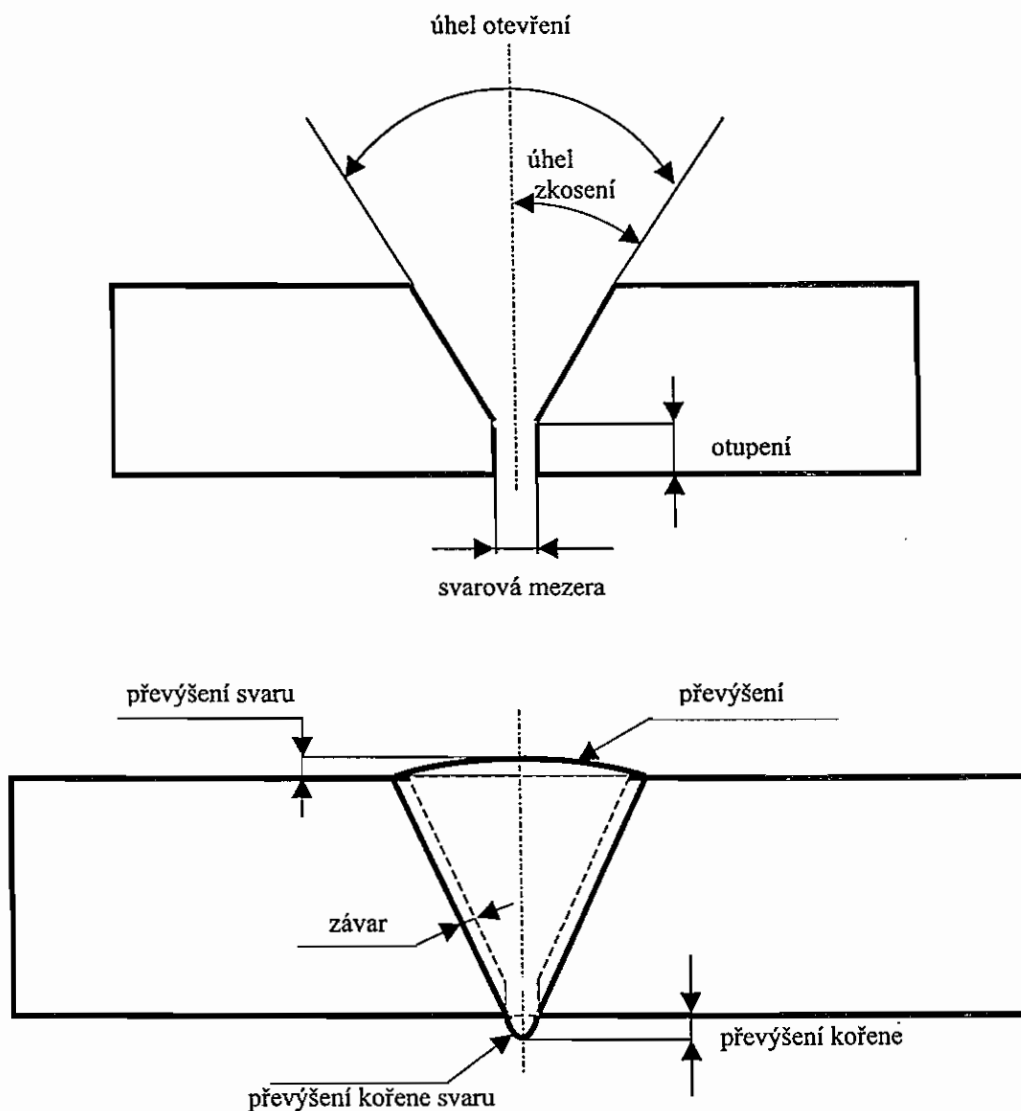
Obr. 1.3



Obr. 1.4

- **názvosloví**

Terminologie svarových spojů a svarů je normalizovaná. Příklad názvosloví pro tupý svar je podle ČSN 05 0000 uveden na obrázku 1.5.



Obr. 1.5

Literatura

- KOVAŘÍK, R., ČERNÝ, F.: Technologie svařování. ZČU, Plzeň 1993.
 MINAŘÍK, V.: Přehled metod svařování. ZEROSS, Ostrava 1998.
 BARTÁK, J.: Učební texty. ŠKODA WELDING, Plzeň 2000.

2. PLAMENOVÉ SVAŘOVÁNÍ

Svařování plamenem patří k nejstarším způsobům svařování. Základy moderního plamenového svařování vytvořili v 19. století R. Hoissan, který vynalezl metodu průmyslové výroby karbidu vápníku a H. Le Chatalier, jenž prozkoumal kyslíko – acetylenový plamen. Největšího rozvoje a průmyslového využití plamenového svařování bylo dosaženo v první polovině dvacátého století. V současné době se plamenové svařování používá v technické praxi v omezeném rozsahu a to u zámečnických a instalatérských prací, na montážích, při opravách a renovacích dílů, při svařování pod vodou a v dalších aplikovaných metodách svařování (plamenové práškové navařování, nástřiky kovů). Dále se využívá kyslíko – acetylenový plamen v při ručním a strojním řezání kyslíkem.

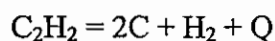
2.1 Svařování

Plamenové svařování je proces, který využívá teplo vzniklé spalováním hořlavého plynu, smíšeného s kyslíkem ve speciálním hořáku. Nejčastěji se jako hořlavý plyn používá acetylen, který ve směsi s kyslíkem, dosahuje při spalování nejvyšší teploty plamene. V omezené míře se používají i jiné hořlavé plyny, jako např. vodík, propan, butan, svítiplyn, zemní plyn.

2.1.1 Technické plyny

Kyslík (O₂) je nehořlavý plyn, bezbarvý a bez zápachu, který ale hoření podporuje. Při plamenovém svařování a řezání kyslíkem musí být použit kyslík o minimální čistotě 99 %. Pro technické účely se kyslík převážně vyrábí destilací ze zkapalněného vzduchu. Přepravuje se v plynné formě ve vysokotlakých lahvích nebo podchlazený v kapalném stavu (odparky).

Acetylen (C₂H₂) je hořlavý plyn, s výrazným zápachem po česneku (ale chemicky vyčištěný / upravený acetylen nezapáchá), který při atmosférickém tlaku a normální teplotě hoří bílým svítivým plamenem. Při jeho spalování dochází k značnému vývinu sazí. Je lehčí než vzduch. Při smíšení obsahu 2,8 až 93 % acetylenu s kyslíkem, vzniká výbušná směs. Acetylen je labilní endotermická sloučenina, s kterou se musí zacházet opatrně, protože za určitých podmínek může dojít k jeho výbušnému rozkladu. Při jeho ohřátí na teploty mezi 300 až 800 °C nastává polymerizace a kondenzace na vyšší uhlovodíky (benzín, benzol a další), která je doprovázena značným vývinem tepla. K vnitřnímu rozkladu acetylenu dochází ohřevem nad 800 °C. Z níže uvedené rozkladové chemické reakce je patrné, že při rozkladu acetylenu dochází k značnému uvolňování tepla **Q**:



Při nízkém tlaku dochází k rozkladu jen v místě tepelného impulsu. Ale při vyšším tlaku způsobuje tepelný impuls rozklad celého uzavřeného objemu acetylenu. Průběh takovéto reakce má explozivní charakter. Příčinou je nárůst teploty až na 2 800 °C a zvyšování tlaku až na 11 násobek původního tlaku. Zrychlujícímu rozkladu acetylenu lze zamezit jen intenzivním chlazením, tak aby probíhající chemická reakce byla jen ve stadiu polymerizace.

Technický acetylen se vyrábí rozkladem karbidu vápenatého ve vodě ve speciálních zařízeních – vyvíječích. Jeho přeprava k místu svařování se provádí přímým odběrem

z dílenského malého vyvíječe, potrubním rozvodem z průmyslového vyvíječe a nebo prostřednictvím speciálně upravené náplně v tlakových lahvích.

Vodík (H_2) je hořlavý plyn bez barvy a zápachu, hořící téměř neviditelným plamenem světle žluté barvy, teplota a intenzita plamene je nižší než u acetylenu. Je netoxický a 15 x lehčí než vzduch. Pro technické účely se převážně vyrábí z vody elektrolýzou nebo rozkladem vodní páry v generátorech. Přepravuje se v plynné formě ve vysokotlakých lahvích nebo podchlazený v kapalném stavu (odparky).

Uplatňuje se převážně při řezání kyslíko – vodíkovým plamenem, z důvodu, že nedochází ke zpětnému šlehnutí, tepelné zatížení hořáků a trysek je menší, při řezání tenkých plechů se dosahuje menších deformací.

Propan (C_3H_8) a butan (C_4H_{10}). Propan je bezbarvý netoxický, ale mírně anestetický hořlavý plyn. Používá se nejčastěji jako směs propanu a butanu (80 % + 20 %) k ohřevu a pájení. Ke svařování se používá výjimečně. Tyto plyny se získávají jako vedlejší produkt při výrobě benzínu. Jsou dvakrát těžší než vzduch. Jejich distribuce se provádí zpravidla v kapalném stavu a to v tlakových lahvích. Při odběru této směsi plynů z tlakové láhve se nejdříve odpařuje propan, který má větší výhřevnost a pak butan. Naplněné láhve s těmito plyny nesmějí být vystaveny tepelnému záření, protože s teplotou roste tlak odpařeného média a kapalná část plynu značně nabývá na objemu. Neřízené změny nárůstu tlaku a objemu mohou způsobit destrukci láhve. Proto je lahev opatřena pojistným ventilem, který musí být při přepravě a skladování v horní poloze.

Propan má sice nízkou mez výbušnosti. Ale v případě, že dochází k jeho většímu úniku, hromadí se v nízko položených místech, kde vzniká jeho koncentrace a tím i reálné nebezpečí výbuchu.

Zemní plyn je tvořen převážně z metanu a jeho složení je závislé na zdroji původu. Jeho přeprava se provádí potrubními rozvody. Používá se jako nahřívací plyn při řezání kyslíkem a k ohřevu materiálů. Obdobné vlastnosti a použití má směs metanu s oxidem uhličitým, která se nazývá Bioplyn. Vytváří se fermentačním procesem z hnoje i jiných živočišných odpadů.

2.1.2 Kyslíko - acetylenový plamen

Hořením hořlavého plynu s kyslíkem vzniká plamen potřebný ke svařování, pájení, ohřevu materiálu a řezání kyslíkem. Směsný poměr obou plynů značně ovlivňuje teplotu plamene. Proto zpravidla používáme takový topný plyn a směsný poměr s kyslíkem, který nám poskytne plamen s nejvyšší teplotou.

Teplotu plamene ovlivňuje:

- primární hoření, při kterém se rozkládá hořlavý plyn na uhlík a vodík (teplota při rozkladu stoupá nebo klesá, v závislosti na entalpii topného plynu),
- v primární fázi hoření, teplota plamene zvyšuje spalování a tím i vývoj tepla, které se projeví dalším růstem teploty,
- proces rozkladu hořlavého plynu odebírá teplo z plamene.

Intenzita plamene je závislá na koncentraci tepla, vzniklého při primárním spalování a na průběhu (rychlosti) spalování.

Hořlavý plyn tvoří se vzduchem výbušnou směs. Výbušnost směsi je závislá na koncentraci hořlavého plynu (dolní a horní hranice výbušnosti).

Při plamenovém svařování se nejvíce používá směs kyslíku s acetylenem. Podle směsného poměru obou plynů a intenzity plamene můžeme plamen označit jako:

- neutrální (poměr $O_2 : C_2H_2 = 1$ až $1,1 : 1$)
- redukční (poměr $O_2 : C_2H_2 < 1$)
- oxidační (poměr $O_2 : C_2H_2 = 1,2 : 1$)
- měkký (výstupní rychlost 70 až 100 m.s^{-1})
- střední (výstupní rychlost 100 až 120 m.s^{-1})
- ostrý (výstupní rychlost 120 m.s^{-1}).

2.1.3 Hořáky pro plamenové svařování

Svařovací hořák je nástroj s kterým se svařuje. V hořáku se směšuje hořlavý plyn s kyslíkem s potřebným přetlakem, který umožní dosáhnout požadovanou výstupní rychlost a tvar plamene, pro zvolený způsob svařování. Konstrukce svařovacího hořáku musí umožnit:

- stejnoměrné promísení kyslíku s hořlavým plynem,
- udržení nastaveného míšícího poměru,
- zajištění stability plamene a ochranu proti zpětnému šlehnutí,
- být odolný proti přehřátí od sálavého tepla plamene a roztavené lázně,
- nastavení vhodného tvaru svařovacího kužele,
- mít malou hmotnost a snadnou ovladatelnost,
- snadnou opravu a údržbu.

Svařovací hořáky rozdělujeme na:

- **Nízkotlaké (injektorové) hořáky** jsou univerzální a nejčastěji používané. Topný plyn lze do hořáku dodávat z lahvi i vyvíječů. Injektor při proudění kyslíku nasává acetylen o nízkém tlaku do směšovací komory, kde se plyny smísí, a směs vytéká otvorem svařovací hubice požadovanou rychlostí. Tyto hořáky jsou citlivé na znečištění a přehřátí hubice a na pokles výstupní rychlosti plynů (je příčinou zpětného šlehnutí plamene). Injektorový hořák se skládá z rukojeti a sady svařovacích nástavců, odstupňovaných podle svařované tloušťky materiálu.
- **Vysokotlaké hořáky** nemají injektor. Kyslík a acetylen vstupují do směšovací komory o přibližně stejném tlaku. U tohoto typu hořáku se vyměňuje pouze jeho špička. Zvláštním typem vysokotlakého hořáku je rovnotlaký hořák, kde kyslík a acetylen se uzavírá společným kohoutem. Tlak obou plynů se srovnává před hořákem prostřednictvím speciálních redukčních ventilů.

Pro účelové potřeby se používají **speciální hořáky**, např. ohřívací hořáky (pro ohřev materiálů), pájecí hořáky (k pájení materiálů), více plamenové hořáky (kombinace pro předehřev a svařování).

Některé závady při práci s hořákem:

Zpětné šlehnutí plamene je nejnebezpečnější jev, který může nastat při chybné manipulaci a nastavení svařovacího hořáku nebo dalšího zařízení. Příčinou může být:

- rychlost hoření směsi je větší než výstupní rychlost plynů z hořáku,
- předehřátá špička hořáku nad zápalnou teplotu směsi (500 až $600 \text{ }^\circ\text{C}$) – způsobeno např. dlouhým svařováním koutového svaru,
- ucpání výstupního otvoru hořáku žhavou částicí kovu a následné zapálení třaskavé směsi.

Zpětné šlehnutí plamene se může projevit dvěma způsoby a to, že plamen vnikne zpět do mísící komory hořáku a zapálí se vzniklá třaskavá směs. Zvýšený tlak zapálené směsi vytlačí velkou rychlostí plyny ústím hubice (špičky) hořáku ven. Průběh děje je provázen zvukovým efektem – výstřelem. Tento jev není nebezpečný. Vzniká při neodborném zapalování hořáku. V druhém případě pronikne zážeh z mísící komory do injektoru. Hoření je doprovázeno pisklavým zvukem. Vzniká nebezpečí, že plamen vnikne do hadic, redukčního ventilu a lahve s plynem. Tento průběh je ale nebezpečný. V obou případech zpětného šlehnutí je třeba okamžitě uzavřít přívody plynů a to nejdříve se musí uzavřít kyslíkový ventil a potom acetylenový ventil. Uzavřením kyslíku zabráníme podpoře dalšího hoření (usazených uhlíkových nečistot na stěnách mísící komory nebo kovu v hořáku).

Pokud nastane zahřívání lahve s plynem, postupujeme podle pokynů uvedených v normě ČSN 05 0610:

- a) V případě, že ohřátí lahve nepřekročí teplotu 50 °C (udrží se na ní ruka), uzavře se lahvový ventil, odpojí se redukční ventil a lahev se co nejrychleji odstraní z pracoviště na volné prostranství a bezprostředně se přikročí k jejímu ochlazení silným proudem vody nebo se ponoří do vody. Toto ochlazení se provádí až do doby dokud její teplota nepoklesne na původní stav i po přerušení ochlazení.
- b) Pokud je lahev ohřátá nad 50 °C (neudržíme na ní ruku), uzavře se lahvový ventil, pracoviště se vyklidí a okamžitě se začne s intenzivním ochlazením vodou z místa chráněného proti účinkům výbuchu. Není-li možno lahvový ventil uzavřít, vypne se v ohrožením prostoru přívod elektrického proudu.
- c) Nastane-li zahřátí lahve v místech, kde nejsou k dispozici chladicí prostředky, je třeba lahev uzavřít (pokud to okolnosti dovolí), prostor vyklidit a vzniklou situaci ohlásit hasičům a policii.

2.1.4 Přídavné svařovací materiály

Pro plamenové svařování se používá přídavný materiál ve tvaru rovného drátu – podle ČSN EN 759 se nazývá tyčinka, která má převážně plný průřez. Pro speciální účely (např. pro navařování, pájení) se dále vyrábějí tyčinky ve formě trubičky, která je uvnitř naplněná tavidlem – „trubičkové dráty“.

Tyčinky pro plamenové svařování se nejčastěji vyrábějí:

- v délce 500 až 1000 mm,
- o průměrech 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0 mm.

Povrch tyčinek musí být bez nečistot a povrchových vad, které mohou nepříznivě ovlivnit technologický proces svařování a vlastnosti svarového kovu. Proto jsou tyčinky od jejich výrobců zabaleny do papírových obalů o hmotnosti cca 10 kg. Jakost svařovací tyčinky je vyznačena raženou značkou nebo barevným označením na jejím konci. Kompletní technické údaje o zabaleném svařovacím materiálu jsou výrobcem uvedeny na přilepeném štítku na povrchu obalu.

Např.: pro svařování plamenem vyrábí a dodává ESAB VAMBERK s.r.o. přídavné materiály ve formě tyčinek s označením

- G 102 - Svařovací materiál je určen pro svařování tenkých plechů, nenáročného potrubí při zámečnicko topenářských pracích.
- G 104 - Svařovací materiál je určen pro svařování ocelového potrubí z jakosti 12 020, 12 021, používaných při výrobě tlakových a energetických zařízení.

2.2 Technika svařování a svarové spoje

Plamenové svařování se v současné době nejčastěji používá do tloušťek cca 4 mm. Větší tloušťky se svařují pouze ojediněle.

2.2.1 Svarový spoj

Pro spojování materiálů plamenovým svařováním se nejčastěji používají svary ve tvaru:

- lemového svaru (ψ do tloušťky cca 2 mm),
- I svaru (do tloušťky cca 2 až 3 mm, výjimečně až do 4 mm),
- V svaru (pro tloušťky cca 4 až 7 mm, výjimečně až do 10 mm),
- koutové svary.

Tvar svarových ploch a ustavení ke svařování je patrné z vyobrazení, uvedeného v normě ČSN EN 29692.

Aby si svařovaný materiál udržel požadovaný tvar, je třeba předem svařované díly sestehovat krátkými stehovými svary ve vzdálenosti cca 25 až 30 násobku svařované tloušťky. Při stehování je nutné zajistit odpovídající velikost kořenové mezery a počítat s tím, že během svařování dochází k rozměrovým deformacím.

2.2.2 Způsoby svařování

Svařování vpřed (původně nazýváno svařování doleva) se vyznačuje tím, že svařovací drát je veden před hořákem ve směru svařování. Je-li svářečem držen hořák v pravé ruce a drát v levé, probíhá svařování zprava doleva. Tento způsob svařování je především vhodný pro svařování tenkých plechů a pro svařování řídké tekutých materiálů (např. litina, lehké kovy, měď, mosaz) s větší tloušťkou stěny. Při svařování dochází k přehřívání materiálu a zvýšenému pnutí a deformacím. Tento způsob svařování lze využívat při svařování I svarů a u V svarů s propichovaným kořenem na tenkostěnných trubkách a u koutových svarů. Též se používá u lemových svarů, které jsou vytvářeny u tenkých plechů o tloušťce do 1 mm. Svařování se provádí natavováním lemů bez přídavného materiálu.

Svařování vzad probíhá tím způsobem, že drát postupuje za hořákem v roztavené lázni kovu a plamen je směřován na tavnou lázeň i na chladnou svar. Tento způsob svařování umožňuje lepší ochranu roztavené lázně i tuhajícího svarového kovu před nepříznivými účinky okolní atmosféry, umožňuje lépe provařit kořen svaru, snížit pnutí a deformace, ale je náročnější na manuální zručnost svářeče. Provedené svary jsou jakostnější. Použití uvedené techniky svařování se upřednostňuje při provádění svarů, kde je požadována jejich vyšší jakost a při zkouškách svářečů.

2.3 Svařovací zařízení a bezpečnost práce

2.3.1 Vyvíječe acetyleny

Vyvíječe acetyleny slouží k výrobě acetyleny, který vzniká při rozkladu karbidu vápenatého ve vodě. Skládá se:

- z vyvíjecí komory,
- zásobníku karbidu,
- pračky plynu,

- plynojemu,
- chemického čističe,
- z regulační, bezpečnostní a uzavírací armatury,
- z hlavní vodní předlohy.

Vyvíječe acetyleny rozdělujeme podle:

- a) provozního tlaku na
 - nízkotlaké (přetlak max. 5 kPa),
 - středotlaké (přetlak max. 35 kPa),
 - vysokotlaké (přetlak max. 150 kPa),
- b) účelu použití na
 - montážní (přenosné nebo pojízdné, s náplní karbidu max. 2 kg),
 - dílenské (stabilní, s náplní karbidu 2 x 2 kg),
 - stabilní velké vyvíječe (pro centrální výroby acetyleny),
- c) principu výroby acetyleny
 - **násypné** - karbid vápenatý padá do vody z násypného koše. Dochází k jeho rozkladu na otočném roštu (sítku). Vzniká acetylen, který probublává vodou a odvádí se k dalšímu zpracování. Souběžně s odběrem acetyleny se přivádí do vyvíječe čistá voda za účelem, aby se zabránilo nasátí vzduchu a jeho smíšením s acetylenem (vznik třaskavé směsi). Zásobník a nasýpací šachta musí být naplněna je čistým acetylenem. Vytvořený vápenný kal se z vyvíječe vypouští prostřednictvím odkalovacího ventilu;
 - **zásuvkové** - karbid je uložený v zásuvce ve spodní části vyvíječe, na který se přivádí voda. Přítok vody se reguluje u vysokotlakého a středotlakého vyvíječe změnou tlaku plynu. U nízkotlakého vyvíječe se provádí regulace prostřednictvím plovoucího zvonu plynojemu. Acetylen se u těchto vyvíječů shromažďuje v horní část komory, z které se odvádí do rozvodu. Zásuvka se plní karbidem pouze do jedné poloviny, protože objem vznikajícího karbidového vápna je dvounásobný;
 - **ponořovací** - karbid je uložen v koši, který je spojen s pohyblivým plynojemem, tzv. vnitřní nádobou. Nádoba s karbidem se ponořuje nebo vytahuje z vody podle množství vyvinutého acetyleny. Dochází tak k automatické regulaci vyvíjeného množství acetyleny;
 - **výtlačné** - náplň karbidu je uložena v mřížkovém koši, který je umístěn v obráceném zvonu, ponořeném do vody. Zvon je spojen přímo s plynojem a nebo ho membránový regulační ventil spojuje s plynovým prostorem nad hladinou vody. Vývoj acetyleny se řídí pode změny tlaku. Při poklesu tlaku voda vniká do zvonu a smáčí karbid. Při zvyšování tlaku dochází k vytlačování vody ze zvonu a tím dochází k zpomalování až k zastavení rozkladu karbidu.

V průběhu výroby acetyleny ve vyvíječi vznikají v surovém plynu nečistoty, které je nutno odstranit (sirovodík, fosforovodík, vodu). Proto je součástí vybavy vyvíječe čistič, který obsahuje čisticí hmotu, jejíž hlavní složkou je dvojchroman draselný nebo sodný. Průchodem surového acetyleny přes tuto náplň, dochází k jeho vyčištění. Odloučená voda se vypouští výpustným ventilem. Pro používání a manipulaci s vyvíječi acetyleny a pro skladování karbidu platí předpisy obsažené v normě ČSN 69 4911.

2.3.2 Tlakové lahve

Tlakové lahve jsou nejčastěji používány k přepravě při práci s technickými plyny. Tlaková lahev se skládá – z tělesa láhve (pláště s tloušťkou stěny 5 až 8 mm), zakončeného hrdlovým kroužkem (sloužícího k našroubování ochranného klobouku nebo třmenu),

opatřeného lahvovým ventilem, spodek lahve je zakončen patkou. Součástí výbavy lahve je ochranný klobouček, případně třmen. Namontované lahvové ventily se odlišují podle naplněného plynu v lahvi. Např. lahev určená pro naplnění acetylenem je uzavřena acetylenovým lahvovým ventilem, který je do lahve zašroubován čepem s kuželovým závitem. Tento ventil se konstrukčně liší od kyslíkového a od ostatních ventilů pro jiné plyny.

Při větším odběru plynů se používá spojení lahví do svazku (baterie) nebo zásobník, ze kterého se plyn dodává do centrálního rozvodu plynu nebo přímo k velkému spotřebiči (pálicímu stojí). Tlakové lahve mají předepsané barevné označení, které poskytuje základní informaci o plynové náplni. Od červa 1998 platí pro barevné označení lahví ČSN EN 1089–3. Nové označení je odlišné oproti původnímu označení dle ČSN 07 8509. Přejít na nové evropské značení musí být ukončen do 30.6.2008.

Mezi základní bezpečnostní požadavky při práci se svařecími soupravami zejména patří:

- jednotlivé soupravy musí být od sebe vzdálené min. 3 m, případně při menší vzdálenosti musí být vzájemně oddělené nehořlavou stěnou,
- délka nenapojované hadice musí být min. 5 m,
- vzdálenost bezpečnostní pojistky (předlohy) od plamene musí být od vodní předlohy min. 3 m a od suché předlohy 1m,
- lahve s acetylenem musí být ustavené ve svislé poloze nebo odkloněné z ležaté polohy o úhel min. 30° a to ventilem vzhůru,
- odběr acetylenem z lahve může být započat až za hodinu po její přepravě.

2.3.3 Acetylenové bezpečnostní předlohy

Předloha slouží jako ochrana proti zpětnému šlehnutí plamene a proti proudění kyslíku do acetylenového potrubí nebo do vyvíječe. Je namontována mezi hořákem a vyvíječem. U centrálního rozvodu plynu musí být další předlohy na jednotlivých výstupech na pracovišti. Z předlohy smí být odebírán plyn pouze pro jeden hořák. Podle provedení a funkce předlohy rozdělujeme na vodní (nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké) a suché (kuličkové, membránové).

Nízkotlaká vodní předloha je tvořena válcovou nádobou, do které jsou vsazeny dvě různě dlouhé trubky. Vstupní trubka je zakončena u dna nádoby a druhá (bezpečnostní) je zakončena výše. Tato druhá trubka průchozí a vně nádoby je zakončena nálevkou pro dolévání vody. Na boku nádoby je v horní části umístěn nátrubek pro vývod acetylenem a nad středem je kontrolní ventil, který určuje hladinu vodní náplně předlohy. Při zpětném šlehnutí plamene se voda vytlačuje z nádoby do bezpečnostní trubky a umožňuje únik plynu.

Středotlaké a vysokotlaké předlohy jsou v provedení vodní nebo suché. Vodní předlohy jsou doplněny na vstupu o uzavírací kuličku a nebo jsou ještě doplněny o průřeznou pojistnou membránu.

Suchá (automatická) předloha je osazena zpětným kuličkovým uzávěrem. Tento ventil se uzavírá při vniknutí kyslíku do acetylenové hadice (zvýší tlak v hadici) nebo při zpětném šlehnutí. Součástí předlohy je filtr, který zachycuje nečistoty z rozvodu a odlučuje vodu.

2.3.4 Příslušenství

Hadice slouží k přívodu plynů do svařovacích a řezacích hořáků. Pro tento účel se používají pryžové hadice s textilní vložkou, s tloušťkou stěny 4 až 6 mm. Hadice pro kyslík

má světlost 6 až 9 mm, na povrchu je označena modře. Hadice na acetylen má světlost 9 až 14 mm, na povrchu je označena červeně. Pro připojení a spojování hadice se smí používat pouze předepsané nátrubky a šroubovací spojky, pojištěné páskovými sponami. Pro plamenové svařování nesmí být hadice kratší než 5 m.

Redukční ventily jsou zařízení, kterými se upravuje vysoký tlak z lahve nebo z rozvodu na konstantní pracovní tlak. Redukční ventil se připojuje na lahvový ventil nebo na centrální rozvod plynu. Na lahvový ventil se připojuje buď přesuvnou maticí se závitem, nebo třmenem (acetylenový ventil). Redukční ventil se skládá z tělesa vysokotlaké a nízkotlaké části, dvou tlakových manometrů, redukčního ústrojí a přípojných příslušenství. Po připojení ventilu na lahev nebo rozvod proudí vpuštěný plyn nejprve do vysokotlaké komory redukčního ventilu. Na tlakoměru (manometru) lze zjistit hodnoty vstupního tlaku plynu. Tento tlak se upravuje prostřednictvím zabudovaného regulačního ventilu, který se ovládá regulačním šroubem na jeho víku. Redukovaný plyn proudí do nízkotlaké komory, která je zakončena výstupním ventilem. Tlak redukovaného plynu lze zjistit na připojeném nízkotlakém tlakoměru, spojeném s touto komorou. Nedílnou součástí redukčního ventilu jsou pojistné ventily pro případ poruchy. Redukční ventily na kyslík jsou provedeny tak, aby nemohlo dojít k jejich vnitřnímu vznícení. Všechny součásti a příslušenství musí být z toho důvodu očištěny a odmaštěny. Redukční ventily na acetylen jsou konstruovány a vyrobeny tak, aby výstupní přetlak do hadice nepřekročil 0,15 MPa. Ventily jsou mosazné.

2.3.5 Bezpečnost práce při plamenovém svařování

Svářeči plamenem musí být prokazatelně seznámeni a přezkoušeni ze znalosti bezpečnostních požadavků, obsažených v normách ČSN 05 0601 a ČSN 05 0610, Vyhlášce ministerstva vnitra č. 87/2000 Sb., kterou jsou stanoveny podmínky požární bezpečnosti při svařování a souvisejícími dalšími vyhláškami.

Svářeč musí být vybaven osobními ochrannými pracovními prostředky, které je povinen používat a šetrně s nimi nakládat. Do základního vybavení patří:

- ochranné brýle,
- ochranné svářečské rukavice s manžetou,
- pracovní svářečský oděv impregnovaný,
- kožená pracovní obuv.

Dále podle druhu vykonávané práce má přiděleny k používání doplňující ochranné prostředky, které jsou zaměřeny např. na:

- ochranu dýchacích orgánů,
- ochrany sluchu,
- ochranu hlavy, rukou a nohou,
- zajištění proti pádu (ochranný pás).

Svářeč na dílenském i montážním svářečském pracovišti prokazuje svou odbornou způsobilost ke svařování doklady odpovídající stanoveným požadavkům nebo normativním dokumentům dle ČSN EN 45020, vydané oprávněnou organizací v České republice.

Literatura

MINAŘÍK, V.: Plamenové svařování, ZEROSS, Ostrava, 2001.

BUBENÍK, V.: Nepublikované interní učební texty, 2000.

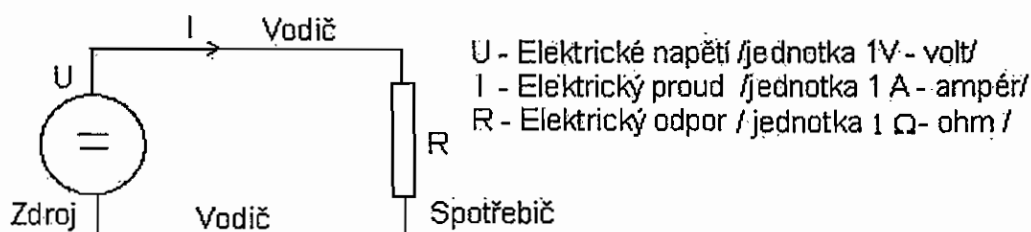
Citované normy ČSN, ČSN EN a Vyhláška ministerstva vnitra č. 87/2000 Sb.

3. ZÁKLADY ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRICKÝ OBLOUK

Existují nejméně tři důvody pro opakování resp. studium elektrotechniky ve svařování:

1. Systém zajištění jakosti dle EN 729-1,2,3 vyžaduje, aby pro svařování byly používány pouze svařovací postupy kvalifikované dle EN 288-3, na jejichž základě jsou vypracovány specifikace svařovacích postupů WPS pro vlastní svařování. WPS obsahují mimo jiné hodnoty svařovacích parametrů, které je nutno měřit a prokazatelně dodržovat (U, I, v_{sv} .. atd.).
2. Teplo potřebné k tavení základního a přídavného materiálu vzniká u většiny svařovacích procesů přeměnou elektrické energie na tepelnou (v oblouku, na odporu, kinetická energie elektronů nebo fotonů a p.)
3. Při svařování se pracuje s elektrickým zařízením, které vyžaduje dodržování zásad bezpečnosti práce kvůli ochraně osob před úrazem elektrickým proudem, ochraně majetku před poškozením, např. požárem atd.

3.1 Elektrický obvod a základní elektrické veličiny



Obr. 3.1 Elektrický obvod

Uzavřeným elektrickým obvodem prochází proud, jehož velikost je dána **Ohmovým zákonem**

Ohmův zákon lze vyjádřit též $U = I \cdot R$ nebo

Úbytek napětí se vytvoří na odporu průchodem proudem $U = R \cdot I$

Elektrický proud je tok elektricky nabitých částic vodičem. Částice s elektrickým nábojem jsou především záporně nabitě elektrony nebo neúplné atomy, tzv. kladné nebo záporné ionty.

Elektrický náboj je množství elektricky nabitých částic v tělese, značí se Q (jednotka 1C - coulomb neboli 1 As - ampérsekunda, větší jednotka Ah – ampérhodina). Např. náboj 1 elektronu je $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Velikost proudu se dá vyjádřit též jako podíl náboje protékajícího vodičem za jednotku času:

$$Q = I \cdot t$$

Jeden ampér je definovaný vzájemnými silovými účinky dvou nekonečně dlouhých tenkých rovnoběžných vodičů od sebe vzdálených 1 m ve vakuu, které na sebe v úseku délky 1 m působí silou $2 \cdot 10^{-7}$ N.

Elektrické napětí se definuje jako rozdíl potenciálů. Potenciál je roven práci, kterou je třeba vykonat při přemístění jednotkového náboje z místa nulového potenciálu na uvažované místo. Jednotka napětí jeden volt je odvozená z definice napětí tzn. při rozdílu potenciálů 1 V se při přemístění náboje 1 coulomb vykoná práce 1 joule.

Elektrický odpor je fyzikální vlastnost materiálu, jednotka 1 ohm je odvozená např. z Ohmova zákona, že rezistorem o odporu 1 ohm při vnějším napětí 1 V teče proud 1 A.

3.2 Elektrické teploty, elektrická práce, elektrický výkon

Teplo, resp. **elektrickou práci**, vzniklou ve spotřebiči s odporem R průchodem stejnosměrného proudu (viz obrázek elektrického obvodu) určuje Jouleův zákon :

$$A = U \cdot I \cdot t \text{ nebo po dosazení za } U \text{ resp. za } I: \quad A = R \cdot I^2 \cdot t$$

kde: $A = \text{J}$ - joule neboli Ws - wattsekunda, větší jednotka kWh - kilowatthodina
 $U = \text{V}$
 $I = \text{A}$
 $t = \text{s}$

Dříve se teplo měřilo v kaloriích [cal , kcal] :

$$A = 0,24 \cdot U \cdot I \quad \text{tzn. } 1 \text{ cal jsou přibližně } 4 \text{ Joule}$$

Součin $U \cdot I$ je **elektrický výkon P**, je to vlastně elektrická práce vykonaná za jednotku času:

$$\text{po dosazení z Ohmova zákona: } P = R \cdot I^2,$$

Jednotkou elektrického výkonu je 1 W a odvozené jednotky kW, MW atd.

3.3 Rozdělení látek a jejich elektrická vodivost

3.3.1 Vodiče

a) **pevné látky - kovy a uhlík**

- **kovy:**

- velmi dobrá elektrická vodivost Ag, Cu ($\rho = 0,017 \text{ } \Omega \text{mm}^2/\text{m}$), Au, Al způsobená elektronovou vazbou - 1 elektron ve valenční sféře, elektronový plyn mezi atomy uspořádanými v krystalové mřížce,

Odpor vodiče:

$$; R_T = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

kde: ρ - měrný odpor [$\Omega \text{mm}^2/\text{m}$]
 α - součinitel závislosti odporu na teplotě
 l - délka vodiče [m]
 S - průřez vodiče [mm^2]
 R_0, R_T - odpor za jmenovité teploty, za jiné teploty

- kladná závislost odporu na teplotě, s rostoucí teplotou vodivost klesá,
- změna odporu vlákna žárovky atd.,
- při 0 °K supravodivost,

- uhlík:

- dobrá elektrická vodivost,
- záporný součinitel závislosti odporu na teplotě.

b) kapalné látky - elektrolyty

elektrolyty = vodní roztoky solí, např. NaCl

- vodivost iontová (molekuly solí ve vodním roztoku se rozpadnou na kladné kovové ionty (Na^+) a záporné ionty (Cl^-). Vloží-li se tento elektrolyt do elektrického obvodu, prochází elektrolytem proud. Nosičem proudu jsou kladné a záporné ionty.
- většina kapalných látek chemicky čistých, např. voda má vodivost velmi malou, znečištěním však vodivost prudce stoupne.

c) plynné látky

- za normálních podmínek je elektrická vodivost čistých plynů velmi malá - elektrický proud nevedou. V elektrickém poli mezi elektrodami dochází k deformaci atomů - vytváří se tzv. dipóly, což se navenek projevuje průchodem nepatrného proudu. Při překročení tzv. elektrické pevnosti mezi elektrodami s vysokým napětím dojde k průrazu - ionizaci plynu mezi elektrodami, uvolní se elektrony z neutrálních atomů a plyn se stane vodivým. Vypnutím vnějšího napětí se v krátké době uvolněné elektrony a kladné ionty opět spojí do neutrálních atomů a vodivá cesta zmizí. Vodivost plynů se zvyšuje, jsou-li znečištěny např. kovovými parami apod.

3.3.2 Nevodiče - izolanty

a) pevné látky

- za normálních podmínek je jejich elektrická vodivost velmi malá. Volné elektrony se téměř nevyskytují. Při namáhání elektrickým napětím prochází nepatrný proud jako důsledek tvorby dipólové deformace neutrálních atomů. Při překročení určité velikosti vnějšího napětí, tzv. elektrické pevnosti dojde k průrazu v pevné látce - dojde k roztržení neutrálních atomů na záporné elektrony a kladné ionty, vytvoří se vodivá cesta a nastane trvalá destrukce pevného izolačního materiálu.

b) kapalné a plynné látky - viz kapalné a plynné vodiče.

3.3.3 Polovodiče

- Patří sem skupina prvků IV. skupiny Mendělejevovy tabulky, nejdůležitější jsou **germánium Ge** a **křemík Si**, chemicky čisté prvky jsou **polovodiče vlastní**.
- Příměsí prvků ze sousedních skupin dostaneme tzv. **polovodiče typu P** (příměsí ze III. skupiny, např. indium In) a **polovodiče typu N** (příměsí ze skupiny V, např. antimon Sb).
- Elektrická vodivost poněkud horší než u kovů, ale dvojího druhu, tzv. děrová u polovodiče typu P a vodivost elektronová u polovodiče typu N.
- Záporný součinitel závislosti odporu na teplotě - s rostoucí teplotou odpor klesá, naopak při nízkých teplotách odpor roste až do nekonečně velké hodnoty.

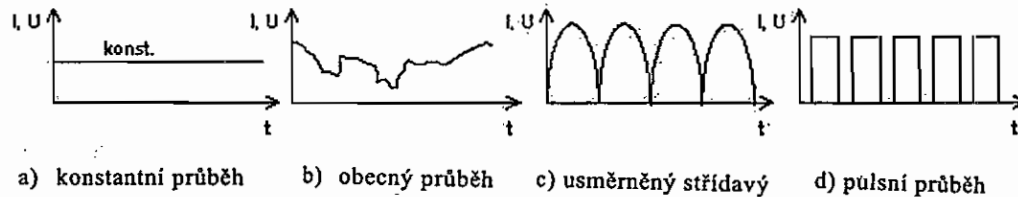
- Ve styku polovodičů typu P a N vznikne přechod PN, který tvoří základ všech polovodičových prvků (diody, tyristory, tranzistory ...).

3.4 Druhy elektrického proudu (napětí)

3.4.1 Základní rozdělení dle časového průběhu na:

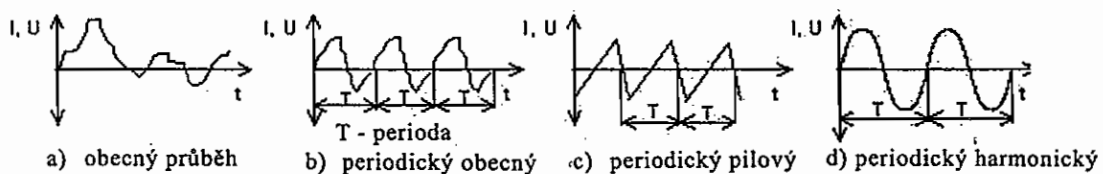
- **stejnsměrný** - nemění polaritu a
- **střídavý** - mění polaritu.

3.4.2 Stejnsměrný proud (napětí)



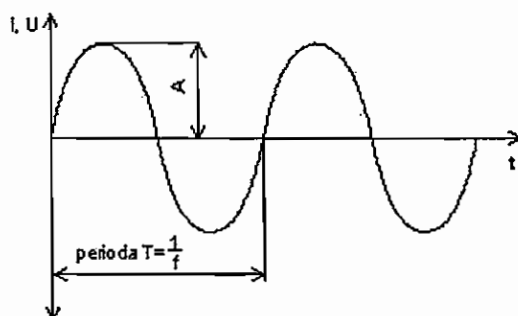
Obr. 3.2 Průběh elektrického proudu

3.4.3 Střídavý proud (napětí)



Obr. 3.3 Průběh střídavého proudu

3.4.4 Charakteristické hodnoty střídavého harmonického průběhu



Obr. 3.4 Průběh střídavého harmonického proudu

Průběh: $i = I_{MAX} \cdot \sin(\omega.t)$
 $u = U_{MAX} \cdot \sin(\omega.t)$
 kde: A - maximální hodnota – špička

$$A = I_{\text{MAX}} \quad \text{nebo} \quad A = U_{\text{MAX}} \quad t = \frac{1}{T} \quad - \text{ frekvence v Hz}$$

$$\omega = 2\pi f \quad - \text{ kruhová frekvence}$$

Střední hodnota střídavého proudu (napětí) je rovna aritmetickému průměru dosažených hodnot v daném časovém úseku:

$$I_{\text{str}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad U_{\text{str}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt$$

Efektivní hodnota střídavého proudu (napětí) je rovna geometrickému průměru hodnot dosažených v daném časovém okamžiku, číselně je efektivní hodnota rovna hodnotě stejnosměrného proudu (napětí), který po připojení na odporovou zátěž vyvine za určitý čas v této zátěži stejné teplo jako připojený časově proměnný proud (napětí). Vyjadřuje energetický obsah střídavého proudu (napětí). Efektivní hodnota je dána vzorcem:

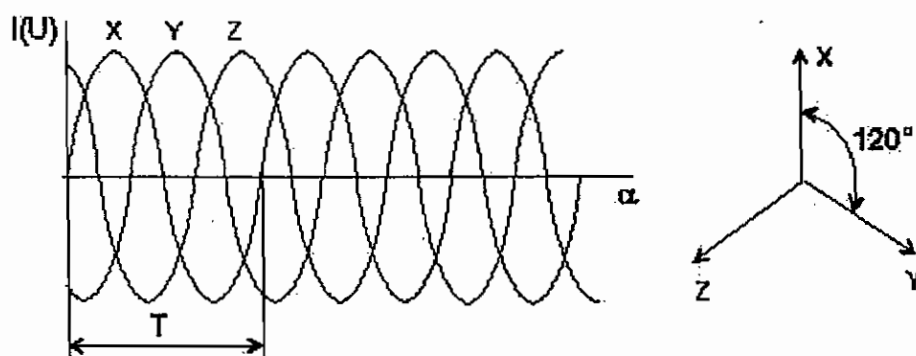
$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i^2(t) dt} \quad U_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u^2(t) dt}$$

Pro střídavý harmonický průběh (rozvodná síť) platí :

$$I_{\text{ef}} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{\text{max}} \quad U_{\text{ef}} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_{\text{max}}$$

3.4.5 Třífázový proud (napětí)

Je znázorněn třemi sinusovkami posunutými o 1/3 periody, tj. o 120 °:



Obr. 3.5 Průběh třífázového proudu

Rozvodná elektrická síť nízkého napětí obsahuje tři fázové vodiče a jeden vodič tzv. nulový. Mezi každým fázovým vodičem a nulovým vodičem je **fázové napětí** $U_f=220$ V efektivních. Mezi dvěma fázovými vodiči je tzv. **sdužené napětí** $U_s=380$ V efektivních. Mezi sduženým a fázovým napětím platí vztah : $U_s = \sqrt{3}U_f$

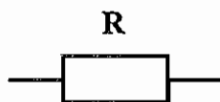
3.5 Pasivní příspěvky elektrických obvodů

3.5.1 Rozdělení

Mezi pasivní prvky elektrických obvodů patří rezistory, kondenzátory a tlumivky - indukčnosti.

3.5.2 Rezistory

Charakteristickou vlastností je klást odpor procházejícímu proudu a tím omezovat jeho velikost - viz Ohmův zákon.

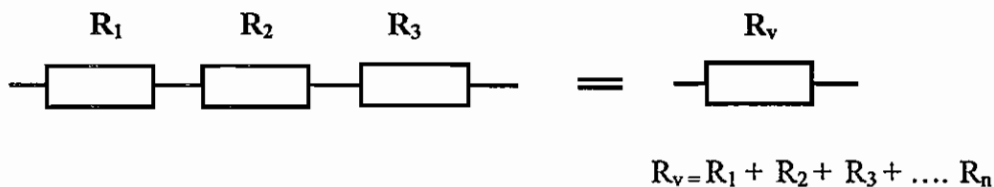


Schematická značka a označení viz obrázek. Jednotka odporu 1Ω , odvozené jednotky $k\Omega$, $M\Omega$ atd.

Konstrukční provedení dle velikosti zatížení hmotové, vrstevné, drátové, lité ad. Proměnné odpory jsou reostaty a potenciometry.

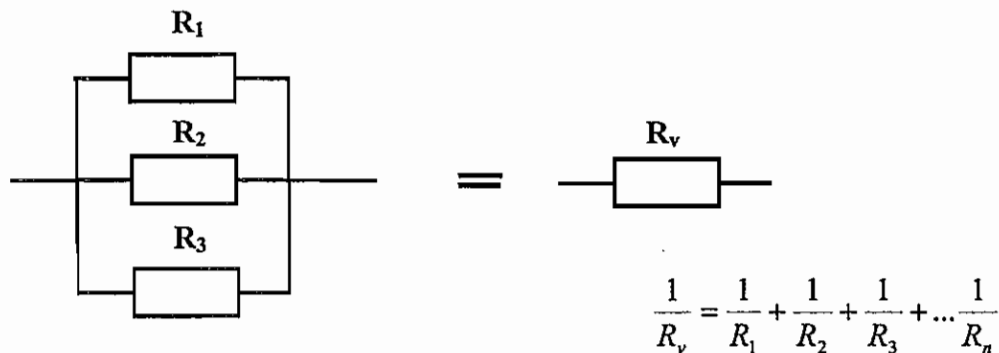
Zapojování rezistorů za sebou (do serie) a vedle sebe (paralelně):

- za sebou:



Obr. 3.6 Řazení odporů za sebou

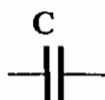
-vedle sebe:



Obr. 3.7 Řazení odporů vedle sebe

3.5.3 Kondenzátory

Charakteristickou vlastností je kapacita, což je schopnost jímat do sebe elektrický náboj. Schematická značka a označení viz obrázek.



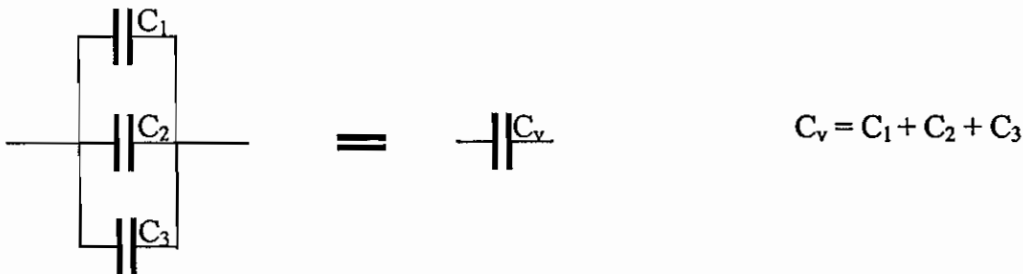
Jednotka kapacity je 1 F (Farad) - velká kapacita, v technické praxi se používají menší jednotky pF, nF, mF atd. Konstrukční uspořádání deskové, svitkové, keramické, vzduchové, pevné a proměnné. Vždy se jedná o dvě různě vytvarované kovové folie nebo desky, oddělené izolační vrstvou. Velikost desek a jejich vzájemná vzdálenost spolu s jakostí izolační vrstvy určují velikost kapacity kondenzátoru:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}$$

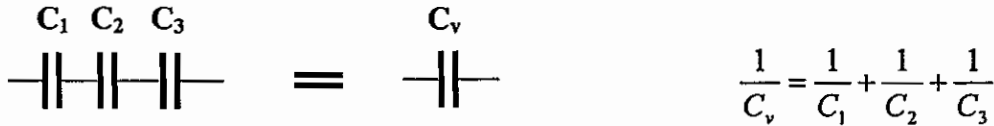
kde: C - kapacita
 $\varepsilon \cdot \varepsilon_0$ - materiálová konstanta
 S - plocha desek
 d - vzdálenost desek

Zapojení kondenzátorů:

-vedle sebe:

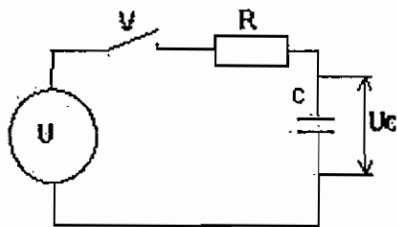


-za sebou:



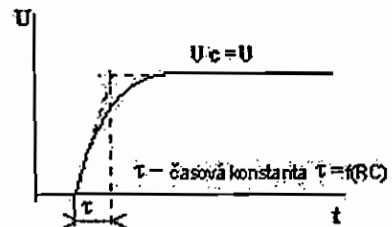
Při zapojení kondenzátoru do obvodu se střídavým proudem klade kondenzátor protékajícímu proudu odpor, který se nazývá **kapacitní reaktance X_C** , jejíž velikost je dána:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad \text{kde: } \omega = 2\pi f \text{ je tzv. kruhová frekvence}$$



Zapojení kondenzátoru v elektrickém obvodu

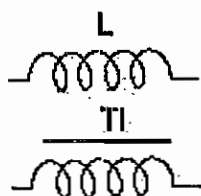
Obr. 3.8



Průběh napětí na kondenzátoru po sepnutí spínače V

Obr. 3.9

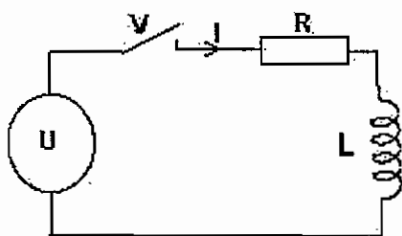
3.5.4 Tlumivky, indukčnosti (cívky)



Charakteristickou vlastností je indukčnost L , což jest schopnost bránit změně protékajícího proudu. Schematická značka a označení viz obrázek. Jednotka indukčnosti je 1 H - Henry, používají se jednotky odvozené mH, μ H. Konstrukčně jsou tlumivky zpravidla vinuty měděným vodičem na železném jádře a jsou určeny pro použití na nízkých frekvencích (např. 50 Hz), cívky - indukčnosti pro větší frekvence jsou bez železných jader. Velikost indukčnosti závisí na počtu závitů, na průměru cívky a na vlastnostech jádra. Při zapojování cívek za sebou nebo paralelně je nutno brát v úvahu smysl vinutí, zapojením vinutí proti sobě se indukčnost odečítá, čehož se využívá při konstrukci tzv. bezindukčních bifilárních vinutí.

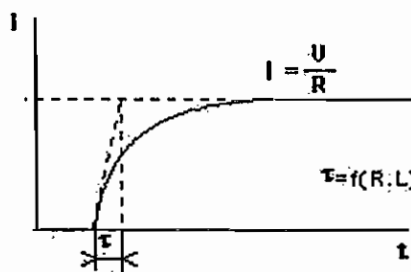
Při zapojení cívky (indukčnosti) do obvodu se střídavým proudem klade cívka tomuto proudu odpor tzv. induktivní reaktanci X_L :

$$X_L = \omega L \quad \text{kde } \omega = 2\pi f$$



Zapojení indukčnosti do elektrického obvodu

Obr. 3.10



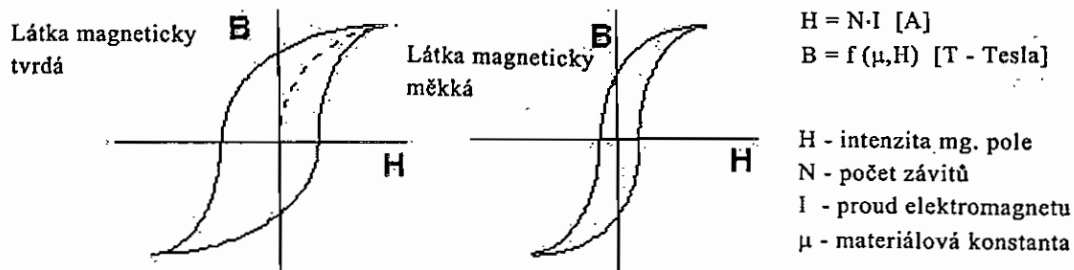
Obr. 3.11 Závislost intenzity proudu na čase

Tlumivka se používá k vyhlazování usměrněného proudu a pro konstrukci časovacích obvodů.

3.6 Magnetismus

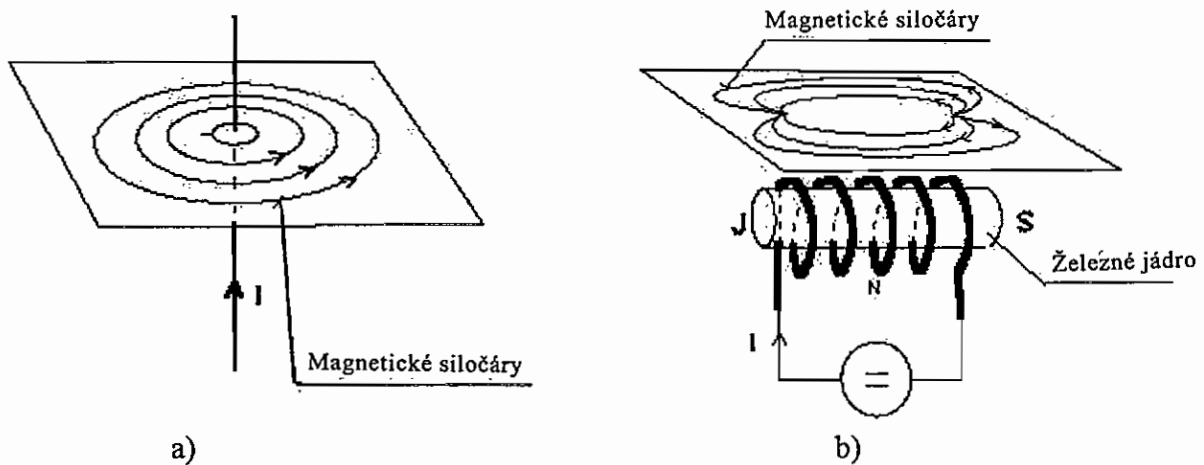
Je to jev, který se projevuje silovými účinky mezi určitými tělesy - magnety a feromagnetickými látkami - Fe, Ni, Co, Cd a slitiny těchto kovů s dalšími prvky, umělé materiály na bázi oxidů těchto kovů. Podstatu magnetismu tvoří do jednoho směru uspořádané magnetické momenty jednotlivých atomů feromagnetických látek. V přírodě existuje železná ruda magnetovec, který tyto účinky vykazuje, jedná se o přírodní permanentní magnet. Magnet má dva póly severní a jižní, které se od sebe nenechají oddělit. Magnet může mít různý tvar tyčový, podkovovitý, diskový apod. Permanentní magnet se nechá vyrobit uměle zmagnetováním vhodné feromagnetické látky - např. ocel s velkým obsahem uhlíku, spékané feritické materiály apod. Na výrobu permanentních magnetů se používají látky magneticky tvrdé, pro stavbu obvodů elektrických strojů na střídavý proud (transformátory, elektromotory atd.) se používají látky magneticky měkké.

Odlišují se plochou tzv. magnetizační křivky - závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H:



Obr. 3.12 Průběh magnetické indukce

Kolem vodiče, kterým prochází elektrický proud se vytváří magnetické pole. Svinutím vodiče do šroubovice vznikne cívka, v jejímž vnitřku dojde k soustředění magnetického pole a na jejích koncích vzniknou magnetické póly severní a jižní. Existence magnetického pole se nechá prokázat experimentálně nasypáním železných pilin na papír, pod nímž je umístěn elektromagnet. Piliny se seřadí ve směru tzv. magnetických siločar, které vychází ze severního pólu a vchází do jižního pólu (Lencovo pravidlo pravé ruky) viz obrázky:



Obr. 3.13 Průběh magnetických siločar
 a) na vodiči b) na cívce

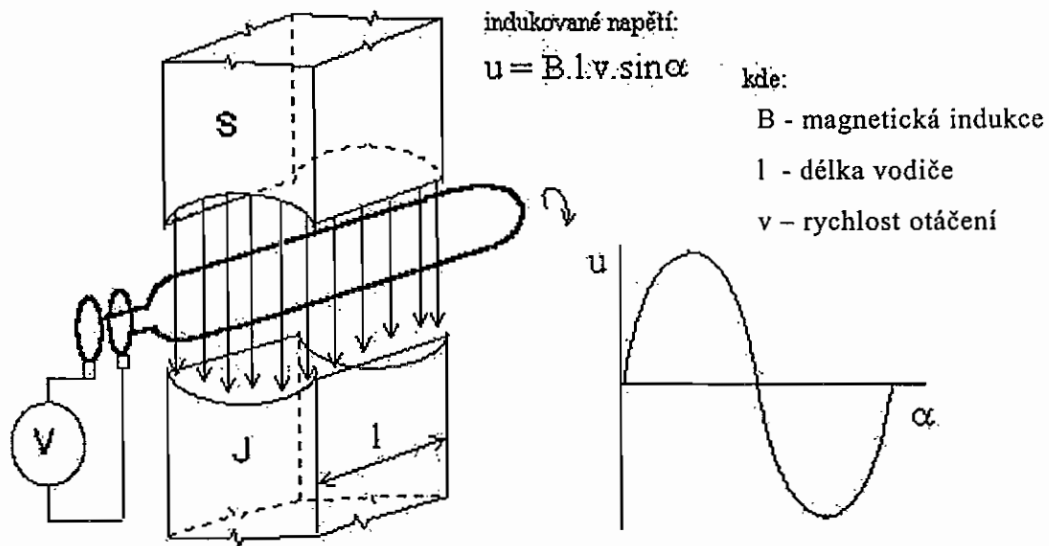
3.7 Elektromagnetická indukce

Ve vodiči, umístěném v časově proměnném magnetickém poli se indukuje napětí u , jehož velikost je určena Faradayovým indukčním zákonem :

$$u = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \Delta \phi / \Delta t - \text{rychlost změny magnetického toku}$$

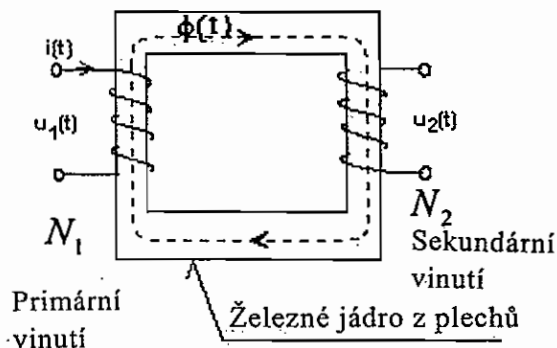
Prakticky existují dvě možnosti, kdy je splněna podmínka proměnného magnetického pole, buď se vodič pohybuje v konstantním magnetickém poli, nebo stacionární - nepohyblivý vodič je vložen do kolísajícího magnetického pole.

a) pohyblivý vodič v konstantním magnetickém poli - generátor:



Obr. 3.14 Schéma generátoru

b) stacionární vodič v proměnném magnetickém poli - transformátor:



Indukované napětí:

$$u_2(t) = u_1(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad \frac{N_2}{N_1} = p$$

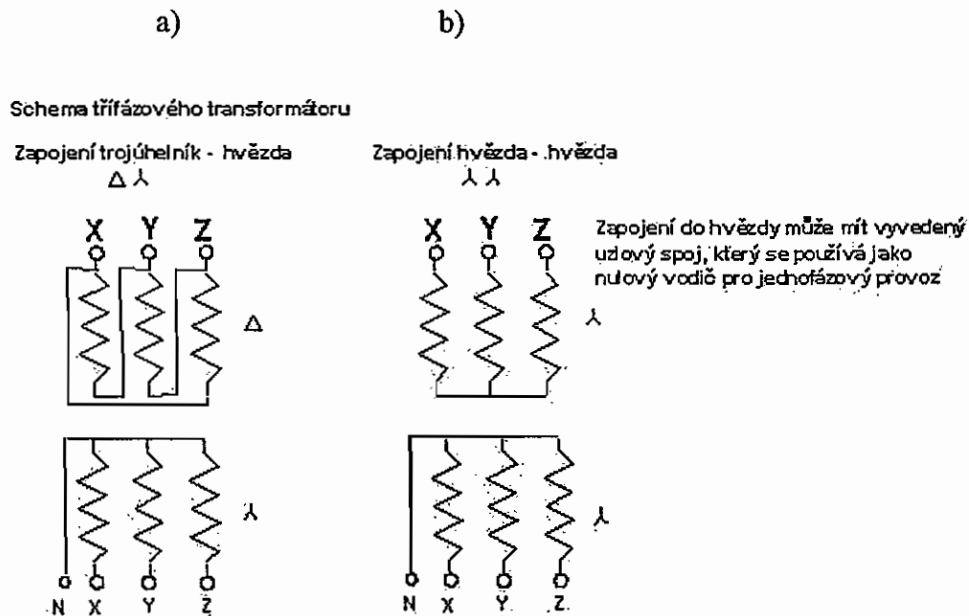
p - převod transformátoru
 Proměnný proud $i_1(t)$, tekoucí primárním vinutím vybudí v magnetickém jádře proměnný magnetický tok $\phi(t)$, který prochází sekundárním vinutím, v němž indukuje sekundární napětí $u_2(t)$.

Obr. 3.15 Schéma transformátoru

Transformátor slouží ke změně střídavého napětí a ke galvanickému oddělení obvodů.

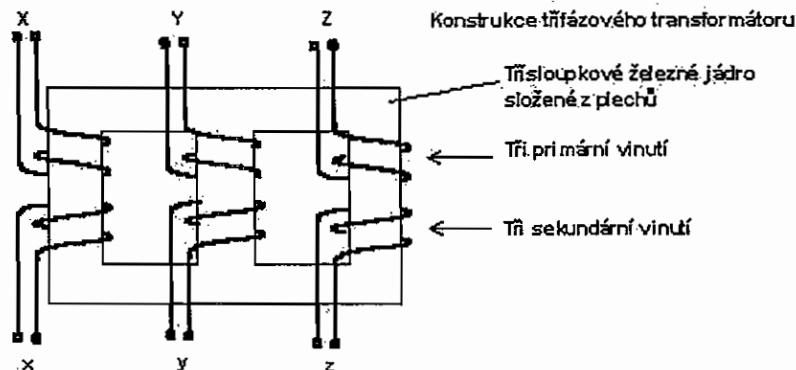
V technické praxi se vyrábějí hlavně transformátory jednofázové a třífázové. Jednofázový transformátor má pouze jedno vinutí primární a jedno vinutí sekundární. U třífázového transformátoru jsou tři primární a tři sekundární vinutí, která se zapojují buď do trojúhelníka nebo do hvězdy.

Obě zapojení se používají dle potřeby:



Obr. 3.16

3.8 Aktivní prvky elektrických obvodů



Obr. 3.17

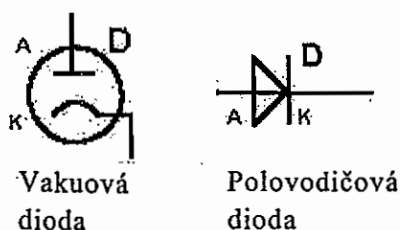
3.8.1 Přehled

Diody, tyristory, triaky, tranzistory, integrované obvody, mikroprocesory.

3.8.2 Diody

Dioda je součástka se dvěma elektrodami - anodou A a katodou K, která propouští proud pouze jedním směrem, a to je-li na anodě kladná polarita. Dioda se nazývá též **usměrňovací ventil**, poněvadž se používá k usměrňování střídavého proudu.

Dříve se vyráběly vakuové diody, dnes jsou to převážně diody polovodičové - křemikové nebo donedávna germaniové. Schematická značka viz obrázek:



Obr. 3.18 Schéma diod

3.8.3 Tyristory

Tyristor je svým principem řízená dioda, i když jej tvoří podstatně složitější mnohavrstvý polovodičový systém. Je to součástka s anodou a katodou jako neřízená dioda, která je opatřena ještě třetí, tzv. řídicí elektrodou. S využitím řídicí elektrody je možno i při polarizaci v propustném směru (+ na anodě) řídit okamžik otevření ventilu. Převedení tyristoru do nevodivého stavu je možné pouze, když jím neprochází proud.

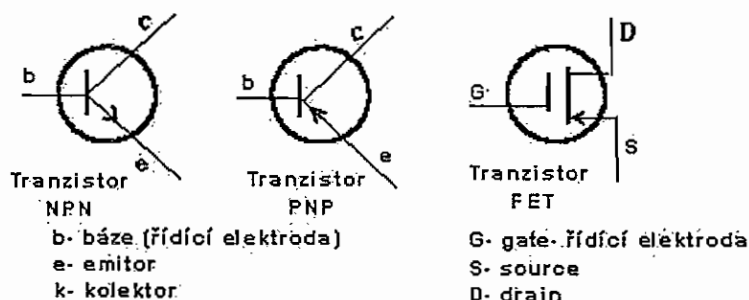
3.8.4 Triaky

Triak funguje jako dva tyristory v antiparalelním zapojení tzn. umožňuje řídit průchod střídavého proudu.

3.8.5 Tranzistory

Tranzistor je aktivní prvek, který se používá jako zesilovač signálu, oscilátor nebo jako spínač. Tranzistory dle konstrukce dělíme na bipolární a unipolární.

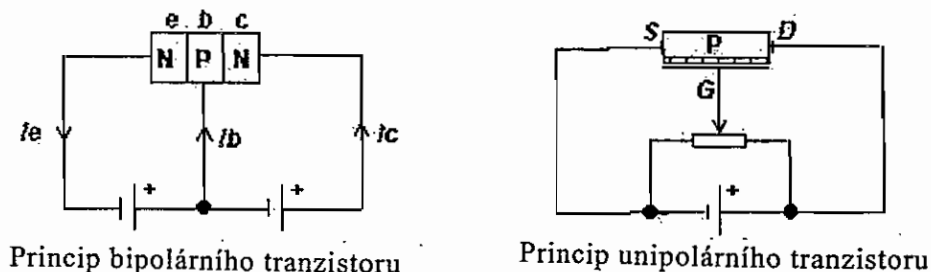
Bipolární tranzistor je vyroben ze třech vrstev polovodičů, tzn. obsahuje dva přechody PN. Malým proudem přiváděným do báze řídíme velký proud v obvodu emitor kolektor. Bipolární tranzistory existují ve dvou provedeních a to NPN a PNP - viz schematické značky:



Obr. 3.19 Schéma tranzistoru

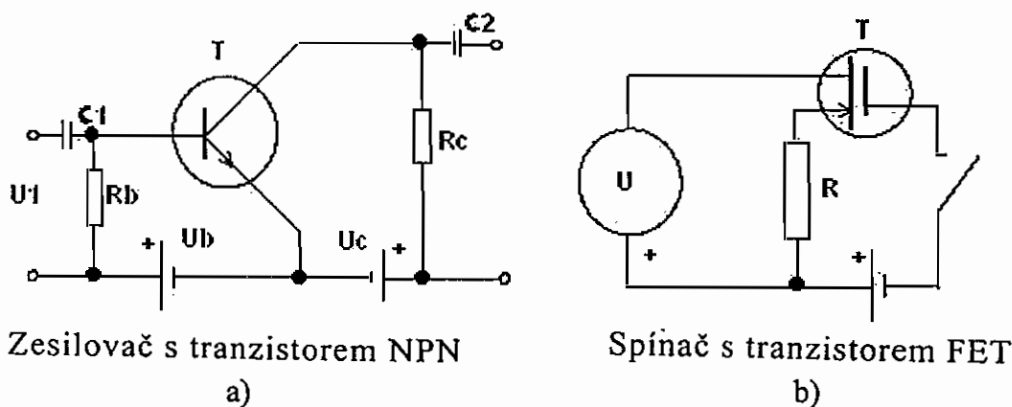
Unipolární tranzistor - tranzistor řízený polem FET - v principu tvoří tyčinka z polovodiče jednoho typu, na níž jsou upevněny vývody S a D a po délce tyčinky je odizolovaně umístěna kovová destička řídicí elektrody G. Přiložením napětí na řídicí elektrodu vzniklé elektrické pole otvírá nebo zavírá vodivý kanál v tyčince. Unipolární

tranzistor nepotřebuje k řízení žádný vstupní proud, tzn. vůbec nezatěžuje zdroj signálu. V současné době výkonové tranzistory tohoto typu umožnily konstrukci moderních elektronických svařovacích zdrojů - invertorů, v nichž zajišťují přeměnu stejnosměrného proudu na střídavý proud zvýšené frekvence.



Obr. 3.20 Principy tranzistoru

Integrované obvody tvoří více tranzistorů a pasivních prvků, které jsou moderní technologií vyrobeny na velmi malé ploše destičky z polovodiče - čipu. Integrované obvody jsou analogové (operační zesilovače, jednoúčelové obvody a další) a logické (hradla, invertory, děličky, čítače, paměti a další). Hustota aktivních a pasivních prvků na 1 mm^2 se neustále zvyšuje. Nejvyššího stupně integrace se dosahuje u mikroprocesorů a polovodičových pamětí. Mikroprocesory a paměti představují základní součásti počítačových systémů, využívaných jak pro sběr dat a řízení technologických procesů, tak pro zpracování a vyhodnocování naměřených hodnot.



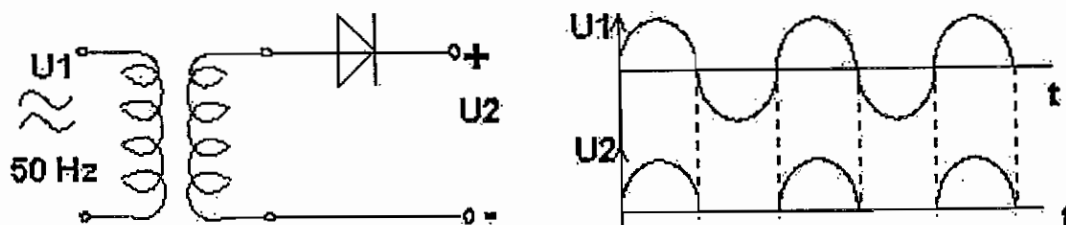
Obr. 3.21 Použití integrovaného obvodu

3.9 Usměrňovače střídavého proudu

Usměrňovače slouží k usměrňování střídavého proudu. Rozdělujeme je dle provedení na jednofázové a třífázové. Oba druhy dále mohou být provedeny jako jednocestné nebo dvoucestné. Jako usměrňovací ventily mohou být použity diody - usměrňovače neřízené nebo tyristory - usměrňovače řízené. Do usměrňovače je proud přiváděn z jednofázového nebo třífázového transformátoru. Zapojení některých používaných usměrňovačů jsou uvedena dále.

3.9.1 Jednofázové usměrňovače

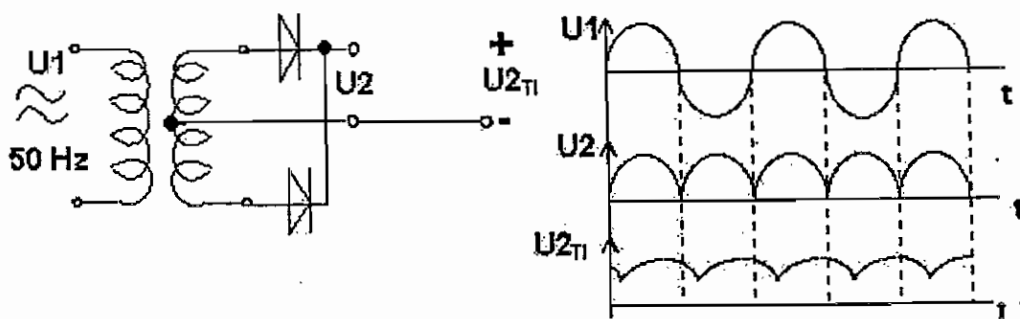
a) jednocestný



Usměrněný proud je přerušovaný, má pouze jednu půlvlnu, omezené využití např. nabíječky akumulátorů.

Obr. 3.22 Schéma jednocestného usměrňovače

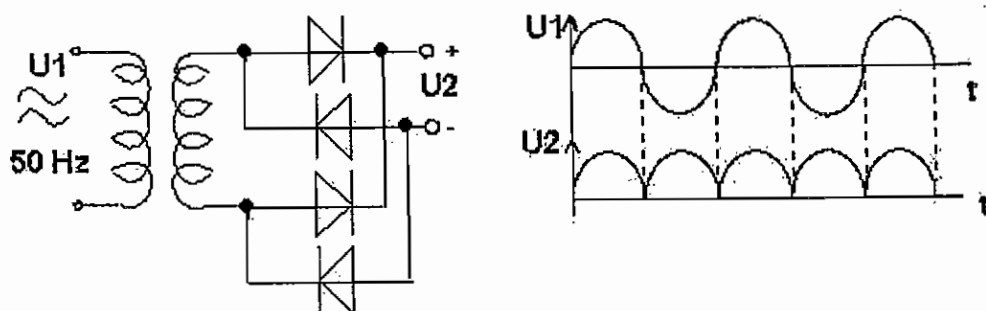
b) dvoucestný obyčejný



Usměrněný proud kolísá až k nule, má značné zvlnění, které se však nechá částečně vyhladit tlumivkovým filtrem, sekundární vinutí dvojnásobné.

Obr. 3.23 Schéma dvoucestného usměrňovače obyčejného

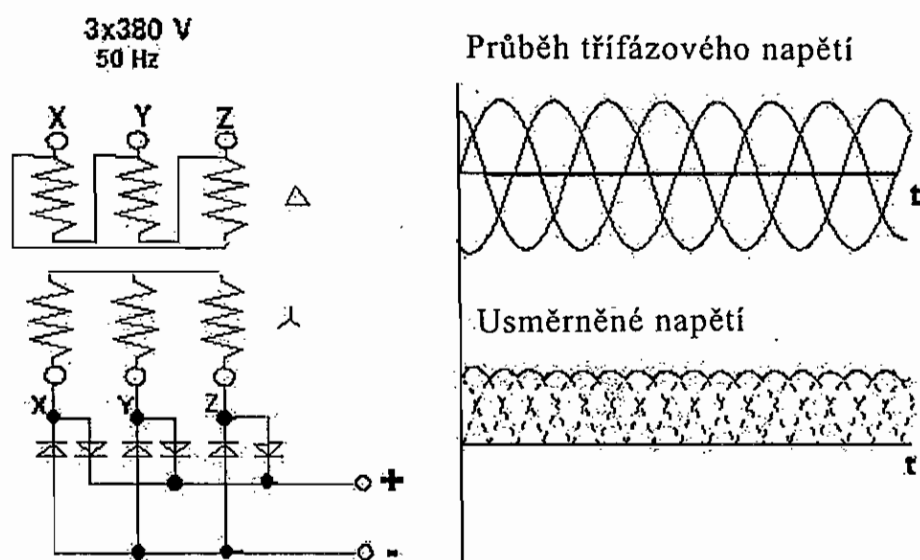
c) dvoucestný můstkový



Kvalita usměrnění stejná jako v předešlém případě, sekundární vinutí je jednoduché, počet diod je dvojnásobný.

Obr. 3.24 Schéma dvoucestného usměrňovače můstkového

3.9.2 Třífázový můstkový usměrňovač



Obr. 3.25 Schéma třífázového můstkového usměrňovače

Třífázový můstkový usměrňovač poskytuje stejnosměrné napětí, resp. proud s velmi malým zvlněním a umožňuje rovnoměrné zatížení všech tří fází v rozvodné síti. Pro svařovací účely bývá často na výstup z usměrňovače zapojena filtrační tlumivka, která zlepšuje dynamické vlastnosti usměrňovače. Pro možnost regulace výstupního napětí (efektivní hodnoty) používají se místo diod tyristory, které ovšem vyžadují regulační obvody.

Zapojení třífázového jednocestného usměrňovače zde není uvedeno, poněvadž se používá pouze v ojedinělých případech. V tomto usměrňovači jsou použity pouze tři diody v kladné nebo záporné větvi.

3.10 Elektrický oblouk

3.10.1 Definice

Elektrický oblouk je mohutný elektrický výboj v neředěných plynech (za normálního tlaku), udržující se samostatně, vyznačující se relativně vysokou proudovou hustotou při relativně nízkém napětí.

Parametry: proudy řádově 10^0 až 10^3 A
napětí 10^1 až 10^2 V

3.10.2 Zapálení oblouku a ionizace plynů

Podmínkou vzniku a udržování oblouku je přítomnost ionizovaného plynu mezi elektrodami. Ionizace plynu při zapalování oblouku může být vyvolána teplotou, vysokým napětím případně ionizačním zářením (UV, gama apod.). Ionizovaný plyn vede elektrický proud. Ionizací se plyn dostává do plazmatického skupenství. Ionizací se z elektricky neutrálních atomů plynu uvolní záporně nabitě elektrony a zůstanou kladně nabitě ionty. Ionizace probíhá tak, že na povrchu záporné elektrody - katody se vytvoří tzv. katodová

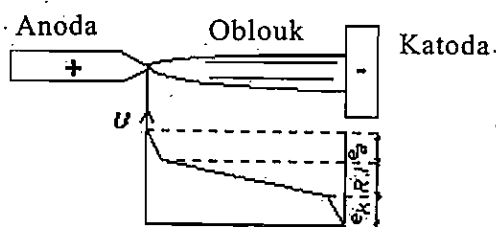
skvrna s největší teplotou a z ní jsou emitovány elektrony, které se srážejí s atomy plynu a předávají jim kinetickou energii, čímž dochází k rozbití atomů na elektrony a kladné ionty. Elektrony i kladné ionty jsou vnějším napětím mezi elektrodami uváděny do pohybu, čímž dochází k jejich srážkám s neutrálními atomy, které jsou rozbíjeny na další kladné ionty a elektrony. Na konci své dráhy elektrony dopadají na anodu, přičemž se jejich kinetická energie mění na teplo a tím se anoda ohřívá na vysokou teplotu asi 2400 °C. Kladné ionty naráží na katodu, kde přeměnou jejich kinetické energie dochází k ohřevu katody. Ohřátí katody na vysokou teplotu asi 2100 °C umožňuje další emisi elektronů. Na hranici obloukového sloupce je teplota nízká a tak zde dochází ke slučování elektronů s kladnými ionty - k rekombinaci. U stabilního oblouku jsou oba popsané pochody v rovnováze. **Teplota v obloukovém sloupci** dosahuje 6 000 až 8 000 °C, u plazmového oblouku, jehož průřez je extrémně zmenšen (intenzivním ochlazováním nebo stlačením magnetickým polem), je to až 30 000 °C v důsledku velké proudové hustoty.

3.10.3 Skladba oblouku

V blízkosti katody se vytvoří tenká **katodová oblast** o délce cca 10^{-4} mm, na níž nastává úbytek napětí asi 10 V. V blízkosti anody se vytvoří **anodová oblast** o délce 10^{-2} až 10^{-3} mm, zde dochází k úbytku napětí cca 4 až 8 V. Na anodě se rovněž tvoří anodová skvrna, na níž je největší teplota. Zvyšováním proudu teplota roste, poněvadž se skvrna zmenšuje a tím roste proudová hustota. Když se teplota anody přibližuje bodu varu, začne se kov odpařovat a vzniklé kovové páry prudce snižují ionizační potenciál - snižuje se napětí.

Napětí na oblouku U_{obl} je součtem dílčích napětí na katodové oblasti e_k , obloukovém sloupci $R.I$ a na anodové oblasti e_a .

$$U_{obl} = e_k + R.I + e_a$$



Obr. 3.26 Průběh napětí na oblouku

3.10.4 Tvar oblouku v závislosti na vnějších podmínkách

Tvar oblouku a jeho šířka jsou dány tvarem elektrod, tepelnou vodivostí plynu a vnějším ochlazováním a působením magnetického pole.

- **Vliv tvaru elektrod a druhu plynu**

Z hrotu netavící se elektrody stejně jako z drátové tavící se elektrody vychází oblouk z plochy malého průměru a plynule se zvonovitě (kuželově) rozšiřuje. Je-li druhá elektroda deska, vytvoří se na ní rozšířená základna obloukového kuželu. Průměr obloukového sloupce, resp. základny oblouku se nastaví dle použitého plynu. U plynu s malou tepelnou vodivostí, např. u argonu bude oblouk široký a proudová hustota nízká. U plynu s velkou tepelnou vodivostí, jako je např. CO_2 , se vytvoří oblouk malého průměru a s velkou proudovou

hustotou. Dle tepelné vodivosti můžeme používané plyny seřadit od největší CO_2 , He, N_2 , O_2 , H_2 , ..., Ar.

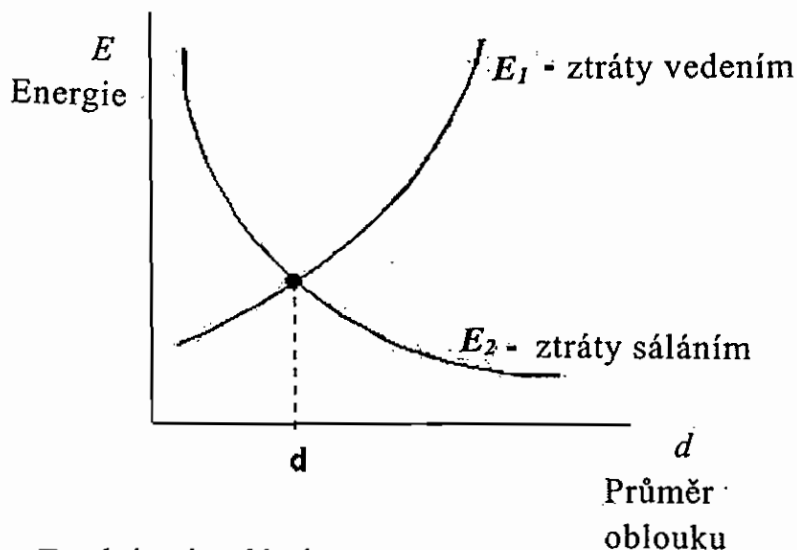
- **Vliv ochlazování**

Povrch (průměr) oblouku se nastaví dle principu minima tak, že teplo vznikající v oblouku je v rovnováze se ztrátami, které se odvádějí do okolí. Tepelné ztráty jsou zde dvojího druhu a to zářením E_1 a vedením do okolního vzduchu E_2 .

$$E_1 = k.T^4$$

$$E_2 = f(T, S)$$

kde: T - teplota plynu
S - plocha povrchu obloukového kuželu



Obr. 3.27 Tepelné ztráty oblouku

- **Vliv magnetického pole**

Kolem elektrického oblouku stejně jako kolem každého vodiče, kterým protéká proud, existuje magnetické pole. Jestliže je v blízkosti oblouku jiné magnetické pole, dochází k jejich vzájemnému silovému působení a výsledkem je vychylování oblouku nežádoucím směrem. Tento efekt nazýváme **foukání oblouku**. Foukání oblouku nastává zejména na krajích svarů a někdy je způsobeno zmagnetovanými polotovary. K potlačení tohoto nežádoucího ovlivňování svařovacího procesu postačí někdy vhodné umístění zemnicích svorek, v horších případech je nutno provést odmagnetování dílů. Při svařování střídavým proudem se foukání oblouku neprojevuje.

3.10.5 Tepelná bilance energie v oblouku

Při hoření oblouku vzniká teplo $Q_c = A = U \cdot I \cdot t$. Toto teplo se rozdělí na část, která se spotřebuje na ohřev anody Q_a a katody Q_k a na část, která se z oblouku odvede do okolního prostředí Q_v :

$$Q_c = Q_a + Q_k + Q_v$$

U metod s tavící se elektrodou jsou první dvě složky užitečné, neboť se využijí na tavení základního a přídavného materiálu, třetí složka jsou ztráty. U metody WIG patří ke ztrátám i část tepla odvedená do netavící se elektrody, neboť se odvádí chladící vodou nebo vzduchem.

U svařování obalenou elektrodou a pod tavidlem patří mezi ztráty též složka spotřebovaná na tavení obalu, resp. tavidla. Poměr části tepla využitého na tavení základního a přídavného materiálu k celkovému teplu oblouku je tzv. **účinnost svařovacího procesu η** :

$$\eta = \frac{Q_a + Q_k}{Q_c}$$

Účinnost procesů při svařování metodami:	121 (ATS)	0,8 až 0,9
	111 (ROS)	0,75 až 0,85
	135/131(MIG/MAG)	0,7 až 0,8
	141 (WIG)	0,5 až 0,65

Tepelný příkon do svarové lázně q - důležitý parametr ovlivňující vlastnosti svarového spoje:

$$q = \eta \cdot \frac{60 \cdot U \cdot I}{1000 \cdot v_{sv}}$$

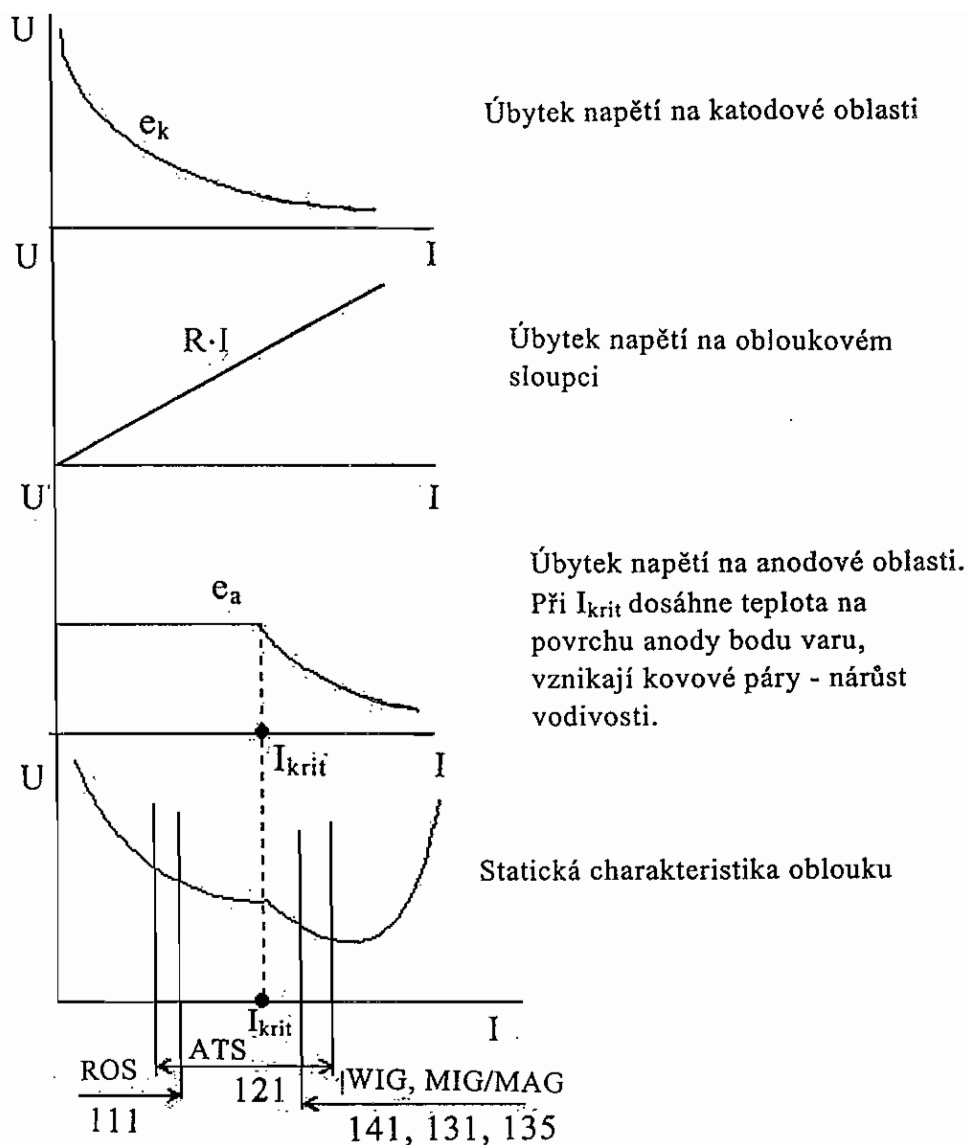
kde: η – účinnost svařovacího procesu
 U, I - svařovací parametry [V, A]
 v_{sv} - rychlost svařování [cm/min.]
 q - tepelný příkon [kJ/cm]

3.10.6 Statická charakteristika oblouku

Změnou délky oblouku se mění napětí na oblouku. Se změnou proudu se mění rozměry skvrn, proudová hustota, ale také elektrická vodivost obloukového sloupce. Odpor sloupce je tedy nelineární a velkou měrou závisí na proudu. Měřením napětí v závislosti na měnícím se proudu při konstantní délce oblouku získáme tzv., **statickou charakteristiku oblouku**. Její tvar lze odvodit z rovnice napěťových úbytků na oblouku:

$$U_{obl} = e_k + R \cdot I + e_a$$

Vyneseme-li do diagramů závislosti jednotlivých členů na proudu, superpozicí dílčích průběhů dostaneme **statickou charakteristiku oblouku** – viz následující obrázek:



Obr. 3.28 Statické charakteristiky oblouků

3.10.7 Normalizované charakteristiky

Pro vyšetřování vlastností zdrojů proudu pro obloukové svařování byly v evropské normě EN 60974-1 stanoveny smluvní charakteristiky nahrazující stoupající větev statické charakteristiky oblouku, tzv. hodnoty normalizovaného pracovního napětí pro jednotlivé metody svařování:

1. Ruční obloukové svařování obalenými elektrodami
 - pro I do 600 A $U=(20+0,04.I)$ V
 - pro I nad 600 A $U= 44$ V
2. Svařování WIG a plazma
 - pro I do 600 A $U=(10+0,04.I)$ V
 - pro I nad 600 A $U= 34$ V
3. Svařování MIG/MAG
 - pro I do 600 A $U=(14+0,05.I)$ V
 - pro I nad 600 A $U= 44$ V

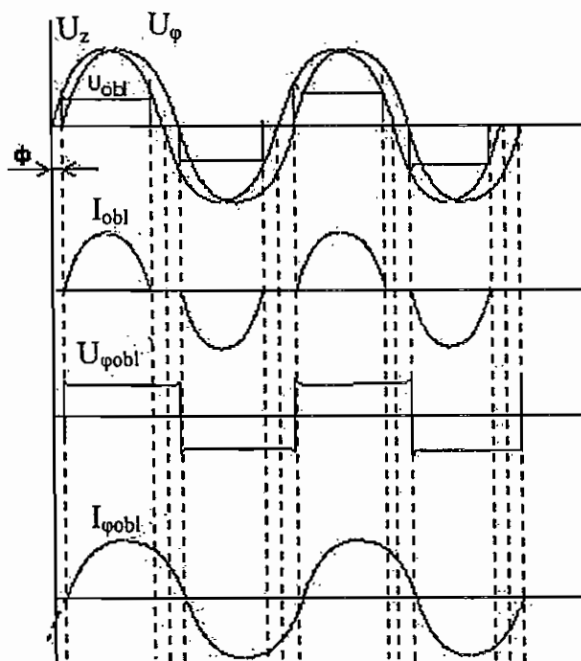
4. Svařování pod tavidlem

pro I do 600 A $U=(20+0,04.I)$ V
pro I nad 600 A $U= 44$ V

3.10.8 Oblouk napájený střídavým proudem

U stejnosměrného proudu je přívod energie do oblouku plynulý - konstantní, takže tepelná rovnováha vede k ustálení procesu. Při střídavém proudu je průměrný výkon též konstantní, ale okamžité hodnoty tepelného příkonu se mění s frekvencí, takže nejsou-li udělána zvláštní opatření, oblouk v každé půlperiodě naskočí a opět zhasne viz obrázek. Vřazením vhodné indukčnosti dojde k fázovému posunu proudu o úhel ϕ vůči napětí zdroje U_z , což zajistí podmínky pro nepřetržité hoření oblouku. Dokonalejší zdroje mají pro tento účel zvláštní tlumivku, u jednoduchých zdrojů se tento účinek zajišťuje vlastní rozptylovou indukčností. Při svařování střídavým proudem se nevyskytuje foukání oblouku.

Legenda:	
U_z	– napětí zdroje
U_ϕ	– složka napětí do směru proudu
U_{obl}	– napětí na oblouku bez přidavné tlumivky
$U_{\phi obl}$	– napětí na oblouku s vřazenou tlumivkou
I_{obl}	– proud obloukem bez tlumivky
$I_{\phi obl}$	– proud s tlumivkou



Obr. 3.29 Průběh elektrických veličin oblouku

3.10.9 Přenos materiálu v oblouku

Způsob přenosu materiálu z tavicí se elektrody do tavné lázně závisí na metodě svařování, druhu materiálu elektrody, proudové hustotě, velikosti napětí na oblouku a též na druhu plynu, v němž oblouk hoří. Obecně tento proces probíhá tak, že teplem z oblouku dochází k tavení konce elektrody a na čele elektrody se začne tvořit kapka tekutého kovu. Na tuto kapku působí jednak gravitační síla a zejména síla vyvolaná působením magnetického pole kolem elektrody. Působením této elektromagnetické síly, která převyšuje sílu gravitační, dochází ke zaškrcování kapky, které způsobí náhlé zvýšení odtrhující síly a pokud je mezi kapkou a kovovou lázní dostatečná vzdálenost, dojde k odtržení kapky a její vystřelení v osovém směru.

Popsanému jevu říkáme pinch efekt, jeho zásluhou je možnost svařovat i v nucených polohách. Je-li vzdálenost mezi čelem kapky a kovovou lázní malá, kapka se dotkne kovové lázně a dojde ke zkratu. Při zkratu záleží na velikosti rychlosti podávání drátu (svařovacím

proudu), při nízké rychlosti vzniklý zkratový proud přispěje k rychlému odtavení a utržení kapky a k opětovnému zapálení oblouku bez explozivního jevu. Svařuje-li se příliš vysokou rychlostí podávání drátu (velkým proudem), vzniklý zkrat způsobí explozi kovové lázně a její nežádoucí rozstřík do okolí. Z uvedeného popisu vyplývá, že v zásadě je možno pracovat s krátkým nebo dlouhým obloukem.

Krátký oblouk se používá při zkratovém neboli smáčivém procesu, pracuje se s nízkými parametry a je vhodný pro svařování tenkých plechů, svařování kořenových housenek úkosových spojů a pro svařování v nucených polohách.

Dlouhý oblouk, který se nastavuje při vyšších napětích na oblouku, umožňuje pracovat s velkou podávací rychlostí a velkou proudovou hustotou. Přenos materiálu je kapkový bezzkratový. Zvyšováním proudové hustoty roste počet kapek a zmenšuje se jejich objem, přenos se změní na sprchový. Dalším zvyšováním proudové hustoty přejde proces na přenos sprchový rotační, kdy proud kapiček v dlouhém oblouku rotuje kolem osy drátu a vytváří širokou housenku. Sprchový proces vytváří širokou svarovou housenku, dosahuje velký výkon odtavení svařovacího materiálu. Sprchový proces je vhodný pro svařování výplňových housenek úkosových a koutových svarů v poloze vodorovné shora.

Hranice mezi jednotlivými druhy přenosů - zkratovým, kapkovým a sprchovým - jsou ovlivňovány materiálem a průměrem svařovacího drátu, metodou svařování, velikostí napětí na oblouku a v neposlední řadě druhem ochranného plynu.

Moderní svařovací zařízení pro MIG/MAG jsou vybaveny řídicí elektronikou, která umožňuje pracovat v pulsním režimu nebo dokonce v tzv. synergetickém režimu. Pulsní režim pracuje s pulsním svařovacím proudem, který pravidelně mění hodnotu mezi horní a dolní úrovní. Pulsní režim je vhodný pro spolehlivé svařování slabých plechů a kořenových housenek a usnadňuje přechod na sprchový proces při nižším průměrném proudu. Synergetický režim umožňuje ovládnutí procesu pouze prvkem pro nastavení podávací rychlosti - odtavovacího výkonu. Optimální nastavení ostatních parametrů zajišťuje mikroprocesorová jednotka s programy pro svařování nejrůznějších materiálů.

Literatura

- HEŘMAN, J. a kol.: Příručka siloproudé elektrotechniky. SNTL Praha, 1986.
FETTER, F.: Obecná elektrotechnika pro strojní inženýry. SNTL Praha, 1967.
KŘÍŽ, R., VÁVRA, P. a kol.: Strojírenská příručka, svazek 1. Scientia a SNTL Praha, 1992.

4. ZDROJE PROUDU PRO OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ

4.1 Úvod, norma ČSN EN 60974-1

4.1.1 Předmět normy

Na zdroje proudu pro obloukové způsoby svařování se vztahuje evropská norma ČSN EN 60974-1 Zařízení pro obloukové způsoby svařování - Část 1: Zdroje svařovacího proudu ed. 2, vydaná jako ČSN 05 2205. Norma obsahuje technické a bezpečnostní požadavky.

4.1.2 Podmínky okolního prostředí

Zdroje musí být schopné spolehlivě fungovat při teplotě okolního vzduchu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při relativní vlhkosti vzduchu do 50 % při teplotě $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a max. 90 % při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, v nadmořské výšce do 1000 m.

4.1.3 Stupeň ochrany krytem

Minimálně IP21 pro práci v suchých prostorách nebo IP23 pro práci venku pod střechou, případně IP44 pro prostory se zvýšeným nebezpečím úrazu elektrickým proudem. Označení je uvedeno dle normy IEC 60529.

4.1.4 Popis výkonového štítku na zdroji

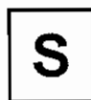
Zdroj musí mít tzv. výkonnostní štítek s údaji o druhu zdroje, napájecí hodnoty (napětí, proud, pojistky), na výstupní straně napětí naprázdno, rozsah pracovního napětí, rozsah pracovních proudů s uvedeným pracovním cyklem (zatěžovatelem) atd.

4.1.5 Napětí naprázdno

Napětí naprázdno je napětí na svorkách zapnutého zdroje, z něhož se neodebírá proud. Hodnota maximálního dovoleného napětí naprázdno je předepsána pro níže uvedené případy:

- 1) v prostředí se zvýšeným nebezpečím úrazu elektrickým proudem (práce v uzavřených nádobách, ve výškách, omezený prostor, ve vlhku apod.):

Stejnoseměrný zdroj:	špičková hodnota	113 V	
Střídavý zdroj	špičková hodnota	68 V	efektivní hodnota 48 V
Zdroje pro tuto kategorii musí mít označení			



- 2) v prostředí bez zvýšeného nebezpečí úrazu elektrickým proudem :

Stejnoseměrný zdroj:	špičková hodnota	113 V	
Střídavý zdroj	špičková hodnota	113 V	efektivní hodnota 80 V

3) u zvláštních metod (plazma):

Stejnoseměrný zdroj:	špičková hodnota	710 V	
Střídavý zdroj	špičková hodnota	710 V	efektivní hodnota 500 V

4.1.6 Pracovní cyklus (zatěžovatel)

Pracovní cyklus - zatěžovatel X (dříve doba zapnutí DZ) se udává v % z intervalu 10 minut, např. 1000 A 60 % značí, že proud 1000 A smí být odebírán maximálně po dobu 6 minut a 4 minuty musí být zdroj bez odběru, aby vychladl. Dle starších norem byl předepsaný interval pouze 5 minut.

4.2 Rozdělení zdrojů podle konstrukce

4.2.1 Rotační zdroje - dynamo , generátory

Dnes se již používají jen málo, jejich konstrukce sestává ze svařovacího dynamo (nebo ve speciálních případech ze střídavého generátoru) a na jedné hřídeli umístěného hnacího motoru. Pro dílenské použití byl jako hnací motor používán asynchronní indukční motor, pro montážní práce se používá hnací motor spalovací. Výhodou rotačních zdrojů jsou velmi dobré dynamické vlastnosti (svářečky Triodyn, Praga atd.) necitlivé k poklesům napětí v síti. Nevýhodou je velká hmotnost, velké ztráty a zhoršování účinnosti sítě při běhu naprázdno.

4.2.2 Transformátory

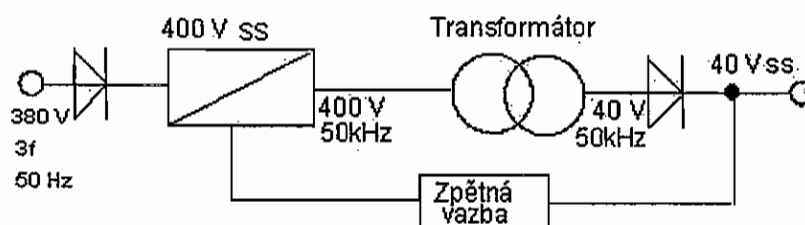
Svařovací transformátory si stále udržují pozici levného svařovacího zdroje pro nenáročné, např. opravářské práce. Možnost širšího používání transformátorů je omezena sortimentem vhodných obalených elektrod. Svařovací transformátory se však stále používají jako zdroje proudu u mechanizovaného svařování pod tavidlem, zejména u vícedrátových metod. Regulace napětí přepínáním odboček, regulace proudu posuvným magnetickým jádrem nebo transduktorem. Výhodou transformátorů je nižší pořizovací cena, neobsahují pohyblivé součásti, tzn. jednodušší údržba, nefouká oblouk. Nevýhodou je omezený sortiment obalených elektrod, závislost na kolísání napětí v síti, těžkopádná a málo citlivá regulace (převážně umístěná na stroji bez možnosti dálkového ovládní), nízký účinník $\cos\varphi$, nerovnoměrně zatěžují síť (protože jsou pouze jednofázové).

4.2.3 Usměrňovače

Svařovací usměrňovače se skládají ze svařovacího transformátoru a polovodičového usměrňovače. Podle velikosti zdroje se používá transformátoru jednofázového nebo třífázového. Usměrňovače levnější jsou provedeny jako neřízené a regulace proudu je prováděna regulací na transformátoru. Dokonalejší regulaci proudu umožňují řízené usměrňovače s tyristory. Svařovací usměrňovače obsahují většinou vyhlazovací tlumivku, která přispívá ke zlepšení dynamických vlastností. Výhodou svařovacích usměrňovačů jsou malé ztráty naprázdno, rovnoměrné zatěžování sítě, neobsahují rotační díly - snadná údržba. Nevýhodou je poměrně značná hmotnost a u jednodušších konstrukcí horší dynamické vlastnosti.

4.2.4 Elektronické zdroje

Elektronické zdroje jsou nazývány různě - invertory, střídače, měniče. Jejich podstatu tvoří princip primárně taktovaného zdroje. Na začátku je dvoucestný jednofázový nebo třífázový usměrňovač, který usměrňuje síťové napětí. Získaným stejnosměrným napětím se napájí srdce měniče - střídač, který ze stejnosměrného napětí vyrábí střídavé napětí s frekvencí řádově tisíckrát větší než v síti. Toto střídavé napětí se transformuje na úroveň vhodnou pro svařování a usměrní se. Vzorek výstupního napětí se vyhodnocuje a vede se zpětnou vazbou do řídicích obvodů střídače tak, aby výstupní napětí odpovídalo zvolenému průběhu - viz obr. 4.1



Obr. 4.1 Schéma invertoru

Obrázek je pro jednoduchost nakreslen v jednodrátovém provedení. Uvedené zapojení umožnilo radikálně snížit hmotnost zdroje a zejména svařovacího transformátoru, který díky zvýšené frekvenci napětí je podstatně menší a jeho jádro je vyrobeno z feritového materiálu. Řízení popsaného zdroje se zpravidla provádí mikroprocesorem, což dovoluje v širokém rozsahu měnit statické i dynamické vlastnosti zdroje a tak používat stejný zdroj pro různé metody svařování. Zdroje tohoto typu umožňují svařování v pulsním a synergetickém režimu.

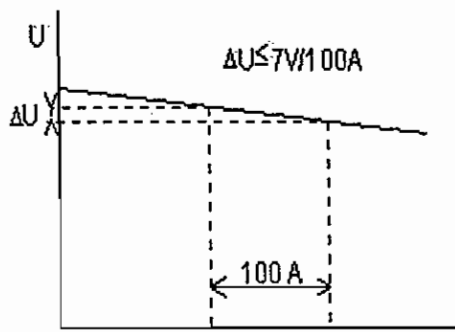
Mezi výhody elektronických zdrojů patří malá hmotnost, lehká obsluha, univerzálnost, vhodnost pro automatické procesy, vysoká účinnost, dobrý účinník. K nevýhodám elektronických zdrojů patří především vyšší pořizovací náklady, drahý servis.

4.3 Charakteristika svařovacích zdrojů

4.3.1 Statické charakteristiky

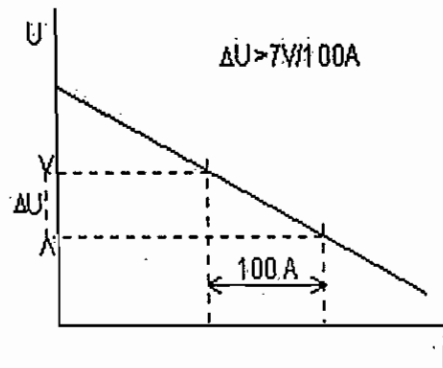
Statická charakteristika zdroje vyjadřuje závislost svorkového napětí na velikosti odebíraného proudu. Rozeznáváme dva základní typy statických charakteristik:

- charakteristika s konstantním napětím (jinak zvaná tvrdá, plochá), při níž pokles svorkového napětí při zvýšení odběru proudu o 100 A je menší než 7 V - viz obr. 4.2 a,
- charakteristika s konstantním proudem (jinak zvaná strmá, klesající, měkká), při níž pokles svorkového napětí při zvýšení odběru proudu o 100 A je větší než 7 V - viz obr. 4.2 b.



Statická charakteristika s konstantním napětím (plochá, tvrdá)

Obr. 4.2 a

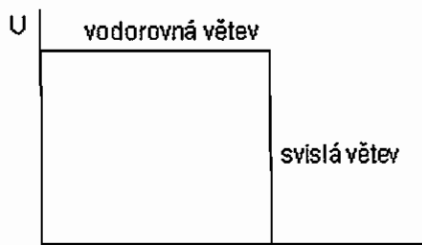


Statická charakteristika s konstantním proudem (klesající, strmá, měkká)

Obr. 4.2 b

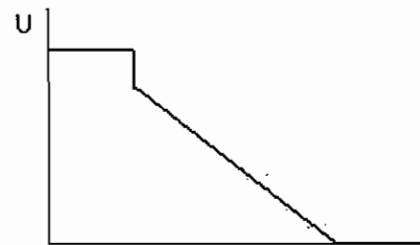
Vedle uvedených hlavních statických charakteristik můžeme uvést několik dalších:

- c) **charakteristika elektronická**, uvedený průběh ukazuje možnosti elektronického zdroje - můžeme mít charakteristiku tvrdou i měkkou,
- d) **charakteristika zdroje pro celulóznové elektrody**, na začátku se zvýšeným napětím, pak klasická klesající.



elektronická charakteristika

Obr. 4.3 a

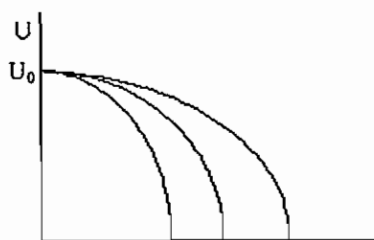


charakteristika zdroje pro celulóznové elektrody

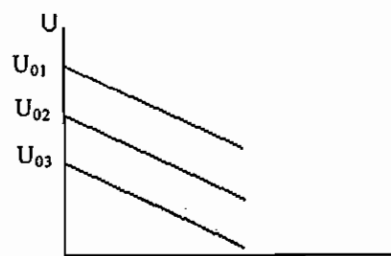
Obr. 4.3 b

-regulace statické charakteristiky:

- pevné napětí naprázdno
- proměnné napětí naprázdno



pevné napětí naprázdno



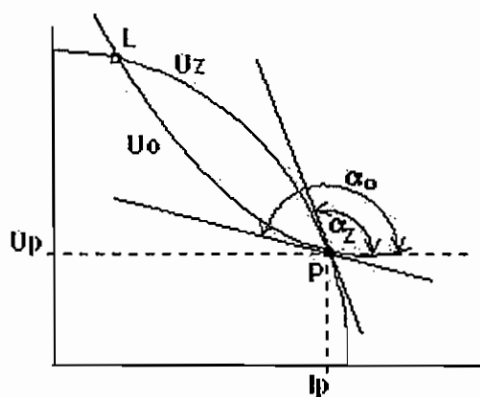
proměnné napětí naprázdno

Obr. 4.4 Regulace statických charakteristik

4.3.2 Pracovní bod

Pracovní bod je průsečík statické charakteristiky oblouku se statickou charakteristikou zdroje – viz obr. 4.5. Je to bod, charakterizovaný napětím U_p a proudem I_p . Podmínkou ustavení stabilního pracovního bodu je vhodná statická charakteristika zdroje, tzn. že charakteristiky se musí protínat. Přiložený obrázek ukazuje obvyklou situaci, kdy statická charakteristika oblouku protíná statickou charakteristiku ve dvou bodech. Pracovní bod se ustaví v průsečíku **P**, v němž je splněna podmínka stability, tzn. tečna ke statické charakteristice oblouku musí mít směrnici větší, než tečna ke statické charakteristice zdroje.

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta I} - \frac{\Delta U_z}{\Delta I} \geq 0$$



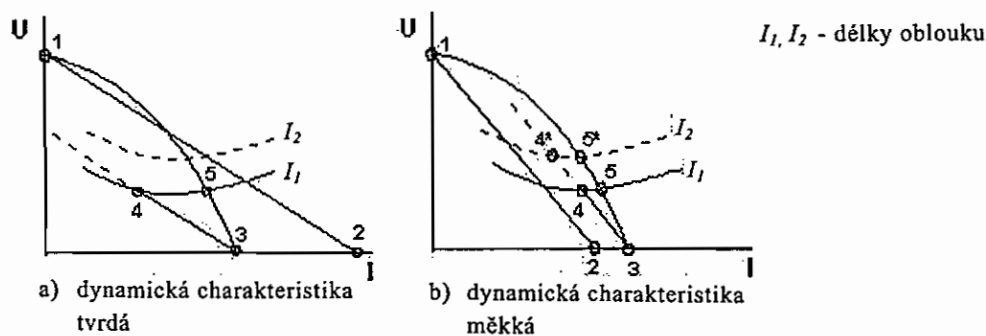
$$\frac{\Delta U_0}{\Delta I} = \text{tg } \alpha_0 \quad \frac{\Delta U_z}{\Delta I} = \text{tg } \alpha_z$$

kde: U_0 - statická charakteristika oblouku
 α_0 - úhel tečny ke statické charakteristice oblouku
 U_z - statická charakteristika zdroje
 α_z - úhel tečny ke statické charakteristice zdroje
 $P(U_p, I_p)$ - pracovní bod

Obr. 4.5 Pracovní bod ve statické charakteristice zdroje

4.3.3 Dynamická charakteristika

Způsob jak zdroj reaguje na změnu zatížení, např. na zkrat při zapalování oblouku a jak rychle přejde do ustáleného stavu, závisí na jeho dynamické charakteristice – viz obr. 4.6.



Obr. 4.6 Dynamické charakteristiky

Průběh dynamické charakteristiky je patrný z obrázku 4.6.

Při doteku elektrody na základní materiál dojde ke zkratu, napětí zdroje naprázdno klesne na nulu dle přímky 1-2, z bodu 2 se v rámci odeznění přechodového jevu přesune na statickou charakteristiku do bodu 3. Při oddálení elektrody naskočí oblouk o délce l_1 a napětí vzroste na hodnotu v bodě 4 a po odeznění přechodového jevu se přesune do bodu 5 na statické charakteristice. U zdroje s dynamickou charakteristikou tvrdou a) oblouk naskočí pouze při nastavení kratší vzdálenosti l_2 , při vzdálenosti l_2 se oblouk nezapálí. U zdroje s dynamickou charakteristikou měkkou oblouk se zapálí i při delší vzdálenosti.

Dynamická charakteristika zdroje je určená jeho konstrukcí, tj. uspořádáním jeho vinutí a magnetického obvodu. Dynamické vlastnosti zdroje ovlivňuje i přídavná tlumivka. Vhodné dynamické chování zdroje je zvlášť důležité při svařování tavící se elektrodou v ochranných plynech.

4.4 Stabilita oblouku, regulace procesu s tavící se elektrodou

4.4.1 Podmínky pro hoření stabilního procesu

Rozsahy proudů vhodných pro jednotlivé svařovací procesy byly vyznačeny v kapitole o statické charakteristice oblouku. Z kapitoly 3.10.6 vyplývá, že směrnice tečny k charakteristice zdroje musí být menší než směrnice tečny k charakteristice oblouku. Z toho vyplývá, že pro svařování obalenou elektrodou musí být použit zdroj s klesající charakteristikou, pro svařování tavící se elektrodou v plynech je naopak nutný zdroj s charakteristikou plochou. Pro svařování pod tavidlem drátovou elektrodou o průměru větším než 2,5 mm je vhodná klesající charakteristika, pro svařování elektrodou menších průměrů je možno použít zdroj s charakteristikou plochou.

Při svařování metodami MIG/MAG (131/135/136), ATS (121) se mohou na povrchu dílů vyskytovat různé nerovnosti - vyvýšeniny nebo propadliny, které způsobují náhlé zkrácení nebo prodloužení oblouku. Každá změna délky obloukového sloupce způsobí určitou změnu elektrických parametrů na oblouku. Kvůli zajištění stability oblouku je nutno v krátkém čase vhodnou regulací tyto výkyvy eliminovat. Existují v zásadě dva druhy regulace svařovacího procesu - regulace dle změny napětí na oblouku a regulace dle změny proudu.

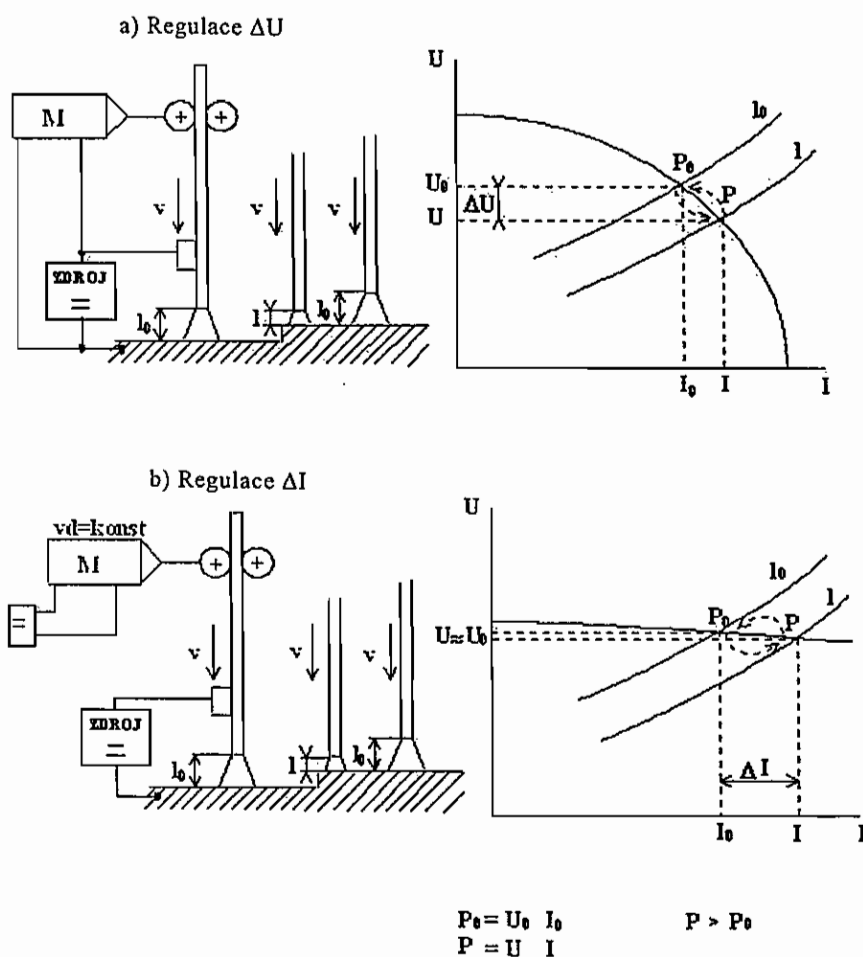
4.4.2 Regulace dle změny napětí - ΔU

Tento způsob regulace se používá u svařování pod tavidlem drátovou elektrodou o průměru větším než 2,5 mm. Podmínkou správné funkce je svařovací zdroj s klesající charakteristikou (se zdrojem s plochou charakteristikou tato regulace nefunguje). Rychlost podávání drátové elektrody je závislá na napětí na oblouku. Průběh regulace je znázorněn na obrázku 4.7 a), při zkrácení oblouku z délky l_0 na l nastane zmenšení napětí z U_0 na U , tato změna napětí je vyhodnocena řídicí elektronikou a způsobí snížení rychlosti podávání drátu z v_0 na v , snížení podávací rychlosti vyvolá odtavení drátu do větší délky čímž se zvětší délka oblouku až na původní délku l_0 s následným zvýšením napětí na původní hodnotu U_0 a zvýšením rychlosti podávání na výchozí hodnotu v_0 , a tím je regulační postup ukončen. Stejným mechanismem regulace působí i v opačném směru, tj. když nastane prodloužení oblouku. Tento

způsob regulace se někdy nazývá regulace vnější, rychlost regulace je relativně pomalá, neboť odezva na narušení délky oblouku trvá cca 0,25 sec.

4.4.3 Regulace dle změny proudu - ΔI

Tento způsob regulace - nazývaný též samoregulace - se používá u svařování v ochranných plynech MIG/MAG a u svařování pod tavidlem drátovou elektrodou o průměru pod 2,5 mm a rovněž při navařování páskovou elektrodou pod tavidlem. Regulace je neúčinnější se svařovacím zdrojem s plochou charakteristikou, ale pomaleji funguje i se zdrojem s klesající charakteristikou. Rychlost podávání elektrody je neměnná - konstantní. Regulace ΔI - viz obrázek 4.7 b) - pracuje tak že, při zkrácení oblouku z délky l_0 na l dojde ke snížení odporu obloukového sloupce R_0 na R , a tím dle Ohmova nastane zvýšení proudu z I_0 na I . Zvýšení proudu při neměnném (či málo změněném) napětí U způsobí zvětšení přiváděného výkonu do oblouku $P = U \cdot I$ (který je větší než původní výkon $P_0 = U_0 \cdot I_0$) a následně zvětšení odtavovací rychlosti drátu, tak dojde k prodloužení oblouku až na výchozí hodnotu, které vyvolá zvětšení odporu oblouku na hodnotu R_0 a snížení proudu na I_0 a snížení výkonu v oblouku na výchozí hodnotu P_0 , a tím je regulační pochod ukončen. Stejným mechanismem regulace působí i v opačném směru, tj. když nastane prodloužení oblouku. Tento způsob regulace, označovaný též jako regulace vnitřní, je mnohem rychlejší než předchozí, odezva na narušení délky oblouku trvá cca 0,004 sec.



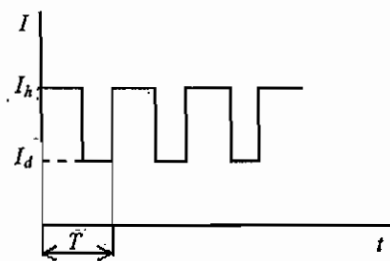
Obr. 4.7

Průběh regulace
a) napětí
b) proudu

4.5 Pulzní proud u MIG/MAG svařování

4.5.1 Výhody procesu s pulzním proudem

Při pulzním svařování se proud pravidelně mění mezi horní a dolní úrovní – viz obr. 4.8, přičemž dolní úroveň proudu stačí na udržování tavné lázně a horní úroveň vyvolá natavení a odtržení kapičky kovu z přídavného drátu. Nastavením vhodných úrovní proudu a odpovídající frekvence lze proces optimalizovat do té míry, že je možné řídit počet odtavujících se kapiček a tak nastavit sprchový proces při nižší střední proudové hustotě. Na spolehlivé svařování se spotřebuje méně energie, teplo je dávkováno, takže při svařování kořenových housenek a při svařování tenkých plechů nehrozí propadnutí lázně.



Obr. 4.8 Schéma průběhu pulzního proudu
kde: I_h - horní proud
I_d - dolní proud
T - perioda

4.5.2 Synergetický režim

Moderní svařovací zařízení jsou vybavena řídicí elektronikou, která umožňuje přizpůsobit vlastnosti svařovacího zdroje pro zvolený svařovací proces. Vedle pulsního svařování lze pracovat i v tzv. synergetickém režimu, což znamená, že proces se řídí pouze jedním prvkem pro řízení odtavovacího výkonu - rychlost podávání drátu, ostatní parametry jako je napětí, průběh proudu, vhodnou charakteristiku atd., nastavuje automaticky mikroprocesor podle zvoleného programu. Těchto programů dodává výrobce zařízení celou sadu pro různé druhy a průměry svařovacích drátů, různé ochranné plyny atd. Dodávané programy je možno upravit dle zkušeností svářeče nebo je možné vytvořit programy vlastní.

4.6 Úbytky napětí, rovnoměrné zatížení sítě, účinník $\cos \varphi$

4.6.1 Úbytek napětí

Úbytek napětí vzniká dle Ohmova zákona na každém rezistoru, kterým protéká proud. Při svařování vznikají úbytky napětí na svařovacích kabelech, šroubových spojích, na svorkách, v držáku elektrody, v kontaktní dýze svařovací pistole atd. Celkový úbytek napětí by neměl být větší než cca 2 V, aby nedocházelo k narušování svařovacího procesu. Pro zamezení vzniku

nežádoucích úbytků napětí je nutno dodržovat potřebné zásady, např. dimenzování svařovacích kabelů, kontrola šroubových spojení, dobrý stav kontaktních dýz atd.

Zvláštní případ úbytku napětí vzniká při svařování střídavým proudem, zde vlivem indukčnosti, např. kabelů stočených do svitku, případně nevhodným vedením kabelů po ocelové konstrukci, může docházet k nežádoucímu úbytku napětí v důsledku indukčního odporu - reaktance.

4.6.2 Rovnoměrné zatížení sítě, účinník $\cos \varphi$

Jednofázové spotřebiče - transformátory, usměrňovače - většího výkonu zatěžují pouze jednu, resp. pouze dvě fáze síťového rozvodu. Tento stav je nežádoucí, jelikož způsobuje nestejně úbytky napětí na jednotlivých fázích. Při zapojování takovýchto spotřebičů musí být zajištěno, pokud možno, jejich rozdělení na různé fáze.

Dalším sledovaným parametrem připojovaných spotřebičů je tzv. účinník $\cos \varphi$, který by měl být udržován na hodnotě blízké se 1,0. Úhel φ je fázový posun mezi střídavým proudem spotřebiče a střídavým síťovým napětím. Tento fázový posun vzniká, jestliže spotřebič nemá čistě reálný charakter. Zejména svařovací transformátory a nezatížené indukční motory silně zhoršují tento účinník. Při připojování na síť takovýchto spotřebičů je nutno přívod dimenzovat na tzv. **zdánlivý výkon**, pro který platí:

$$P_s = \frac{P}{\cos \varphi}$$

kde P je činný výkon.

Přívod musí být dimenzován na proud:

$$I = \frac{P_s}{U}$$

4.7 Doplnková zařízení svařovacích zdrojů

4.7.1 Startovací zařízení (zapálení oblouku u WIG)

Při svařování wolframovou elektrodou je nevýhodné startovat oblouk dotykem na základní materiál, poněvadž by došlo k odtavení elektrody a k nalegování svaru, je proto vhodný bezdotykový start. Bezdotykové zapálení oblouku se provede přivedením vysokého napětí na elektrodu a tím dojde k ionizaci plynu. Potřebná velikost napětí pro zapálení oblouku je několik tisíc voltů. Pro tyto účely jsou svařovací zařízení vybavena tzv. ionizátory, které vysoké napětí vyrábějí. Kvůli bezpečnosti se jedná o vysoké napětí zvýšené frekvence. V praxi může být ionizátor připojen na elektrodu pouze než naskočí svařovací oblouk, nebo např. při svařování hliníku střídavým proudem je ionizátor zapojen trvale.

4.7.2 Další vybavení svařovacích zdrojů

Elektronické řízení moderních svařovacích zařízení dovoluje výrobcům své výrobky vybavovat spoustou dalších netradičních doplňků jako jsou, např. dálkové ovládání, horký start u svařování tavící se elektrodou (MIG, MAG), kompenzace úbytku napětí na kabelech, náběh proudu, doběh proudu pro zavařování koncového kráteru, měřicí přístroje s pamětí a s rozhraním pro připojení k počítači atd.

Literatura

- KUNCIPÁL, J a kol.: Teorie svařování. SNTL Praha, 1986.
- PLÍVA, L.: Čs. stroje a pomocná zařízení pro obloukové, elektrostruskové a odporové svařování. SNTL Praha, 1980.
- MINAŘÍK, V.: Obloukové svařování. Scientia Praha, 1998.
- ČSN 33 2000-4-41 Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení. Ochrana před úrazem elektrickým proudem.
- ČSN 33 2000-4-46 Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení. Odpojování a spínání (46N6 Zásuvková spojení).
- ČSN 33 2000-5-54 Elektrotechnické předpisy. Výběr a stavba elektrických zařízení. Uzemnění a ochranné vodiče.
- ČSN 05 2250 Svařování. Držáky elektrod pro obloukové svařování obalenou elektrodou. Technické požadavky a zkoušení.
- ČSN EN 60974-11 Zařízení pro obloukové svařování. Část 11: Držáky elektrod.
- ČSN EN 60974-1 Zařízení pro obloukové svařování. Část 1: Zdroje svařovacího proudu.
- ČSN EN 60974-12 Zařízení pro obloukové svařování. Část 12: Spojovací zařízení pro svařovací vodiče.
- ČSN 05 2309 Zváranie. Oblúkové zväračky. Technické předpisy.
- ČSN EN 50078 Hořáky a pistole pro obloukové svařování.

5. RUČNÍ OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ OBALENOU ELEKTRODOU

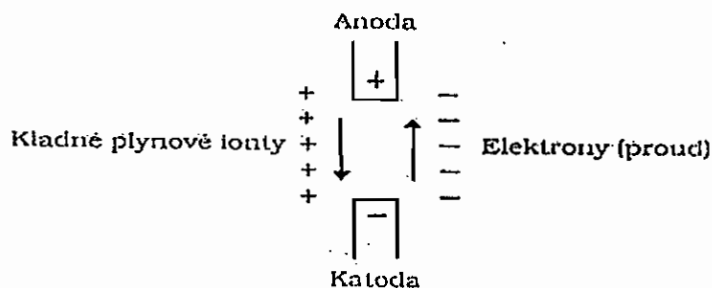
Počátky svařování elektrickým obloukem sahají již do konce 19. století. Teprve objev obalené elektrody na počátku dalšího století přinesl široké uplatnění svařování elektrickým proudem obalenou elektrodou v průmyslové výrobě (v oblastech vojenské techniky, lodí, ocelových konstrukcí mostů, jeřábů a skeletů budov).

5.1 Svařování obalenou elektrodou

5.1.1 Princip a charakteristika oblouku

Zdrojem tepla při obloukovém svařování obalenou elektrodou je elektrický oblouk, který hoří mezi obalenou elektrodou a svařovaným materiálem. Při tomto procesu dochází k tavení elektrody a povrchu základního materiálu. Roztavený kov elektrody a tavený struskový obal přechází sloupcem oblouku do roztavené lázně svařovaného materiálu. Po vzájemném smíšení roztavených materiálů se vytváří svar, který je chráněn struskovým přikrovem.

Svařovací oblouk tvoří elektrický výboj kruhového průřezu, který prochází horkým ionizovaným plynem (plazmou). Při svařování obalenou elektrodou je ionizace plynu do značné míry ovlivněna složením taveného obalu. Podmínkou pro udržení svařovacího oblouku je, že proud musí být dostatečně velký a napětí vyšší než je ionizační napětí. V oblouku jsou na žhavé katodě uvolňovány elektrony, které procházejí sloupcem vodivé plazmy na anodu. Poměry přesunu částic v elektrickém oblouku jsou patrné z následujícího obrázku.



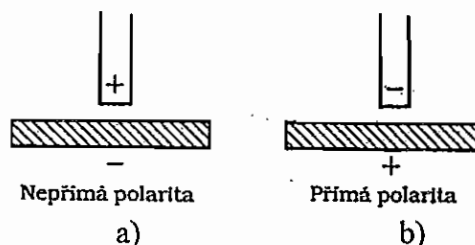
Obr. 5.1 Přesuny částic v elektrickém oblouku

Elektrický oblouk se skládá z:

- katodové skvrny, která se nalézá na povrchu žhavé katody,
- oblasti katodového úbytku napětí, nalézající se těsně u katody,
- ze sloupce oblouku, tvořeného plazmatem, který se nalézá mezi katodou a anodou,
- oblasti anodového úbytku napětí, nacházející se těsně nad anodou,
- anodová skvrna je oblast na anodě, kde jsou pohlcovány elektrony.

Elektrický oblouk má výrazné tepelné a mechanické účinky na své okolí. Obecně platí, že na kladné elektrodě se získá více tepla než na záporné, neboť katoda se ochlazuje termoemisí elektronů a anoda se jejich dopadem zahřívá. Tepelný poměr na elektrodách je závislý na materiálu elektrody, prostředí v němž oblouk hoří a na druhu elektrického proudu. Proto při obloukovém svařování obalenou elektrodou stejnosměrným proudem

využíváme tohoto efektu volbou polarity oblouku. Je-li na elektrodě pól mínus a na základním materiálu pól plus, hovoříme o přímé polaritě oblouku. Při opačném připojení, hovoříme o nepřímé polaritě. Uvedené způsoby připojení elektrody jsou patrné z následujícího obrázku.



Obr. 5.2 Způsoby připojení elektrody

5.1.2 Svařovací zdroje proudu

Pro obloukové svařování obalenými elektrodami se dle potřeby využívají zdroje střídavého nebo stejnosměrného proudu.

Zdrojem proudu při **svařování střídavým proudem** jsou převážně svařovací transformátory. Nastavení potřebného svařovacího proudu se u těchto zdrojů provádí:

- rozptylovým jádrem, které je posuvné mezi primárním a sekundárním vinutím,
- sekundárním přepínačem, který tvoří vložené jádro s vinutím, zapojeným prostřednictvím přepínače na sekundární straně sekundárního vinutí transformátoru,
- primárním přepínačem, kterým se mění počet závitů na primárním vinutí transformátoru, a tím se mění velikost takto nastaveného proudu.

Předností svařovacích transformátorů je - jejich jednoduchost, nízké pořizovací náklady a nenáročná údržba. Nevýhodou je, že se nedají dálkově regulovat, ke svařování se musí používat elektrody s vhodně upraveným obalem, nelze s nimi svařovat ve všech polohách. Proto se v současné době stále více využívají zdroje, které umožňují **svařování stejnosměrným proudem** ve všech polohách, a to v dílně i na venkovních montážích. Jejich předností je, že mohou být ovládány na dálku, jsou lehké, snadno ovladatelné. Částečnou nevýhodou těchto zdrojů je, že jsou dražší než klasické svařovací transformátory.

Existuje řada druhů zdrojů stejnosměrného proudu a to:

- točivé svařovací zdroje (svařovací agregáty - dynama),
- netočivé svařovací zdroje – usměřňovače, ve kterých se svařovací proud upravuje transduktorovým nebo tyristorovým řízením a nebo sekundárním taktováním,
- nová generace svařovacích usměřňovačů je provedena na bázi invertorů.

Principy a funkce uvedených zdrojů jsou uvedeny v části pojednávající o základech elektrotechniky a elektrickém oblouku.

Nezbytnou **součástí výbavy každého svařovacího zařízení** je:

- dálkové ovládání svařovacího proudu – regulátor s prodlužovacím kabelem (dodávané podle charakteru svařovacího zdroje a jeho výrobce),
- svařovací kabely – jsou určeny k propojení svařovacího zdroje s držákem elektrod a svařovací svěrkou, upnutou k svařovanému materiálu, jejich průřez a izolační provedení musí odpovídat normě ČSN 34 7572,

- držáky elektrod – jejich provedení je odvislé od proudového zatížení a upínaného průměru elektrody, provedení se řídí normou ČSN EN 60974-11,
- svařovací svěrky – jejich konstrukce a funkce závisí na proudovém zařízení a použití.

5.2 Přídavné materiály

Výroba obalených elektrod pro ruční svařování elektrickým obloukem je náročným velkosériovým procesem, který je v současné době ve všech fázích výroby plně mechanizován a kontrolován. Před zahájením výroby elektrod je kladen velký důraz na pečlivý výběr a sledování metalurgicko výrobních pochodů při výrobě polotovarů jádrového materiálu (drátu) i jednotlivých přísad pro výrobu obalu elektrod. Jejich výroba probíhá v několika dílčích fázích, které na sebe souvisle navazují. Proces výroby elektrod lze rozdělit na fázi:

- přípravy jádrového materiálu elektrod (úprava polotovaru – drátu),
- zpracování surovin na obal (příprava suchých kmenů pro obaly elektrod),
- úprava pojidel,
- vlastní výroba elektrod, která se skládá z výroby mokrých obalových hmot, nanášení obalu na jádro – drát, sušení, zakončujících úprav (např. označení jakosti, zabroušení konce), zkoušení, balení, skladování a expedice.

Pro ruční svařování elektrickým obloukem se používají obalené elektrody, které se skládají z jádra (drátu) a obalu elektrody. Jádro elektrody tvoří kov, který se v oblouku taví souběžně s obalem. Prostřednictvím elektrického oblouku je roztavený kov přenášen do svaru a po promísení s nataveným základním materiálem vytváří svarový spoj. Obal elektrody příznivě ovlivňuje proces a techniku svařování, výtěžnost elektrody a výslednou jakost svaru. Elektrody pro ruční obloukové svařování můžeme obecně rozdělit podle jakosti na:

- elektrody pro svařování nelegovaných ocelí,
- elektrody pro svařování legovaných ocelí,
- elektrody pro svařování neželezných kovů,
- elektrody pro navařování vrstev se zvláštními vlastnostmi,
- elektrody pro speciální použití (např. pro řezání).

5.2.1 Obal elektrod a jeho funkce

V prvopočátcích svařování se používaly k obloukovému svařování holé dráty bez obalu. Dnes se výhradně používají elektrody s obalem, který je nalisován na jádrový drát v průběhu jejich výroby. Podle provedené tloušťky obalu členíme elektrody na:

- tence obalené,
- středně obalené,
- tlustě obalené,
- velmi tlustě obalené.

Hlavní funkce obalu elektrody jsou:

- ochrana svarového kovu před účinky atmosféry (obal obsahuje plynotvorné látky, např. celulózu, která vytváří ochrannou atmosféru),
- usnadnění zapalování a stabilizace hoření oblouku (obal obsahuje prvky ve formě solí alkalických kovů – sodíku, draslíku, vápníku, titanu, které zlepšují ionizační vlastnosti oblouku),

- ovlivnění metalurgických pochodů při tavení a chladnutí taveného kovu (obal obsahuje struskotvorné přísady – magnezit, křemičitany, dolomit, živec, vápenec, kazivec, mastek aj., které vytváří strusku, příznivě ovlivňující tekutý kov a jeho chladnutí),
- ochrana proti vypalování některých prvků, rafinace a legování taveného kovu (obal obsahuje látky – feroslitiny / feromangan, ferochrom aj., které dolegují roztavený kov na požadované složení),
- zvýšení produktivity svařování (obal obsahuje přísadu železného prášku, jehož roztavením se zvyšuje množství /výtěžnost nataveného kovu),
- zajištění snadného odstranění strusky z povrchu svarového kovu.

Obal elektrod členíme podle jeho složení a charakteristických vlastností na:

- **Kyselý obal (A)** má základ ze železné a manganové rudy, křemičitanů, živce, dolomitu, vápence a menšího množství dalších přísad. Železo ve formě feromanganu, slouží jako dezoxidační přísada. Ostatní složky obalu zlepšují výrobně technologické vlastnosti elektrody (dobré formování svaru a odstraňování strusky). Elektroda má obal tlustý. Je určena ke svařování střídavým i stejnosměrným proudem. Přednostně se uplatňuje v poloze PB. V ostatních polohách jsou svařovat jen malými průměry elektrody.
- **Bazický obal (B)** obsahuje vápenec, kazivec, mramor, feroslitiny a železný prášek. Elektrody s uvedeným složením jsou tlustě obalené, umožňující svařování stejnosměrným proudem s nepřímou polaritou. Vyžadují krátký oblouk, bez proudového přetížení. Lze s nimi svařovat ve všech polohách. Svarová lázeň je hustě tekoucí, tuhne současně se struskou. Elektrody je nutné před použitím dobře vysušit, za účelem odstranění vlhkosti z obalu. Umožňují vytvářet svarový kov s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Jsou nejvíce rozšířené.
- **Organický obal (C)** obal je složen z organických látek (převážně na bázi celulózy, dextrinu, škrobu, dřevité moučky, rašeliny). Složení tohoto obalu umožňuje při svařování vytvářet zvýšené množství ochranné plynové atmosféry s malým množstvím strusky. Vzniká hustě tekoucí kov, který umožňuje svařovat v poloze PG.
- **Rutilový obal (R)**. Základem obalu je rutilum (oxid titaničitý), doplněné o další složky, které vhodně ovlivňují tvorbu strusky s příznivými redukčními a fyzikálními vlastnostmi. Struska je po vychladnutí křehká a snadno odstranitelná. Tyto elektrody umožňují svařování střídavým i stejnosměrným proudem (na mínus pólu) ve všech základních polohách. Vytvářený svarový kov je hustý, který umožňuje překlenout při svařování větší mezery, ale závar svaru je malý. Elektrody jsou především určeny ke svařování slabých plechů a méně náročných konstrukcí.
- **Tlustostěnný rutilový obal (RR)** má stejné vlastnosti jako předchozí obal s tím, že silnější opláštění vytváří více strusky a více nataveného kovu.
- **Rutil-organický obal (RC)**. Základem obalu je rutilum s přidávkou organických látek (celulózy, dextrinu aj.), které zlepšují ochranný účinek roztavené lázně a její ovládnutí při svařování. Oblouk je teplejší, lázeň tekutější a závar větší. Elektrody s tímto obalem umožňují svařování střídavým i stejnosměrným proudem ve všech polohách (i v poloze PG). Jsou určeny ke svařování středně tlustých plechů a méně náročných konstrukcí.

- **Rutil-kyselý obal (RA).** Obal této elektrody je převážně tlustostěnný. Oproti kyselému obalu, jsou v tomto obalu z větší části oxidy železa nahrazeny rutilem, při zachování srovnatelných vlastností kyselé elektrody.
- **Rutil-bazický obal (RB).** Tento typ obalu je obsahuje vysoký podíl rutilu a bazické složky. Obal této elektrody je převážně tlustostěnný. Tyto elektrody mají dobré operativní vlastnosti a lze s nimi dosáhnout i vyšších mechanických hodnot svarového kovu.

Elektrody se speciálním obalem – např. ze solí halových prvků (elektrody pro svařování hliníku), grafitu (elektrody pro svařování litiny).

Pro účelové práce jsou vyráběny elektrody s uzpůsobeným obalem, kterými lze zvyšovat objem nataveného kovu - vysokovýkonné elektrody, a nebo zvyšující závar do materiálu – hlubokozávarové elektrody.

Označování elektrod provádí jejich výrobce zpravidla na každé vyrobené elektrodě a na ochranném balícím obalu, a to obvykle specifickým značením výrobce (barevným označením na konci elektrody, natištěnou značkou na povrchu opláštění elektrody, na štítku kartonového obalu). V současné době se označují elektrody, určené ke svařování ocelí, podle normy ČSN EN 499.

5.2.2 Skladování a sušení elektrod

Elektrody musí být skladovány pouze v suchém a temperovaném prostředí, s vlhkostí max. 50 % a teplota nepoklesne pod +10 °C. Jejich uložení musí být provedeno v původních neporušených obalech, tak aby nemohlo docházet při skladování ve vrstvách k jejich poškození. Navlhle a dlouhodobě skladované elektrody a nebo elektrody, kde jejich výrobce požaduje před použitím jejich bezprostředné vysušení. Režim sušení obalených elektrod stanovuje jejich výrobce, a to podle charakteru opláštění a funkce. Příslušný režim sušení je uveden na obalu elektrod a v materiálovém listě elektrody.

5.3 Svarové spoje a technika svařování

5.3.1 Návrh spoje

Svařování obalenými elektrodami má především široké uplatnění v kusové a řemeslné výrobě, při opravách a renovaci součástí. Předností tohoto způsobu svařování je, že umožňuje zhotovování tupých a koutových spojů ve všech polohách, ale i spojování široké škály materiálů v dílenských a montážních podmínkách. Svarové plochy se připravují podle potřeb konstrukce a technologie. Doporučené konkrétní tvary svarových ploch, v závislosti na geometrii svarů a svařovaných tloušťek jsou uvedeny v normě ČSN EN 29 692.

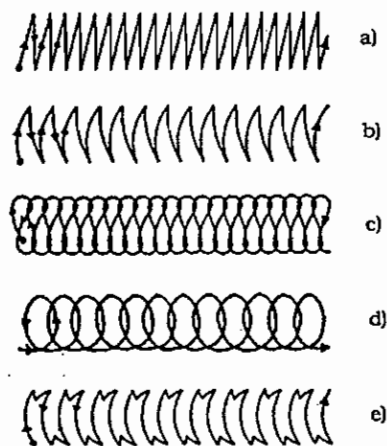
5.3.2 Technika svařování

Nastavení svařovacího proudu a technika svařování je závislá na konkrétně prováděném svaru. Svařovací proud se nastavuje před započítím práce dle údajů, uvedených v postupu svařování – WPS, případně podle údajů uvedených na obalu výrobcem elektrod. Proud se volí v přípustném rozsahu podle polohy svařování. Vyšší hodnoty uvedeného rozsahu proudu se přednostně využívají při svařování koutových svarů v poloze PB, střední

hodnoty pro navařování a svařování tupých svarů v poloze PA a při svařování v poloze PG se využívá hodnot z oblasti spodního proudového rozsahu. Při překročení uvedených mezí (cca $\pm 20\%$) není možno zajistit kvalitní svařování. Orientačně lze stanovit svařovací proud podle charakteru opláštění elektrody ze vztahu:

- $I = (40 \text{ až } 55) \times d \dots$ pro kyselé a rutilové elektrody,
 - $I = (35 \text{ až } 50) \times d \dots$ pro bazické elektrody,
- kde I je svařovací proud (A) a d je průměr elektrody (mm).

Postup při svařování. Nejsnáze se zapálí oblouk plynulým lehkým škrtnutím elektrody o svařovaný materiál a následným oddálením o vzdálenost rovnou cca dvojnásobku průměru použité elektrody. Po zapálení oblouku je nutné, aby elektroda byla vedena ve správném sklonu tak, aby struska nepředbíhala oblouk. Stejně důležité je dodržování konstantní vzdálenosti konce elektrody od povrchu svařovaného materiálu, aby délka oblouku byla přibližně rovna průměru elektrody. Protože elektroda se taví a ubývá, je třeba ji neustále přibližovat ke svařovanému místu. Správná délka oblouku se projevuje praskavými rovnoměrnými zvukovými efekty. Širší svarovou housenku lze vytvořit příčným kývavým pohybem elektrody při jejím současném podélném pohybu – viz obr. 5.3. Příčný pohyb a) se používá nejčastěji u slabě opláštěných elektrod. Šířka rozkyvu by neměla být větší než trojnásobek průměru použité elektrody. V místě obratu je třeba kývavý pohyb zpomalit, aby se dosáhlo potřebného závaru. Pro tlustě obalené elektrody se používá technika rozkyvu dle b), za účelem lepšího ovládnutí strusky. Použití techniky rozkyvu podle vyobrazení c) a d) je též běžně používané, a to z důvodu, že lze dobře sledovat roztavenou lázeň a ovládat strusku. Za účelem lepšího ohřátí okrajů tavné lázně u svařovaných větších tloušťek se používá technika rozkyvu dle e).



Obr. 5.3 Způsoby pohybu elektrody při svařování

Při přerušení svařování nebo při napojování housenky je potřebné odstranit strusku alespoň z koncového kráteru. Nové zapálení oblouku se provádí na nesvařeném materiálu tak, že zapálený oblouk se rychle přenesení přes koncový kráter na místo, kde byla ukončena předchozí housenka. Počátkem nové housenky se překryje koncový kráter ukončené předchozí housenky. Při ukončování housenky je třeba zabránit tvorbě koncového kráteru zpomalením posuvu elektrody, zastavením, nebo vrácením tak, aby se kráter vyplnil svarovým kovem. Teprve potom lze provést zhasnutí oblouku.

Způsob vytváření tupého nebo koutového svaru. Tyto svary lze dle potřeby provádět ve formě jednovrstvého svaru (vytvořeného jedinou housenkou) nebo

vícevrstvého svaru (složeného z více housenek). Podle strany ze které se provádí, členíme je na svary:

- **jednostranné** (zhotovené svařováním pouze z jedné strany – např. ve tvaru I, V, U), případně doplněné o podložení a nebo vydrážkování (svary provedené z jedné strany a z opačné strany v místě kořenu podloženy, případně před podložním kořenová oblast vydrážkována),
- **oboustranné** (např. ve tvaru I, X, K 2U).

Z hlediska výrobního provedení svařovaných konstrukcí se dává přednost koutovým svarům a oboustranným tupým svarům. Při svařování plechů s tloušťkou stěny 4 až 12 mm je nejčastěji používaným tvarem V svar. Rozhodující pro kvalitu tohoto svaru je provedení kořenové vrstvy. Proto se tato část svaru provádí převážně bazickou elektrodou o průměru 2,5 mm, případně 3,15 mm. Další výplňové vrstvy a krycí vrstvy jsou již méně rizikové. Provádí se podle polohy svařování elektrodami o průměru 3,15 až 5 mm.

5.4 Bezpečnost práce

Svářeč elektrickým obloukem musí být prokazatelně seznámen a přezkoušen ze znalostí bezpečnostních požadavků obsažených v normách ČSN 05 0601 a ČSN 05 0630, Vyhláškou ministerstva vnitra č. 87/ 2000 Sb., kterou jsou stanoveny podmínky požární bezpečnosti při svařování a souvisejícími dalšími vyhláškami. Dále musí být svářeč seznámen s návodem k obsluze používaného svařovacího zdroje a s požadavky na jeho připojení k elektrickému rozvodu dle ČSN EN 60974-1, ČSN 34 1010. Údržbu a opravy svařovacího zařízení mohou vykonávat pouze pověřeni pracovníci v souladu s pokyny výrobce zařízení.

Svářeč musí být vybaven osobními ochrannými pracovními prostředky, které je povinen používat a šetrně s nimi nakládat. Do základního vybavení patří:

- svářečská kukla,
- ochranné svářečské rukavice s koženou manžetou,
- pracovní svářečský oděv impregnovaný,
- kožená pracovní obuv.

Dále podle druhu vykonávané práce má přiděleny k používání doplňující ochranné prostředky, které jsou zaměřeny např. na:

- ochranu dýchacích orgánů,
- ochrany sluchu,
- ochranu hlavy, rukou a nohou,
- zajištění proti pádu (ochranný pás).

Svářeč na dílenském i montážním svářečském pracovišti prokazuje svou odbornou způsobilost ke svařování doklady odpovídající stanoveným požadavkům nebo normativním dokumentům dle ČSN EN 45020, vydané oprávněnou organizací v České republice.

Literatura

KLEANDR, A., BLAŽEK, J.: Přídavné materiály pro svařování. SNTL Praha, 1973.

MINAŘÍK, V.: Obloukové svařování. Scientia Praha, 1998.

BUBENÍK, V.: Nepublikované interní učební texty, 2000.

Citované normy ČSN, ČSN EN a Vyhláška ministerstva vnitra č. 87/ 2000 Sb.

6. SVAŘOVÁNÍ POD TAVIDLEM

Svařování pod tavidlem nazýváme elektrický obloukový proces, při kterém elektrický oblouk hoří pod vrstvou tavidla a postupným tuhnutím roztavené kovové lázně dochází ke spojení svařovaných dílů. Představuje jednu z nejrozšířenějších metod využívanou pro mechanizované způsoby svařování. Výrobky zhotovené touto technologií pracují ve velmi náročných podmínkách. Využívá se především pro větší svařované tloušťky, pro svařování dlouhých a nepřerušovaných svarů a dále pak při svařování obvodových svarů u větších průměrů.

6.1 Princip svařování pod tavidlem, svařovací parametry a jejich vliv na rozměr a formu svaru

Tepelná energie vyvinutá v elektrickém oblouku natavuje svarové hrany základního materiálu a roztavuje elektrodu (v tomto případě holý svařovací drát). Svarový kov pak vyplňuje část svarového úkosu pod vrstvou tavidla. Regulační systém zajišťuje plynulé posouvání svařovacího drátu do místa hoření elektrického oblouku pomocí podávacího zařízení. Svařovací proud je přiváděn ze svařovacího zdroje do drátové elektrody přes čelisti svařovací hubice.

Praktické určování a výpočet svařovacího režimu

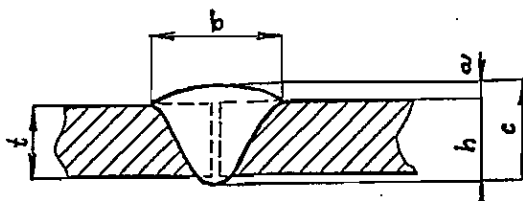
Při zpracovávání technologického předpisu pro svařování je třeba určit svařovací režim, přičemž je nutné rozeznávat:

- 1) výpočet, který souvisí s určováním svaru daných geometrických rozměrů. V tomto případě se pozornost soustřeďuje na určení vhodného svařovacího režimu, tj. svařovacího proudu, napětí a rychlosti svařování. V literatuře existují tabulky pro některé případy, avšak hodnoty je třeba pro každý jednotlivý případ prověřit, případně vytvořit vlastní experimentální práce pro konkrétní typy svarových spojů,
- 2) výpočet spojený s teplotními procesy v průběhu svařování. V tomto případě se výpočty orientují na výpočet rychlosti ochlazování ovlivněné oblasti.

Vliv svařovacího režimu

Formu svaru (obr. 6.1) charakterizuje hloubka průvaru do základního materiálu "h", převýšení "a", šířka svaru "b", celková tloušťka svaru "c" = h + a a součinitel formy svaru ψ

$$\psi = \frac{b}{c}$$

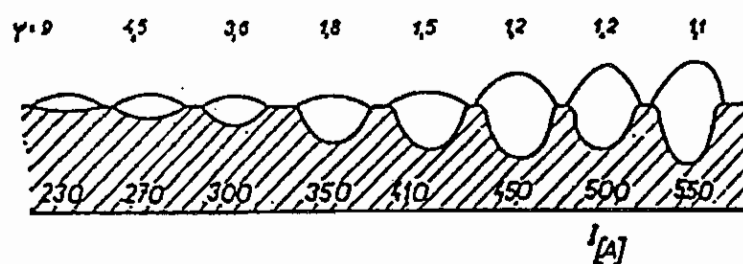


Obr. 6.1 Charakteristické rozměry svaru

Chemické složení, struktura a mechanické vlastnosti svarového spoje závisí do značné míry na součiniteli formy svaru ψ . Hlavní vliv na rozměr a formu svaru má množství uvolněného tepla v oblouku, které je funkcí svařovacího proudu, svařovacího napětí a rychlosti svařování.

Vliv svařovacího proudu I /A/ (obr. 6.2)

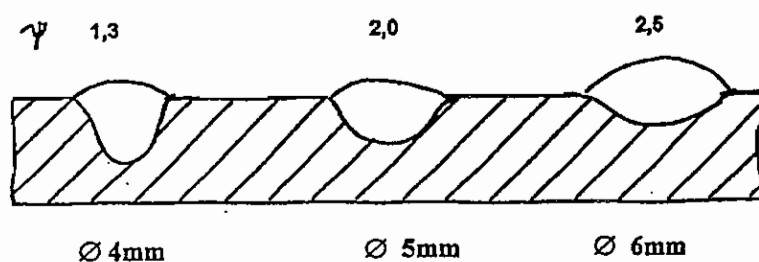
Intenzita svařovacího proudu má přímý vliv na množství nataveného kovu. Jejím zvyšováním při zachování ostatních podmínek se zvyšuje proudová hustota a koncentrace tepla v kuželi elektrického oblouku a zároveň se zvyšuje dynamický účinek elektrického oblouku. V důsledku toho vzniká větší průvar do základního materiálu a zmenšuje se součinitel formy svaru ψ . Zvyšování intenzity proudu má také vliv na tavení přídavného materiálu a převýšení housenky narůstá, přičemž její šířka se prakticky nemění.



Obr. 6.2 Vliv svařovacího proudu na změnu formy svaru

Vliv průřezu svařovacího drátu (obr. 6.3)

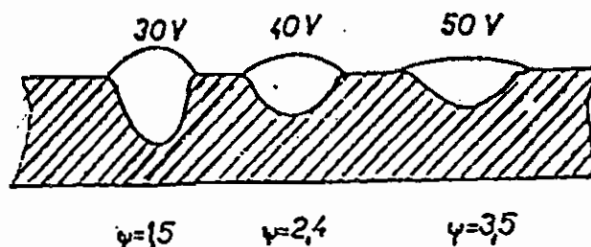
Zvětšování průřezu svařovacího drátu při nezměněném svařovacím proudu se zvětšuje bloudění katodové skvrny, a tím se zvětšuje šířka svaru a zmenšuje hloubka průvaru. To znamená, že se zvětšuje součinitel formy svaru ψ .



Obr.6.3 Vliv průřezu svařovacího drátu na šířku svaru a hloubku průvaru

Vliv svařovacího napětí U /V/ (obr. 6.4)

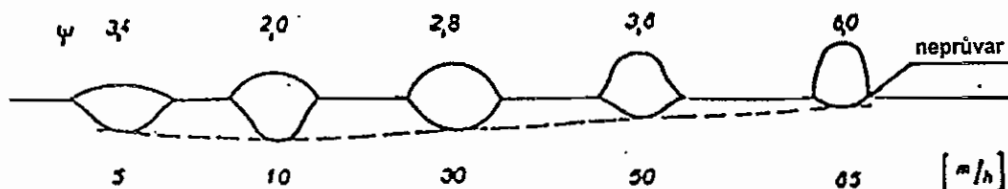
Se zvětšováním svařovacího napětí se prodlužuje obloukový sloupec. Teplo vyvinuté v oblouku působí na větší plochu základního materiálu, a proto se zvětšuje šířka housenky a zmenšuje hloubka protavení, to znamená, že součinitel formy svaru ψ se zvětšuje.



Obr. 6.4 Vliv svařovacího napětí na obloukový sloupec

Vliv rychlosti svařování v_s (m/hod) (obr. 6.5)

Rychlostí svařování rozumíme postupnou rychlost tvoření svarových housenek. Při konstantním proudu a napětí se změnou rychlosti svařování mění množství tepla vyvinuté v elektrickém oblouku připadající na jednotku délky svaru. Změna rychlosti svařování působí také na změnu směru elektrického oblouku a rozdělení dynamických sil v oblouku. Při rychlostech kolem 10 m/hod. hoří oblouk kolmo a velikost průvaru je největší. Zvětšováním rychlosti nestačí vyvinuté teplo natavovat svarové plochy a zmenšuje se protavení základního materiálu. Zvláště vysoké rychlosti mohou mít za následek neprůvary na krajích housenky a velmi nepokojný svařovací proces.



Obr. 6.5 Vliv rychlosti svařování na koeficient formy svaru

6.2 Svařovací materiály

- **Tavidla** (zajišťují především stabilní hoření oblouku, desoxidaci, rafinaci a metalurgické procesy.

Tavidlo, podobně jako obal elektrody plní několik funkcí:

- chrání roztavenou lázeň proti působení venkovní atmosféry,
- zlepšuje ionizaci prostředí, ve kterém hoří elektrický oblouk, čímž se vytvářejí podmínky pro klidný svařovací proces,
- rafinuje svarovou lázeň (zbavuje zejména síry),
- dolegovává svarový kov,

- formuje svarovou housenku,
- zabraňuje rychlému odvodu tepla z místa svařování,
- zamezuje rozstříku roztaveného kovu,
- chrání svářeče před zářením, vznikajícím ve svarovém oblouku.

Dělí se:

- | | |
|---------------------------------|--|
| podle chemického složení | - křemičitá,
- fluoridová,
- manganatá, |
| podle struktury | - sklovitá,
- penzovitá, |
| podle technologie výroby | - tavená,
- keramická,
- aglomerovaná,
- sintrovaná, |
| podle metalurgie procesu | - bazická,
- kyselá,
- neutrální, |
| podle použití | - tavidla pro svařování uhlíkových a některých nízkolegovaných ocelí jsou kyselá, neutrální nebo bazická s velkým obsahem oxidu manganu,
- tavidla pro svařování legovaných a vysoce legovaných ocelí se používají zpravidla zásaditá s vysokým obsahem fluoridů a bezkyslíková,
- tavidla pro navařování legovaných přídavných materiálů jsou zpravidla kyselá s nízkým obsahem MnO a často obsahují oxid chromu, |
| podle zrnitosti | Značný vliv na metalurgické a technologické vlastnosti má zrnitost tavidla. Při použití tavidla s větším zrnem je housenka při menší hloubce průvaru širší než v případě použití tavidla jemnozrnného. Proto se i na svařování tenkých plechů používají tavidla s hrubším zrnem. Větší rozdíly ve velikost zrn v tavidle, stejně jako přítomnost většího množství prachové složky nepříznivě ovlivňují formování housenky. Proto se vyrobená tavidla třídí podle velikosti zrn a to zpravidla pomocí dvou střešacích sít s různou velikostí zrn, čím je daný minimální a maximální rozměr zrn. |

- Svařovací dráty

- dráty, plněné elektrody. Převážně se používají průměry od 1,5 do 5 mm, výjimečně možno použít i větší. Drát je táhnutý za studena s lesklým povrchem, někdy povlečen měděnou vrstvičkou, aby se zabránilo jeho rezivění. Trubičkové elektrody jsou vytvořené svinutým

pláštěm z měkké oceli a mají uvnitř prášek z ferolegur. Tím je možné získat libovolné chemické složení hospodárnějším způsobem než u plných drátů. Nevýhodou trubičkových elektrod je zvýšený propal legujících prvků.

Vhodnost použití přídavného drátu pro svařování daného materiálu určuje jeho chemické složení. Ve většině případů není vhodné použít drát stejného chemického složení jako je základní materiál. Je to způsobeno rozdílnými činiteli majícími vliv na vlastnosti svarového kovu v porovnání se základním materiálem, ke kterým patří:

- hrubozrná lící struktura svarového kovu se sklonem k malému promísení,
- propal legujících prvků,
- zbytkové napětí ve svarovém kovu.

Protože se svarové spoje jen málokdy normalizačně žihají, je třeba, aby svarový kov obsahoval přísady, které mají vliv na zjemnění primární struktury. Vedle toho se zřetelem na zbytkové napětí je potřebné, aby spoj měl značnou plastickou rezervu a dostatečně vysoké hodnoty vrubové houževnatosti. Přitom je třeba počítat i s velkým promísením přídavného drátu s roztaveným základním materiálem, které je značné (50 až 70 %).

Kombinace přídavných svařovacích materiálů musí být voleny tak, aby se dosáhlo optimálního složení svarového kovu, které se bude blížit co nejvíce k chemickému složení základního materiálu.

6.3 Způsoby svařování pod tavidlem, výhody a nevýhody, tvary svarových úkosů

Posuzujeme-li svařovací proces při svařování pod tavidlem podle počtu elektrických oblouků, podle počtu svarových lázní, případně podle elektrického zapojení, uvádí se tyto způsoby svařování:

1) jednoobloukové

- 2) víceobloukové
- se společnou svarovou lázní,
 - s oddělenými svarovými lázněmi,
 - elektrické oblouky spolu svázané,
 - elektrické oblouky samostatně napájené.

- výhody svařování pod tavidlem:

- zvýšení produktivity práce 5 až 10ti násobně oproti ručnímu svařování,
- zvýšení kvality svaru (dobrou ochranou roztaveného svarového kovu, rovnoměrným chemickým složením, lepším formováním svaru, minimálním výskytem neprůvarů, opakovatelnost podmínek svařování).

- nevýhody svařování pod tavidlem:

- vyšší nároky na čistotu základního i přídavného materiálu,
- vyšší požadavky na přípravu ke svařování,
- není možnost přímého sledování svarové lázně.

- **tvary svarových úkosů** (jsou doporučeny normou ČSN 05 0028):

- pro malé tloušťky se většinou provádějí jako I svary,
- u větších tloušťek používáme převážně jednostranné svary (V, 1/2V, U, 1/2U, W a 1/2W),
- pro velké tloušťky volíme oboustranné symetrické nebo asymetrické svary,
- je možné provádět i koutové svary.

Tupé svary (I) a jednostranné svary provádíme většinou na podložku, která může být měděná, ocelová nebo tavidlová.

6.4 Zařízení pro svařování pod tavidlem

Pro svařování pod tavidlem je potřeba používat výkonné zdroje proudu, které umožňují dosažení potřebných svařovacích parametrů. Používají se jak střídavé tak stejnosměrné zdroje. Zdroje proudu volíme také s ohledem na podmínky regulace délky oblouku a rychlosti podávání drátu:

- 1) regulace změnou rychlosti podávání přidavného drátu, kdy otáčky motoru jsou závislé na napětí oblouku, tj. jeho délce. Při zvětšení délky oblouku se zvýší jeho napětí a přes zpětnou vazbu dojde ke zvýšení otáček motoru, tím ke zvýšení rychlosti podávání drátu a zmenšení délky oblouku a naopak,
- 2) regulace délky oblouku statickou charakteristikou zdroje proudu - konstantní rychlost podávání drátu a délka oblouku je závislá na změně napětí na oblouku. Použité svařovací zdroje musí mít plochou statickou charakteristiku, kde poměrně malá změna napětí odpovídá velké změně proudu.

Podle způsobu použití dělíme svařovací automaty na:

- mobilní („traktor“), které pojíždějí po kolejničkách nebo podle pravítka a jsou vhodné pro dlouhé rovné svary,
- stabilní, které se používají upevněné na portálu nebo výložníku především pro obvodové svary, výjimečně pro dlouhé rovné svary.

6.5 Speciální techniky svařování pod tavidlem

Automatové svařování pod tavidlem je velmi progresivní a produktivní technologie, přesto existují speciální technologie, které jeho produktivitu ještě dále zvyšují.

- **svařování velkými svařovacími rychlostmi**

Při svařování pod tavidlem vysokými rychlostmi (nad 70 m/hod.) nestačí množství vyvinutého tepla v elektrickém oblouku natavovat svarové hrany základního materiálu a dochází ke špatnému formování housenky s bočními neprůvody a svařovací proces je velmi nestabilní.

Některé výrobní technologie však vyžadují použití svařování pod tavidlem s rychlostmi nad 100 m/hod. Chceme-li dosáhnout při těchto vysokých svařovacích

rychlostech bezdefektní svar, musíme provést taková opatření, která zajistí přívod dostatečného množství tepla potřebného na natavení hran základního materiálu i přídavného materiálu. V praxi se využívají především tři způsoby:

- a) svařování s jedním obloukem při použití vhodného tavidla,
- b) svařování dvěma oblouky do společné svarové lázně,
- c) svařování s vibrujícím obloukem napříč svaru.

- svařování do úzké mezery

Svařování do úzké mezery pod tavidlem je v podstatě mnohvrstvé svařování se specifickým svarovým úkosem, jehož tvar je volen tak, aby každá vrstva byla složena ze dvou housenek. S výjimkou kořenové části a krycí vrstvy jsou obvykle všechny svarové housenky po celé tloušťce svaru pokládány při stejných parametrech svařování. Šířka svarové mezery závisí na průměru svařovacího drátu a druhu použitého tavidla.

Specifické zvláštnosti svařování velkých tlouštěk automaticky pod tavidlem do úzké mezery lze rozdělit do tří základních okruhů.

Je to především otázka *technologie svařování*, týkající se především vhodné skladby housenek, volby svařovacích parametrů a přídavných materiálů, které v komplexu zabezpečí vytvoření bezdefektního svarového spoje s požadovanými mechanickými vlastnostmi, včetně snadného odstraňování strusky v průběhu svařování. Je všeobecně známo z klasického mnohvrstvého svařování pod tavidlem, že v případě jedné housenky ve vrstvě je odstranitelnost strusky velmi obtížná. Strusková kůrka má obvykle podstatně nižší tepelnou roztažnost oproti svarovému kovu a při chladnutí se zaklíní mezi stěny úkosu. Z těchto důvodů je optimální použít varianty dvouhousenkových vrstev. Ze stejných důvodů je značně omezen výběr použitelných tavidel a svařovacích režimů.

Na operativní, respektive formovací vlastnosti tavidla jsou kladeny vysoké nároky. Zejména se požaduje, aby tavidlo dokonale formovalo svarové housenky bez vrubového účinku do stěny svarového úkosu. Dále musí tavidlo vytvářet pouze tenkou vrstvu strusky, která se z povrchu housenky samovolně uvolňuje. Tavidlo nesmí vyvíjet velké množství plynů s ohledem na jejich únik z úzké mezery.

Parametry svařování se stanovují s ohledem na rovnoměrné tepelné přepracování ovlivněné oblasti a svarového kovu následnými housenkami. Rovněž lze jimi do určité míry ovlivnit i mechanické vlastnosti svarového spoje a úroveň zbytkového pnutí.

Druhým okruhem je otázka *použitého svařovacího zařízení*. Vlastní svařovací automat musí být dovybaven některými funkcemi, které zabezpečí zdárné provedení svaru. Je to především požadavek vysoké spolehlivosti celého zařízení. Dále musí být svařovací automat vybaven speciálním stranovým kopírovacím zařízením, které musí zabezpečovat vedení svařovací hubice ve svarové spáře v průběhu celého svařování. Neméně důležitým požadavkem je rovnání drátu ve dvou na sebe kolmých směrech. Důležitý je i požadavek zpětných elektrických vazeb mezi automatickým a polohovadlem, kde kromě nutnosti zabezpečit rozběh polohovadla současně se zahájením svařovacího procesu a zastavení polohovadla při ukončení procesu, je nutné zajistit zastavení svařovacího procesu při zastavení polohovadla z různých jiných příčin, aby se zabránilo vzniku bočního zápalu při svařování do jednoho místa. Dále musí být svařovací automat vybaven zařízením, zabezpečujícím

při vypnutí svařování ještě krátkodobé zapojení svařovacího proudu, aby nedošlo k tzv. "zamrznutí" drátu, případně vzniku kráterových trhlin. Velmi důležitá je i konstrukce svařovací hubice, která musí zabezpečit dobré vedení svařovacího drátu v blízkosti svarové hrany, musí být zajištěna proti náhodnému zkratu se svařovaným dílem, musí mít malou tloušťku vzhledem k úzké mezeře, ale současně musí být dostatečně tuhá a dále musí umožňovat řešit zasypávání a odsávání tavidla.

Třetí okruh otázek se týká *opravy případných vad* vzniklých v procesu svařování. Jsou to zejména boční neprůvary, boční zápaly, případně póry ve svarové housence. V některých případech se může jednat i o chybně položenou housenku. Tyto vady jsou ve většině případů těžko odstranitelné, protože se jedná o větší svařované tloušťky, kde je přístupnost velmi obtížná. Je nutné používat speciální zařízení jako jsou ruční brusky vybavené speciálními nástavci s rotačními pilníky apod. Také svařovací hubice musí být pro takové případy speciálně upravené. Ruční oprava svařováním je pro velké hloubky prakticky neproveditelná. Proto je třeba vadám ve svarech předcházet dodržováním technologické kázně, kvalitní údržbou zařízení a velmi odpovědným přístupem k přípravě svařovacího automatu (nastavení kopírovacích čidel, svařovací hubice, násypných a odsávacích hubic apod.).

6.6 Zdravotní a bezpečnostní hlediska

Vzhledem k tomu, že proces hoření oblouku se děje pod vrstvou tavidla, jsou hygienické podmínky relativně dobré. Menší problémy jsou v případě, kdy se používá tavidlo, které již prošlo svařovacím procesem a zvyšuje se jeho prašnost.

Složitější jsou problémy s vyššími teplotami v případě, že se svařuje s předeřevem, kdy je třeba řešit svařovací pracoviště tak, aby byly pracovníci ochráněni před tepelným zářením.

Literatura

- BARTÁK, J., KÖNIGSMARK, J.: Mechanizovaná a automatizovaná pracoviště v závodě Energetické strojírenství k.p. ŠKODA. Technika ŠKODA, 1988.
- BARTÁK, J.: Jednostranný úzkomezerový svar aktivní zóny reaktorové tlakové nádoby. Zváranie č.12, 1990.
- Firemní literatura

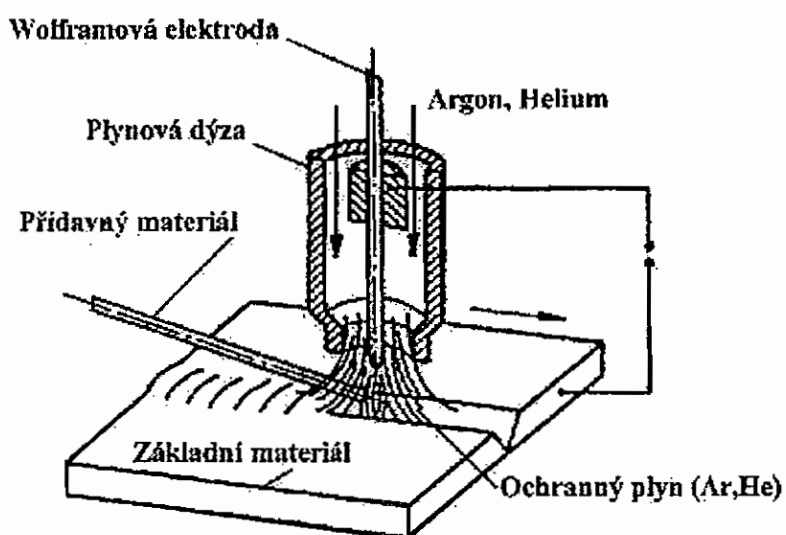
7. SVAŘOVÁNÍ METODOU TIG

Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu se uplatňuje v současné době ve všech oborech svařovaných konstrukcí a technických zařízení. Jeho podíl využití se neustále zvětšuje, neboť proti jiným technologiím svařování má následující výhody: svarová lázeň je chráněna proti nepříznivým účinkům okolní atmosféry, zlepšení hygieny prostředí, možnost svařovat ve všech polohách, možnost automatizace i robotizace svařování a tím vyšší produktivita. Tato metoda se s výhodou používá při svařování neželezných kovů, korozivzdorných a jiných vysokolegovaných, legovaných, nízkolegovaných i nelegovaných ocelí, a to jak pro automatické svařování nejnáročnějších svarů v jaderné energetice, letecké a kosmické technice, tak pro automatové i ruční svařování v malosériové výrobě a při montážních pracích.

7.1 Svařování TIG

7.1.1 Princip metody

Princip obloukového svařování netavící se elektrodou v inertním plynu (viz. obr.7.1) spočívá ve vzniku a hoření elektrického oblouku mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem, přičemž je svarová lázeň, elektroda a nejbližší okolí svaru chráněno inertním plynem před účinky okolní atmosféry (hlavně kyslíku a dusíku ze vzduchu). Netavící elektroda je čistě wolframová nebo s aktivující přísadou a jako ochranný inertní (netečný) plyn se používá argon, helium, případně jejich směsi.



Obr. 7.1 Princip svařování TIG

Zdrojem tepla při svařování metodou TIG je elektrický oblouk. Místním natavením svarových ploch základního materiálu a odtavením potřebného množství přidávaného materiálu se vytváří svarová lázeň, která v dalším okamžiku tuhne a vytváří tak požadovaný nerozebíratelný spoj mezi spojovaným základním materiálem.

7.1.2 Svařovací proud

Při svařování metodou TIG se používá stejnosměrný proud konstantní velikosti nebo pulzující svařovací proud s přímou nebo nepřímou polaritou a nebo střídavý proud. Stejnosměrný proud a přímá polarita se při svařování touto metodou používá nejčastěji, neboť zajišťuje stabilní oblouk a dobré vlastnosti svarových spojů i u materiálů, které vytvářejí na povrchu vrstvu oxidů s teplotou tavení blízkou teplotě tavení základních materiálů, např. při svařování ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin.

Při svařování kovů, které vytvářejí na povrchu vrstvu vysokotavitelných oxidů, např. u hliníku, hořčíku a jejich slitin, se používá střídavý proud, který zabezpečuje čistící účinek svařovacího oblouku na povrchu svařovaného materiálu.

Stejnosměrný proud a nepřímá polarita se při svařování metodou TIG používá jen ojediněle, neboť je velmi tepelně zatěžována netavící se wolframová elektroda.

Následující tabulka (Tab.7.1) obsahuje volbu druhu proudu v závislosti na druhu základního materiálu.

Tab. 7.1

Základní materiál	Druh proudu, polarita
legované a nelegované oceli, měď a slitiny mědi, nikl a slitiny niklu, titian a slitiny titanu, zirkon, tantal a wolfram	= (-)*
hliník a slitiny hliníku	~ = (-)* s heliem
magnesium a slitiny magnesia	~
* údaj = (-) znamená u stejnosměrného proudu připojení svářečského hořáku na minusový pól	

Elektrický oblouk se může zapalovat dvojím způsobem:

- *dotykově* - dotykem wolframové elektrody s povrchem svařovaného materiálu a následným rychlým oddálením na malou vzdálenost (zkratové zapálení oblouku)
- *bezdotykově* - pomocí vysokého napětí s vysokou frekvencí, jehož zdrojem je vysokofrekvenční ionizátor, se ionizuje plyn a pak dojde k nastartování a zapálení oblouku (bez zkratové zapálení oblouku)

Přednostně používáme bezdotykového způsobu zapalování, neboť při dotykovém způsobu by došlo k znehodnocení wolframové elektrody a následně ke vzniku wolframových vměstků ve svarovém kovu.

7.2 Technika svařování

Technika svařování charakterizuje polohu a pohyby svařovacího hořáku a přidavného materiálu vzhledem ke svařovanému materiálu. Svařování metodou TIG vyžaduje *postup svařování vpřed* (přidavný materiál se pohybuje před hořákem od pravého okraje plechu doleva), přičemž se základní materiál natavuje a přidavný materiál v podobě svařovacího drátu se postupně odtavuje, proud ochranného plynu není narušen a dosahuje se pravidelné kresby.

7.2.1 Svařování tupých svarů (BW)

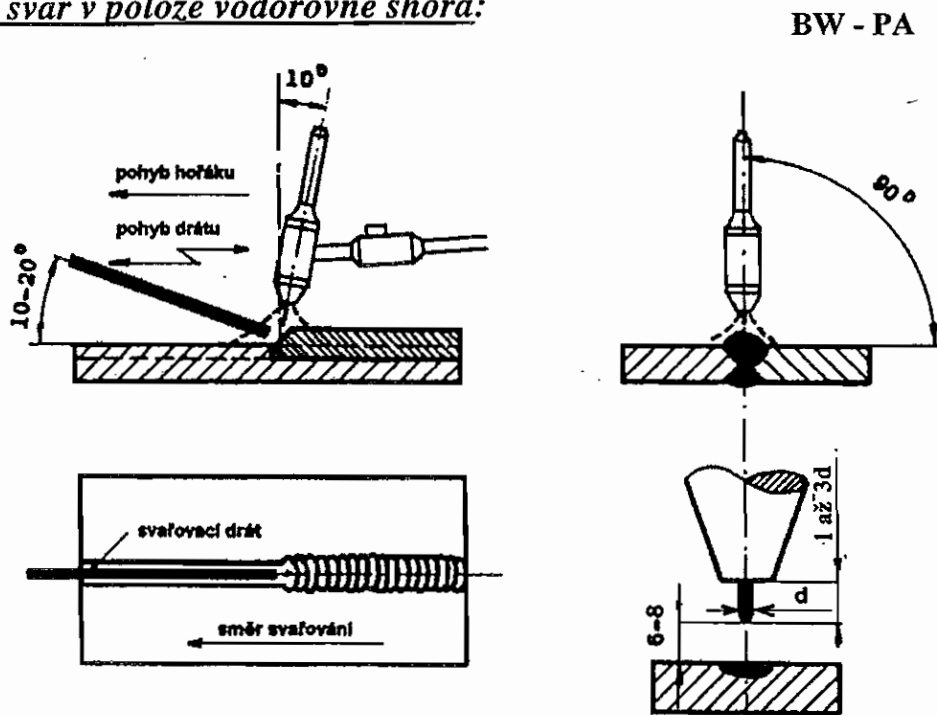
Svařovací hořák je u tupých spojů vedený pod úhlem 80 až 90° a přídavný materiál pod úhlem 10 až 15°, vše vzhledem k základnímu materiálu.

Délka elektrického oblouku je 6 až 10 mm od svarové lázně a nastavuje si ji každý svářeč sám podle podmínek svařování. Vyložení elektrody z hubice svařovacího hořáku se volí přibližně 1 až 3 násobek průměru wolframové elektrody. Při malém vyložení hoří elektrický oblouk částečně v hubici, přičemž se přehřívá, u neodizolované hubice může nastat i přeskok oblouku na hubici. Při svařování se nesmí dotknout wolframová elektroda základního materiálu, neboť dojde k odpadnutí částecek wolframové elektrody do tavné lázně svaru, a tím k vytvoření kovových vměstků, které způsobují necelistvost, a tím vážné znehodnocení svaru.

Svařovací drát se přidává až po vytvoření svarové lázně, a to vždy na její okraj. Přidávání se provádí v určitých pravidelných intervalech, přičemž se musí dbát na to, aby se natavený konec drátu při zpětném pohybu nedostal mimo ochrannou zónu, neboť by nastala oxidace konce drátu, což je nepříznivé pro výslednou jakost svaru. U tenkých materiálů se přidává drát v krátkých časových intervalech (1 až 2 s) a bez rozkyvu do stran. U silnějších materiálů se přidává drát s rozkyvem střídavě na jednu a potom druhou stranu svarové lázně. Krycí housenka se vytváří malým bočním pohybem hořáku do stran. Maximální šířka jedné housenky se provádí 15 až 20 mm. Při ukončení svařování vzniká kráter, kterému se zabrání intenzivnějším přidáváním svařovacího drátu, stahováním svařovacího proudu (postupné snižování proudu a zmenšení rozměrů svarové lázně) nebo vrácením svařovacího hořáku na již provedený svar. Při zanechání kráteru se vytvářejí podmínky pro vznik trhlin a plynových dutin.

Vzájemnou polohu hořáku a přídavného materiálu při svařování metodou 141 tupého spoje vodorovného shora a svislého znázorňují obr. 7.2 a 7.3.

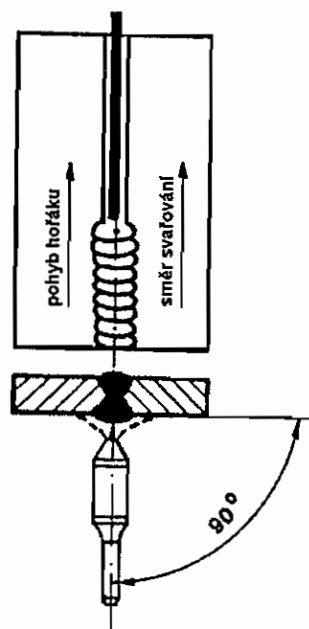
➤ Tupý svar v poloze vodorovné shora:



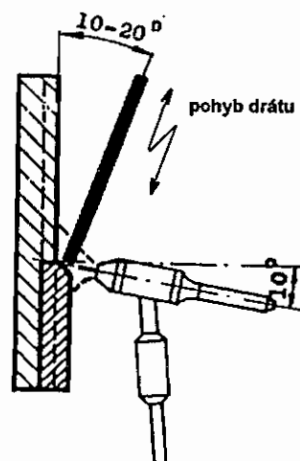
Obr.7.2

Poloha hořáku a přídavného materiálu v poloze vodorovné shora

Tupý svar v poloze svislé:



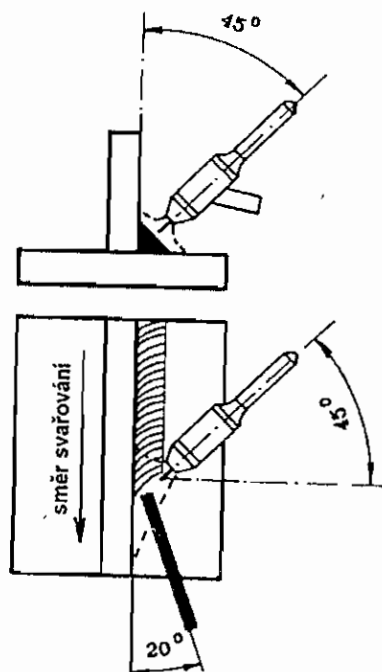
BW – PF



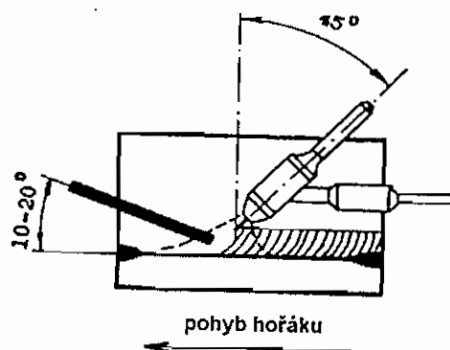
Obr.7.3 Poloha hořáku a přídavného materiálu v poloze svislé

7.2.2 Svařování koutových svarů (FW)

➤ Koutový svar v poloze vodorovné šikmo shora:



FW – PB

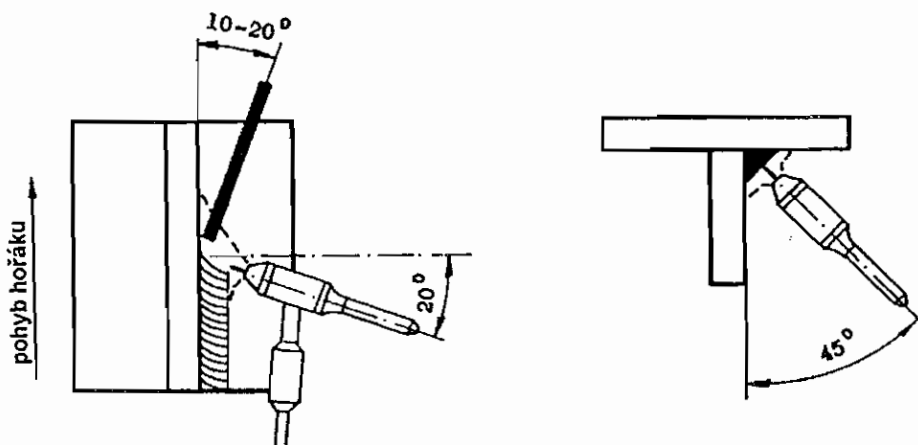


Obr. 7.4 Poloha hořáku a přídavného materiálu v poloze vodorovné shora

U koutových svarů je nutné v porovnání se svařováním tupých svarů zvýšit množství vneseného tepla až o 10 %. Zvětšuje se vzdálenost hubice hořáku od materiálu a vyložení elektrody se volí 1,5 až 2,0 násobek průměru elektrody. Z hlediska ochrany svarové lázně koutových svarů se mění i poloha hořáku. Polohu hořáku a přidavného materiálu znázorňují obr. 7.4 a 7.5.

➤ **Koutový svar v poloze svislé:**

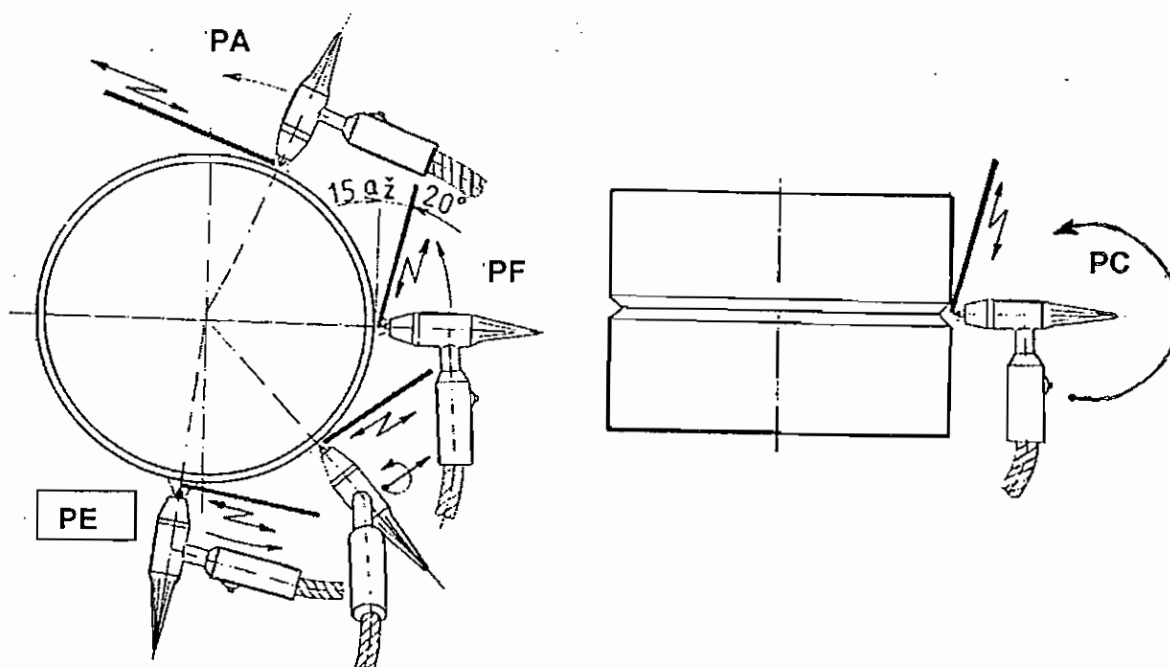
FW – PF



Obr. 7.5 Poloha hořáku a přidavného materiálu v poloze svislé

7.2.3 Svařování v montážních polohách

V praxi se při svařování potrubí nebo rozměrných nádob uplatňují montážní polohy. Jde hlavně o svary v poloze PA, PF a PC.

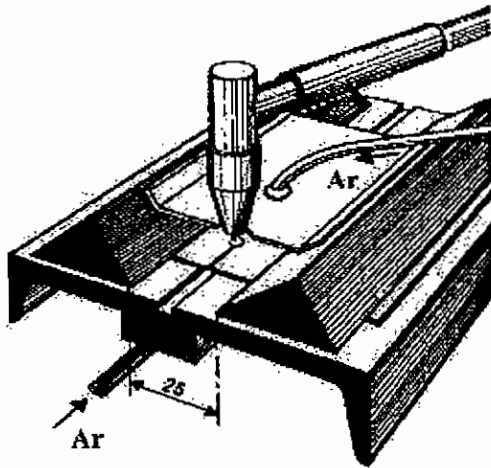


Obr. 7.6 Poloha hořáku a přidavného materiálu při svařování potrubí

Jednou z nejobtížnějších poloh je svařování nad hlavou PD a také poloha H-L045. Polohy a pohyby hořáku a přídavného materiálu u uvedených poloh jsou znázorněny na obr. 7.6.

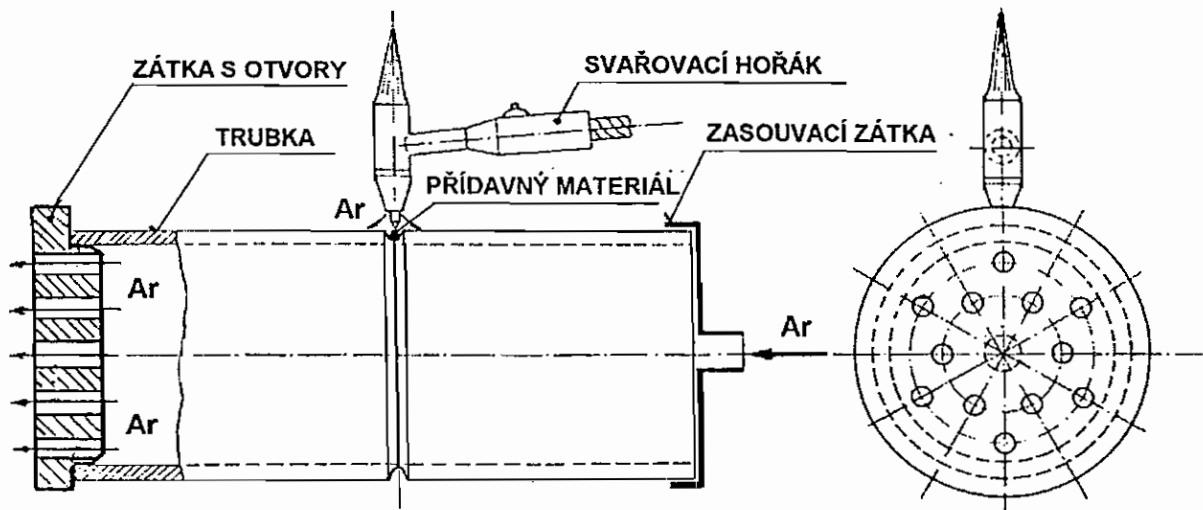
7.2.4 Sekundární plynová ochrana

Je to plynová ochrana, která se provádí samostatnými přívody ochranného plynu na teplem ovlivněné oblasti základního materiálu (kořen, povrch a okolí svaru).



Ochranu povrchu i kořenu svaru při svařování TIG tenkých plechů je možné provést způsobem, který je uveden na obr. 7.7. Ochrana kořene svaru u potrubí menších průměrů se provádí tak, že z jedné strany přivádíme ochranný plyn přes zasouvací zátku a na druhém konci potrubí se přes zátku s malými otvory plyn plynule odvádí (obr.7.8).

Obr. 7.7 Způsob plynové ochrany pro tenké plechy



Obr. 7.8 Způsob plynové ochrany kořene svaru při svařování potrubí

Zvláštním případem plynové ochrany jsou různě tvarované profily z úhelníků, které se používají při svařování rohových svarů. Pokud existuje možnost přístupu z kořenové strany, přivádí se ochranný plyn do trubky s navrtanými otvory směrem ke kořenu svaru.

7.2.5 Parametry svařování

Parametry svařování metodou TIG jsou veličiny, které určuje svářečský dozor (inženýr, technolog svařování) ve výrobních postupech svařování (WPS) v souvislosti

s normami ČSN EN 729; ČSN EN 287-1,2; ČSN EN 25 817; ČSN EN 288 a ČSN EN ISO 9000, které podmiňují jakost svarového spoje.

Tepelný režim při svařování je daný třemi základními parametry:

- ❖ *Velikost svařovacího proudu* – volí se podle tloušťky, tepelné vodivosti základního materiálu, podle typu spoje, polohy svařování a svařovací rychlosti
- ❖ *Velikost napětí na oblouku* – závisí na délce oblouku
- ❖ *Rychlost svařování* – závisí na intenzitě svařovacího proudu a na jeho druhu

Mezi doplňkové parametry a technologické podmínky svařování patří:

- *chemické složení netavicí se elektrody*
- *průměr netavicí se elektrody* – volí se podle velikosti intenzity svařovacího proudu
- *vyložení elektrody* – závisí na druhu svarového spoje a na geometrii úkosu
- *vrcholový úhel elektrody* – závisí na velikosti svařovacího proudu
- *průměr přídavného materiálu* – závisí na velikosti svařovacího proudu a tloušťce materiálu
- *průměr hubice hořáku* – volí se podle přístupnosti do svaru a šířky svaru
- *velikost pulzačního proudu* - závisí na tloušťce a poloze svařovaného materiálu
- *velikost průtoku ochranného plynu* – závisí na tloušťce svařovaného materiálu, na vnějším pracovním prostředí a na geometrii svarového úkosu
- *sklon přídavného drátu* – závisí na poloze svařování a přístupnosti do místa svaru
- *sklon hořáku* – závisí na poloze svařování a přístupnosti do místa svaru

7.3 Technologie svařování

7.3.1 Nelegované oceli

Svařování metodou TIG se používá pro svařování nelegovaných ocelí jen tam, kde je to technicky a ekonomicky zdůvodněné. Jedná se především o:

- svarové spoje velmi tenkých plechů (0,8 až 2 mm) - v provedení tupý I svar bez mezery, se stehováním v přípravku a s ochranou kořene a povrchu se dosahuje velmi malých deformací u zhotovených svarových spojů,
- svarové spoje náročné na vzhled, vysokou celistvost, pevnost a plastické vlastnosti,
- svarové spoje potrubí malých průměrů a tlouštěk,
- kořenové vrstvy svarových spojů, které mají zvláštní požadavky na formování kořene.

Pro svařování metodou TIG se používají jen oceli uklidněné třídy 11 a 12, které je možno svařovat bez předehřevu ($C < 0,22 \%$) nebo s předehřevem ($C > 0,22 \%$). Výše předehřevu se pohybuje v rozmezí teplot 150 až 250 °C. Vliv na použití předehřevu má též tloušťka materiálu – nad 25 mm se používá předehřev.

Nelegované oceli svařujeme stejnosměrným proudem na přímé polaritě (W-elektroda na (-) pólu zdroje). Jako přídavný materiál se používá svařovací drát o stejném chemickém složení jako má základní materiál, přičemž by se mělo u svarového kovu dosáhnout o cca 10 % vyšší pevnosti, než má základní materiál. Jako ochranný plyn se používá argon o čistotě min 99,9 % Ar. Parametry pro svařování tenkých plechů z nelegovaných ocelí jsou v tab. 7.2 .

Tab. 7.2 Doporučené parametry pro svařování nelegovaných ocelí

Tloušťka [mm]	Svařovací proud [A]	Průtok argonu [l . min ⁻¹]	Průměr přídavného drátu [mm]	Rychlost svařování [cm . min ⁻¹]
0,8	25 – 60	4	-	30 - 40
1,2	35 – 80	4	1,6	30 – 40
1,5	45 – 100	4	1,6	25 – 30
2,0	70 – 120	5	1,6	25 - 30

7.3.2 Nízkolegované oceli

Svařování metodou TIG se nejčastěji používá pro tenké plechy nebo trubky malých průměrů, které jsou vyrobeny z uklidněné nízkolegované oceli vyšší pevnosti (třída 13) nebo z nízkolegované oceli určené pro vyšší teploty (třída 15). Uvedené oceli se svařují bez předehřevu ($C_E \leq 0,45$) nebo s předehřevem ($C_E > 0,45$). Doporučené teploty předehřevu a tepelného zpracování jsou uvedeny v tab. 7.3.

Přídavné materiály musí být opět shodné svým chemickým složením se základním materiálem. Jako ochranný plyn se doporučuje argon čistoty 99,95 % Ar, svařovací proud stejnosměrný se zapojením na přímou polaritu. Pro příznivé formování kořene je doporučeno používat i sekundární ochranu z kořenové strany. Svarové spoje některých ocelí třídy 15 se musejí ihned po svaření tepelně zpracovat za účelem zvýšení jejich žáruvzdornosti a odolnosti proti vzniku trhlin.

Tab. 7.3 Doporučené teploty předehřevu a žihání pro nízkolegované oceli

Nízkolegovaná ocel	Teplota předehřevu [°C]	Teplota žihání [°C]
13 030, 13 120, 13 123	200 – 250	-
15 020	150 – 200	600 – 650
15 110	250 – 300	650 – 710
15 121	200 – 300	650 – 680
15 123	250 - 350	580 – 660
15 128	200 – 250	680 – 720
15 313	300 – 400	680 – 760
15 321	min 320	700 – 730

7.3.3 Vysokolegované austenitické oceli

Při svařování metodou TIG vysokolegovaných austenitických ocelí je třeba brát v úvahu jejich fyzikální a metalurgické vlastnosti, z kterých pak vyplývají následující zásady svařování:

- ♦ provést pečlivě přípravu svarových ploch s vysokou čistotou povrchu a přesné sestehování nebo upnutí svařovaných dílů,
- ♦ používat upínací přípravky, podložky a chladicí příložky za účelem zvýšeného odvodu tepla z místa svaru,
- ♦ používat stejnosměrný svařovací proud se zapojením na přímou polaritu – wolframová elektroda na (-) pólu svařovacího zdroje,
- ♦ při svařování tenkých plechů a při zhotovení kořenových vrstev používat stejnosměrný pulzující proud,

- ♦ jako ochranný plyn použit argon o vysoké čistotě min 99,95 %, ojediněle je možné použít i směs argonu s heliem,
- ♦ na kořen svaru používat vždy sekundární ochranu,
- ♦ při svařování používat minimální tepelný příkon - malé svařovací proudy a rychlosti, ochlazovat na interpass teplotu $T_{\max} = 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ♦ přídavné materiály musí mít vhodné chemické složení a vysokou jakost povrchu,
- ♦ pro svařování ocelí s větší tloušťkou používat přídavné materiály, které dávají svarový kov s malým obsahem delta feritu (3 až 5 %),
- ♦ pro svařování stabilizovaných ocelí používat přídavné materiály stabilizované niobem, pro svařování nízkouhlíkových ocelí použít přídavný materiál s nízkým obsahem uhlíku (max. 0,03 % C),
- ♦ používat tupý I svar bez mezery pro tloušťku materiálu $t < 1$, tupý I svar s mezerou pro tloušťku materiálu $1 < t < 4$ a tupý V svar pro $t > 4$,
- ♦ používat doporučené parametry svařování dle tab. 7.4.

Tab. 7.4 Doporučené parametry svařování tupých I svarů vysokolegovaných austenitických ocelí

Tloušťka Plechu * [mm]	Svařovací proud ** [A]	Průměr elektrody [mm]	Průměr svařovacího drátu [mm]	Průtok argonu [l . min ⁻¹]	Rychlost svařování [cm . min ⁻¹]
0,6	15 – 25	1,0	-	3	30 – 40
0,8	15 – 30	1,0	-	3 - 4	30 – 40
1,0	25 – 55	1,0	1,0	4	25 – 30
1,5	50 – 80	1,5	1,5	4 – 5	25 – 30
2,0	80 – 110	1,5 – 2,0	1,5 – 2,0	4 – 5	20 – 25
3,0	100 – 150	1,5 – 2,0	2,0 – 3,0	5	20 – 25
4,0	120 – 200	3,0	3,0	5 – 6	15 – 20
5,0	130 - 250	3,0	3,0	5 - 6	15 - 20

* - pro plechy tloušťek nad 5 mm se pak doporučuje použít metodu TIG jen na kořenovou vrstvu, ostatní výplňové vrstvy provést jinou produktivnější metodou,

** - platí pro polohu svařování PA, u ostatních poloh snížit velikost svařovacího proudu o 10 až 20 %.

7.3.4 Nejdůležitější zásady při svařování metodou TIG

- a) **Čistota.** Oblast svaru při svařování musí být zbavena mastnoty, oleje a ostatních nečistot. Také je nutno dbát na čistotu přídavného materiálu a čisté rukavice svářeče při svařování. Při svařování hliníku je nutno před začátkem svařování odstranit příliš silnou oxidační vrstvu a hrany na straně kořene srazit.
- b) **Přídavný materiál.** Aby se zabránilo oxidaci, musí být odtavující se konec přídavného materiálu vždy veden v plášti ochranného plynu. Přídavný materiál je nutno vést pod malým úhlem vzhledem k povrchu obrobku.
- c) **Materiály citlivé na plyn.** Při svařování materiálů citlivých na oxidaci se musí používat sekundární ochrana plynem, aby se zabránilo zkřehnutí a oxidaci materiálu.
- d) **Typ a průměr wolframových elektrod.** Typ a průměr wolframových elektrod je nutno zvolit dle velikosti proudu, polarity, druhu základního materiálu a složení ochranného plynu.
- e) **Broušení wolframových elektrod, drsnost povrchu.** Naostření špičky elektrod by mělo probíhat v axiálním směru. Čím nepatrnější je drsnost povrchu špičky, tím klidněji hoří

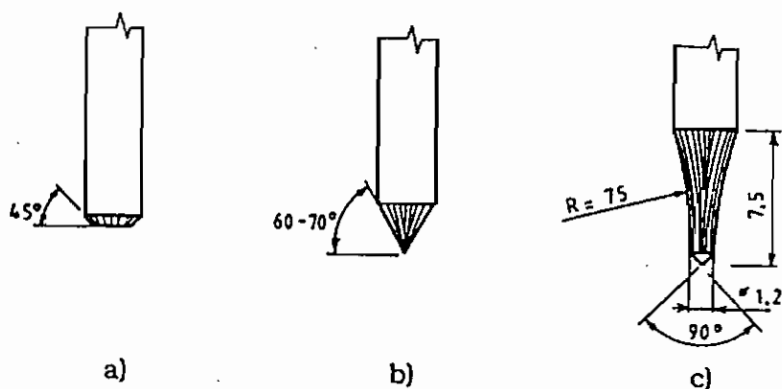
světelný oblouk a tím větší je jeho trvanlivost. Při naostřování musí brusný kotouč běžet proti špičce elektrod, aby se zabránilo zlomení křehkého materiálu.

- f) **Množství ochranného plynu, ochrana plynu.** Množství ochranného plynu je třeba přizpůsobit odpovídajícímu úkolu svařování, popř. velikosti plynové trysky. Po ukončení svařování musí proudit plyn dostatečně dlouho, aby se dostatečně chránila chladnoucí tavná lázeň a wolframové elektrody před oxidací.

7.4 Netavící se elektrody

Netavící se elektrody používané při svařování metodou TIG jsou tyčky kruhového průřezu, které jsou vyrobené z čistého wolframu nebo z wolframu, který je obohacený oxidy ThO_2 , ZrO_2 , LaO_2 a CeO_2 . Wolfram se používá na výrobu elektrod z důvodu jeho vysoké teploty tavení $3400\text{ }^\circ\text{C}$ a jeho velké emisní schopnosti. Elektrody, které jsou legované výše uvedenými oxidy zvyšují emisi elektronů, čímž se zabezpečí klidné hoření elektrického oblouku, zvýší se trvanlivost elektrod, zlepší se zapalování a elektrody vydrží i větší proudové zatížení.

Volba typu elektrody závisí na druhu použitého proudu, oblasti použití a na požadované kvalitě svarového spoje. Elektrody se dodávají v následujících průměrech: $0,5 - 1,0 - 1,6 - 2 - 2,5 - 3,2 - 4 - 5 - 6,3 - 8 - 10\text{ mm}$ a o délkách $50, 75, 150$ a 175 mm . Konce elektrod se brousí nebo ve zvláštních případech leptají. Příklady zakončení legovaných wolframových elektrod v závislosti na druhu použitého proudu a způsobu svařování jsou na obr. 7.8.



- a) pro ruční svařování střídavým proudem,
b) pro ruční svařování stejnosměrným proudem,
c) pro strojní svařování stejnosměrným proudem

Obr. 7.8 Příklady zakončení elektrod

Povrch broušených elektrod musí být čistý, kovově lesklý, bez trhlin, rýh a ořepů. Označení, složení a barevné značení je uvedeno v tab. 7.5. Obdobné elektrody vyráběné v ČR jsou uvedeny v tab. NA1 v níže uvedené ČSN EN normě. Wolframové elektrody jsou normované dle ČSN EN 26848.

Tab. 7.5 Označení, chemické složení barevné značení wolframových elektrod

Označení	Druh oxidu	Množství přísady v [%]	Barevné značení
WP	-	-	Zelená
WT 4	ThO ₂	0,35 – 0,55	Modrá
WT 10	ThO ₂	0,80 – 1,20	Žlutá
WT 20	ThO ₂	1,70 – 2,20	Červená
WT 30	ThO ₂	2,80 – 3,20	Fialová
WT 40	ThO ₂	3,80 – 4,20	Oranžová
WZ 3	ZrO ₂	0,15 – 0,50	Hnědá
WZ 8	ZrO ₂	0,70 – 0,90	Bílá
WL 10	LaO ₂	0,90 – 1,20	Černá
WC 20	CeO ₂	1,80 – 2,20	Šedá

Při použití běžných typů svařovacích hořáků je možné pro jednotlivé průměry a druhy wolframových elektrod doporučit rozsahy svařovacích proudů (tab. 7.6).

Tab. 7.6 Doporučené rozsahy proudu v závislosti na průměru elektrody

Průměr elektrody [mm]	Stejnosměrný proud [A]				Střídavý proud [A]	
	Elektroda záporná (-)		Elektroda kladná (+)		WP	WT, WL
	WP	WT, WL	WP	WT, WL		
0,5	2-20	2-20			2-15	2-15
1,0	10-75	10-75			15-55	15-70
1,6	40-130	60-150	10-20	10-20	45-90	60-125
2,0	75-180	100-200	15-25	15-25	65-125	85-160
2,5	130-230	170-250	17-30	17-30	80-140	120-210
3,2	160-310	225-330	20-35	20-35	150-190	150-250
4,0	275-450	350-480	35-50	35-50	180-260	240-350
5,0	400-625	500-675	50-70	50-70	240-350	350-460
6,3	550-875	650-950	65-100	65-100	300-450	430-575

7.5 Ochranné plyny

Ochranné plyny zabezpečují při svařování metodou TIG především ochranu wolframové elektrody, tavné lázně a přilehlého základního materiálu před účinky okolní atmosféry. Zároveň mají vliv na tepelný výkon svařovacího oblouku, jeho zapálení a stabilitu po celý čas svařovacího procesu.

Pro svařování vysokolegovaných ocelí se dnes používají *inertní* ochranné plyny jako je *argon* (Ar), *helium* (He) nebo jejich směsi. Z hlediska kvality svarového spoje a vysoké ceny těchto plynů je vždy nutné zvážit, jaký ochranný plyn se pro daný základní materiál použije.

7.5.1 Argon

Argon patří mezi inertní (netečné) plyny, tzn. že nereaguje s jinými chemickými prvky. Jeho chemická značka je Ar. Je to plyn bez barvy, chuti a zápachu a je těžší než

vzduch. Vyrábí se destilací zkapalněného vzduchu, neboť je v něm nejvíce obsažen. Má malou tepelnou vodivost a nízkou ionizační energii, a proto usnadňuje zapalování a stabilizaci elektrického oblouku.

Argon obsahuje též nečistoty jako jsou dusík, kyslík, vodík a vlhkost, což má nepříznivý vliv na kvalitu svarového spoje. Pro svařování metodou TIG se používá argon o vysoké čistotě, a to v rozmezí od 99,7 do 99,999 %. Argon s nejvyšší čistotou se musí používat pro materiály obzvláště citlivé na kyslík a dusík za nízkých teplot (od 200 °C), neboť se tím snižuje nebezpečí zkrěhnutí materiálu a vzniku trhlin.

Argon z domácí produkce se dodává o čistotě Ar 99,7 (značka 2N7), Ar 99,9 (značka 3N), Ar 99,95 (značka 3N5) a Ar 99,98 (značka 3N8). Pro svařování se používá jen argon 3N5 a 3N8. Argon 2N7 a 3N má nižší čistotu a používají se jen pro doplňkovou plynovou ochranu kořene svaru nebo částí základního materiálu, které jsou ohřáté na vysokou teplotu.

Podstatně vyšší čistotu mají dodávané argony od zahraničních firem, a to čistotu Ar 99,996 (značka Ar 4.6), Ar 99,998 (značka Ar 4.8) a Ar 99,999 (značka Ar 5.0). Uvedené druhy argonu mají přesně limitovaný i obsah nečistot – kyslíku, dusíku a vodní páry.

- | | |
|-----------------------------------|---|
| ❖ Označení argonu dle ČSN EN 439: | <i>Ochranný plyn EN 439 – I 1</i> |
| I – označení pro inertní plyn, | 1 – identifikační číslo pro čistý argon |

7.5.2 Helium

Helium tak jako argon patří mezi inertní plyny. Jeho chemická značka je He. Je to plyn bez barvy, chuti, zápachu a je lehčí než vzduch. Vyrábí se destilací vzduchu nebo štěpením zemního plynu. Má nízkou ionizační schopnost a vyžaduje dvakrát vyšší napětí svařovacího proudu, než při ochraně v argonu. Poskytuje vysoký tepelný výkon, a tím i vyšší rychlost svařovacího procesu. Elektrický oblouk se však obtížněji zapaluje, má horší stabilitu a hoří neklidně.

Čistota helia pro svařování se pohybuje od 99,996 % do 99,999 %. Nečistotami jsou ve většině případů další vzácné plyny. Helium se u nás nevyrábí, zabezpečuje se dovozem. Firma AGA dodává helium o čistotě 99,995 a větší pod označením **AGA Helium S** a firma Linde-Technoplyn helium o čistotě 99,996 % (značka **He 4.6**) a o čistotě 99,999 % (značka **He 5.0**)

Svařování metodou TIG v čistém heliu se používá jen v omezeném rozsahu, jeho pozitivní vlastnosti se využívají téměř vždy v kombinaci s argonem.

- | | |
|----------------------------------|--|
| ❖ Označení helia dle ČSN EN 439: | <i>Ochranný plyn EN 439 – I 2</i> |
| I – inertní plyn, | 2 – identifikační číslo pro čisté helium |

7.5.3 Směsi argon + helium

Směsi argonu a helia tvoří samostatnou skupinu inertních plynů. Množství obsahu helia se pohybuje od 1 do 95 %. Se stoupajícím obsahem helia se zvyšuje napětí na oblouku, a tím roste tepelný výkon oblouku. Z uvedeného důvodu můžeme použít vyšší svařovací rychlosti, což příznivě ovlivní produktivitu práce. Směsi argonu a helia se dále používají pro svařování materiálů o větších tloušťkách a materiálů s vysokou tepelnou vodivostí.

Při svařování TIG se nejčastěji používají tyto směsi Ar+He : 70/30 (70%Ar+30%He), 50/50 (50%Ar+50%He), 30/70 (30%Ar+70%He).

- | | |
|----------------------------|--|
| ❖ Označení dle ČSN EN 439: | Ochranný plyn EN 439 – I 3 |
| I – inertní plyn, | 3 – identifikační číslo pro směs Ar+He |

Poznámka:

Pro svařování metodou 141 vysokolegovaných ocelí se používají i směsi redukčních plynů Ar+H₂. Jsou to směsi 95 % Ar + 5 % H₂ a 80 % Ar + 20 % H₂. Tyto směsi mají redukční schopnosti a poskytují dobré svařovací vlastnosti. Jsou vhodné především pro mechanizované svařování.

- | | |
|-----------------------------|--|
| ❖ Označení dle ČSN EN 439: | Ochranný plyn EN 439 – R 1 |
| R – směsi redukčních plynů, | 1 – identifikační číslo při obsahu H ₂ > 0 až 15 % |
| | 2 – identifikační číslo při obsahu H ₂ > 15 až 35 % |

7.6 Přídavné materiály

Přídavný materiál pro svařování v ochranném plynu se volí podle chemického složení základního materiálu, mechanických vlastností základního materiálu, požadovaných vlastností svarového spoje a typu svarového spoje. Při volbě se vždy vychází z požadavku, že svarový spoj musí mít stejné nebo lepší vlastnosti jako základní materiál. Pro dynamicky namáhané konstrukce z oceli je třeba volit přídavný materiál, který vytvoří svarový kov o jednu řadu vyšší pevnosti, než má základní materiál.

Přídavný materiál pro svařování vysokolegovaných austenitických ocelí metodou TIG je souhrnné označení pro *svařovací drát*, který se přidává do svarové lázně, za účelem: dosáhnout požadovaného tvaru svarového spoje; legovat svarový kov přísadami, a tím zvýšit odolnost proti vzniku trhlin a dutin; nahradit prvky, které se při svařování vypálily; dodat odplyňující přísady do svarové lázně a zlepšit formování svaru.

Svařovací dráty jsou dráty kruhového průřezu potřebné jakosti, délky a průměru. Většinou se dodávají dráty v délce 1 m a o průměrech: 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0, které jsou baleny v papírových krabicích o hmotnosti 6 až 12 kg. Dráty musí být skladovány v suchém prostředí a v originálním balení. Požadavky na rozměry přídavných materiálů pro ruční svařování stanovuje norma ČSN EN 20544.

Označení svařovacích drátů

Pro označení těchto přídavných materiálů používají zahraniční výrobci vlastní systém firemního označování.

Dráty pro obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (metoda TIG) označuje např. **ESAB Vamberk**:

- ♦ *starší označení*: např.: **GI 113, GI 321, GI 412** - **GI** je základní značka pro metodu svařování TIG; první číslice z trojčíslí určuje jakost přídavného materiálu. Např.: **1** - pro svařování nelegovaných ocelí, **3** - pro svařování nízkolegované žárupevné oceli, **4** - pro svařování vysokolegovaných ocelí; poslední dvojčíslí je pořadové číslo výrobce,

♦ **nové označení: př.: OK Tigrod 13.09, OK Tigrod 16.10, OK Tigrod 16.31**

OK Tigrod – dráty pro svařování TIG; první číslice určuje: *1* - mechanizovaný způsob svařování, *2 až 9* ruční způsoby svařování; druhé číslo určuje druh přídavného materiálu např.: *3* - pro svařování nízkolegované oceli, *6* - pro svařování vysokolegované nerezové oceli; poslední dvě čísla za tečkou pořadové číslo výrobce nebo u nerezových drátů čísla 10 až 19 pro oceli typu 18Cr10Ni, čísla 30 až 39 pro oceli typu 18Cr10Ni3Mo, čísla 40 až 79 pro další typy austenitických ocelí.

Celkový sortiment přídavných materiálů uvádí firemní katalogy přídavných materiálů. V katalogu jsou uvedeny mechanické hodnoty svarového kovu, chemické složení drátu a celkový rozsah svařovacích parametrů pro jednotlivé typy svařovacích drátů, společně s vhodností použití pro určitý druh základního materiálu.

7.7 Vady svarových spojů

Kritériem jakosti svarového spoje je jeho celistvost, vnější povrch a požadované mechanické vlastnosti. Pro jednotlivé druhy svařovaných konstrukcí jsou vypracované normy jakosti (ČSN EN 25817 - ocel, ČSN EN 30042 - hliník), ve kterých se definuje přípustnost jednotlivých vad v konkrétních stupních jakosti svarového spoje. Jakostní stupeň svaru předepisuje konstruktér se zřetelem na umístění svaru, velikost a způsob namáhání, provozní podmínky a požadovanou bezpečnost.

Od září roku 2000 se řídí klasifikace vad svarových spojů novou normou, a to ČSN EN ISO 6520-1, která nahrazuje starou normu ČSN 05 0005 v plném rozsahu.

Literatura

BALEJ, Z., KUDĚLKA, V., OPLETAL, J.: Svařování metodou 141, TDS Brno, ZEROSS Ostrava, 2000.

Citované normy ČSN a ČSN EN

8. SVAŘOVÁNÍ MIG A MAG

Svařování v ochranných plynech tavící se elektrodou, uváděné jako proces MIG/MAG, nacházejí ve výrobě ocelových konstrukcí a technických zařízení i při jejich opravách široké využití jako nosné technologie spojování materiálů. Svařování MAG se využívá hlavně při spojování nelegovaných ocelí a nízkolegovaných ocelí. Svařování MIG se využívá při spojování vysokolegovaných ocelí a neželezných kovů.

Proces svařování metodou MIG a MAG lze zefektivnit zavedením automatizace procesu, což má příznivý vliv na jakost svařovaných výrobků, hygienu pracovního prostředí a na zlepšení pracovních podmínek personálu, obsluhujícího svařovací zařízení. Proto svařování MIG/MAG získalo na základě svých technických a technologických předností dominantní postavení mezi obloukovými metodami svařování. Vývoj těchto metod svařování byl v poslední době zaměřen na zvýšení produktivity svařování, zvýšení stability procesu hoření oblouku, zvýšení jakosti provádění svarových spojů a zlepšení hygieny práce při svařování.

Přednost metody svařování MIG a MAG před jinými metodami obloukového svařování je:

- vysoká produktivita a hospodárnost provádění spojů,
- dobrá operativnost i při svařování v polohách,
- nevyžaduje se použití tavidel,
- vhodnost pro ruční, mechanizované a robotizované provádění procesu svařování,
- možnost využití metod svařování u širokého sortimentu konstrukčních materiálů,
- příznivé využití vlastností provedených svarových spojů,
- nízké investiční náklady na realizaci metody v klasickém provedení,
- malé deformace svarových spojů a svařovaných konstrukcí,
- příznivé podmínky pro uplatnění v praxi (dostupnost svářečské techniky, přídavných materiálů a technických plynů).

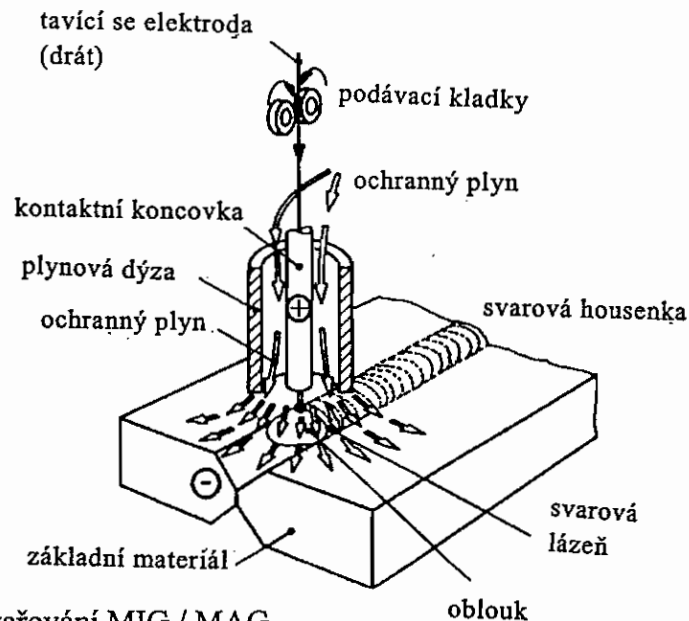
8.1 Princip metody

8.1.1 Princip metody MIG

Zdrojem tepla pro svařování je elektrický oblouk, který hoří mezi koncem tavící se elektrody (drátu) a základním materiálem, v prostředí inertního (netečného) plynu argonu (Ar), helia (He), případně Ar + H₂. Tavná svarová lázeň a její nejbližší okolí (tepelně ovlivněná oblast) je chráněna před nepříznivým vlivem okolní atmosféry (hlavně kyslíku - O₂ a dusíku N₂), viz obr. 8.1.

8.1.2 Princip metody MAG

Tepelný příkon pro svařování zajišťuje elektrický oblouk, který hoří mezi koncem tavící se elektrody (drátu) a základním materiálem, v prostředí aktivního (reagujícího) plynu (oxidu uhličitého - CO₂, Ar + CO₂, Ar + CO₂ + O₂), viz obr. 8.1. Z důvodu jednodílného, případně více dílného plynu se proto bude v závislosti na charakteru plynu měnit i chemické složení svarového kovu, zejména obsah C, Mn, Si prvků, a tím i jeho mechanické vlastnosti. Použitím směsných (více dílných) plynů se podařilo podstatně zlepšit formování svaru, zvýšit stabilitu hoření oblouku a snížit rozstřík kovu.

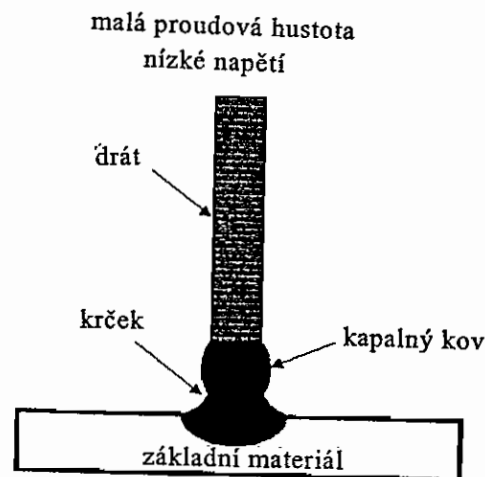


Obr. 8.1 Princip svařování MIG / MAG

8.2 Způsoby přenosu kovu v oblouku při svařování MIG/MAG

8.2.1 Zkratový přenos

Je vhodný pro MIG/MAG svařování tenkých plechů, na provádění kořenových vrstev a na svařování v polohách. Je doprovázen rozstříkáním kovu. Je realizovatelný při nízkém napětí na oblouku v rozsahu 14 až 20 V. Způsob je nazýván často jako svařování krátkým obloukem (viz obr. 8.2).



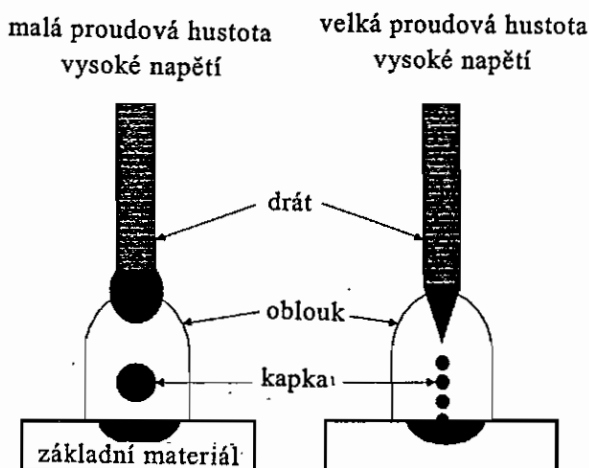
Obr. 8.2 Zkratový přenos kovu (krátký oblouk)

8.2.2 Polozkratový přenos

Je kombinací zkratového a bezzkratového přenosu, který se používá při MIG/MAG svařování plechů středních tloušťek. Drát se odtavuje převážně ve formě kapek větších rozměrů. Rozstříkání kovu je malé. Způsob je realizovatelný při středním napětí na oblouku v rozsahu 18 až 28 V.

8.2.3 Kapkový bez zkratový přenos

Uplatňuje se při MAG svařování ocelí větších tloušťek ve směsích Ar + CO₂ a při svařování MIG hliníku a jeho slitin velkých tloušťek většími průměry svařovacích drátů. Dosahuje se při větším napětí na oblouku v rozsahu 25 až 35 V. Často je nazýván jako svařování dlouhým obloukem (viz obr. 8.3).



Obr. 8.3 Bezzkratový přenos kovu (dlouhý oblouk)

8.2.4 Sprchový přenos

Dosahuje se vysokým tepelným příkonem - při vysoké proudové hustotě svařovacího proudu. Využívá se při svařování kovových materiálů větších tloušťek. Při svařování je nutno použít směsné plyny na bázi argonu. Přenos kovu se realizuje ve formě malých kapek. Proces je stabilní a prakticky bez rozstříku.

8.2.5 Impulsní přenos

Využívá se v širokém rozsahu tepelných příkonů. Při svařování tenkých materiálů má však nejvýraznější přednosti. Přenos kovu se realizuje ve formě kapek. Přenos kovu v oblouku je velmi stabilní a prakticky bez rozstříku. Vyžaduje plyny na bázi argonu, v oxidu uhličitém jej nelze realizovat. Přenos se realizuje při pulzujícím proudu, pravidelně se měnícím mezi hladinou základního (nižšího) proudu a impulsního (vyššího) proudu. Jde o kombinovaný kapkový a sprchový přenos kovu.

8.2.6 Přenos rotujícím obloukem

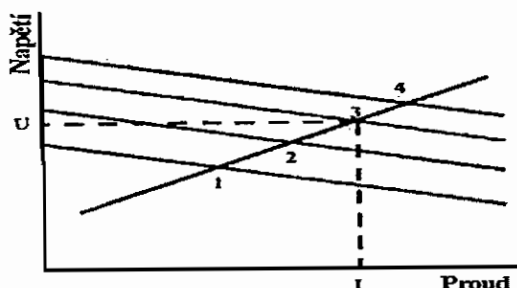
Zabezpečuje se výlučně jen ve směsných plynech na bázi argonu s vysokým obsahem helia. Používá se při strojním (automatickém) svařování ocelí velkých tloušťek. Vysoký tepelný příkon oblouku zabezpečuje vysokou produktivitu svařování MIG vysokými svařovacími rychlostmi.

O druhu přenosu kovu rozhodují především elektrické veličiny - svařovací proud a napětí na oblouku, druh svařovacího proudu a polarita na elektrodě (drátu), druh a průměr tavící se elektrody a druh použitého ochranného plynu.

8.3 Charakteristiky svařovacích zdrojů a oblouku

8.3.1 Statická (V- A) charakteristika zdroje

Vyjadřuje závislost mezi napětím a svařovacím proudem v ustáleném stavu, viz obr. 8.4.



Obr. 8.4 Plochá V - A charakteristika zdroje s „konstantním“ napětím

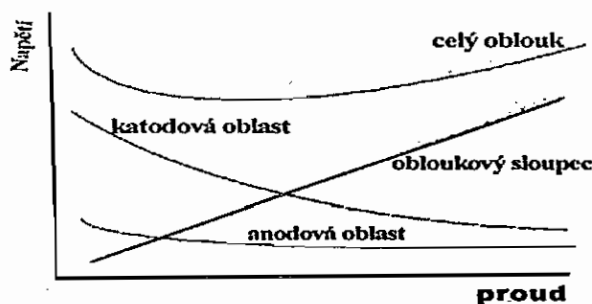
Když svařovacím obvodem neprotéká proud, je napětí zdroje největší - napětí naprázdno. Se stoupajícím proudovým zatížením napětí na zdroji klesá. Při zkratu je napětí na zdroji blízké nule. Když se zvyšováním svařovacího proudu napětí zdroje jen málo mění, jedná se o zdroj s konstantním napětím na oblouku, resp. zdroj s plochou charakteristikou, viz obr.8.4. Tento typ svařovacího zdroje je vhodný na obloukové svařování MIG/MAG.

8.3.2 Dynamická charakteristika zdroje

Má podstatný vliv na stabilitu svařovacího procesu, tj. dynamické vlastnosti svařovacího zdroje. Přechodový děj (proudová změna) závisí na indukčnosti L a odporu elektrického obvodu R . Průběh přechodového děje (dynamická charakteristika zdroje) ovlivňuje při svařování MIG/MAG nejen podmínky pro zapálení elektrického oblouku, ale i způsob odtavování elektrody (drátu), přenos kovu do svarové lázně a rozstřík kovu. Při těchto výrazných změnách proudu a napětí musí proto svařovací zdroj reagovat velmi rychle - dynamicky.

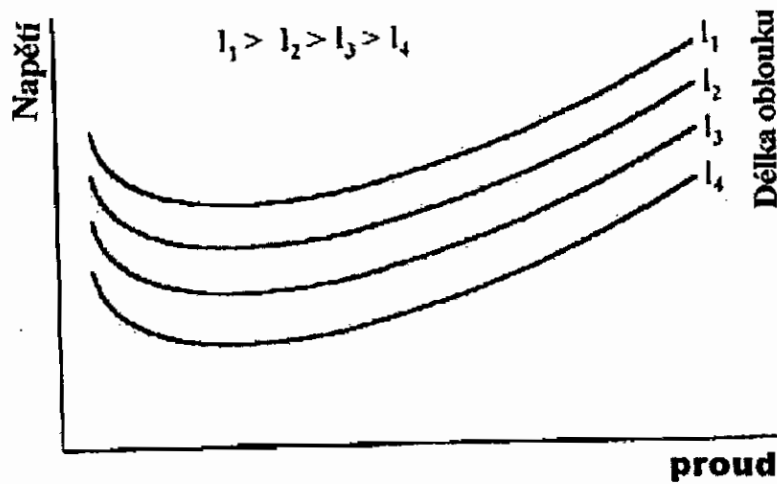
8.3.3 Statická charakteristika oblouku

Je závislost napětí a proudu. Celkový odpor elektrického oblouku je tvořen odporem katodové oblasti, obloukového sloupce a anodové oblasti. Obloukem protékající elektrický proud vyvolává v jednotlivých oblastech oblouku úbytky napětí. Obloukový sloupec je spotřebič s konstantním elektrickým odporem, viz obr. 8.5.



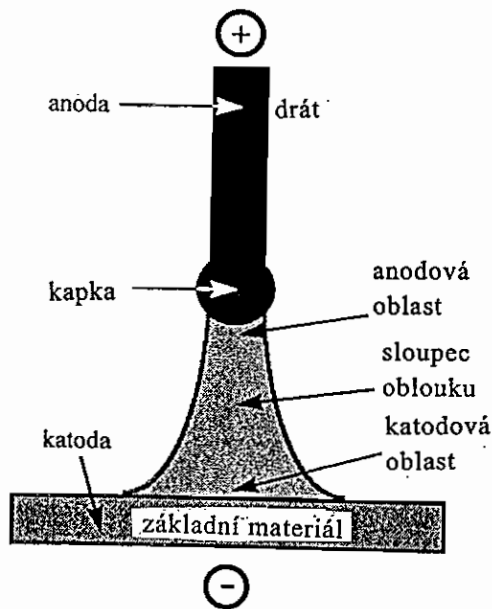
Obr. 8.5 Statická charakteristika oblouku a jeho částí

Napětí na svařovacím oblouku je součet napěťových úbytků v anodové oblasti, katodové oblasti a v oblasti obloukového sloupce. Obr. 8.6 dokumentuje statické charakteristiky elektrického oblouku při jeho různých délkách.

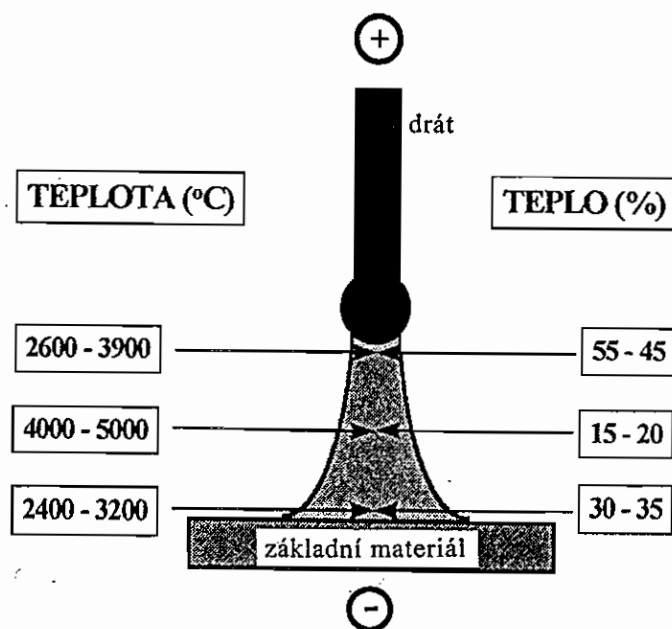


Obr. 8.6 Statické voltampérové charakteristiky elektrického oblouku

Napětí na oblouku a tedy i tepelný výkon oblouku se zvyšuje se zvětšující se délkou oblouku. Delší oblouk má větší tepelný výkon. Každý oblouk má tři oblasti, viz obr. 8.7, na kterých jsou různé teplotní a tepelné poměry, viz obr. 8.8.



Obr. 8.7 Oblasti svařovacího oblouku

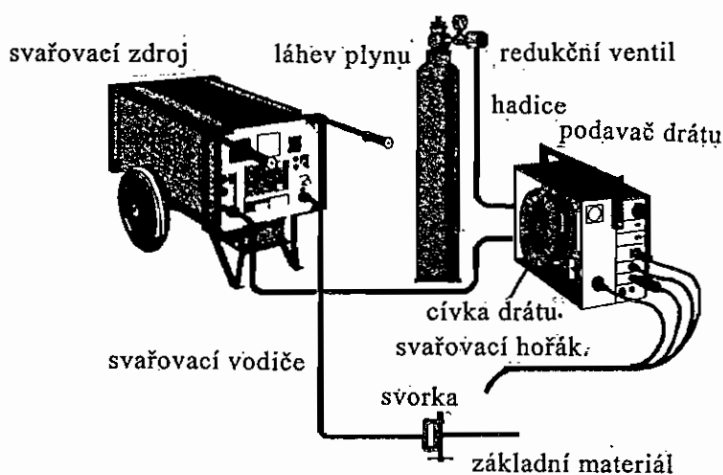


Obr. 8.8 Teplotní a tepelné poměry ve svařovacím oblouku

8.4 Zařízení pro svařování MIG/MAG

V praxi se realizuje svařování MIG/MAG jako ruční poloautomatizované, strojní, robotizované a plněautomatizované, čemuž se musí přizpůsobit i konstrukční řešení svařovacích zařízení.

Každé svařovací zařízení MIG/MAG je složeno z těchto základních komponent, viz obr. 8.9 - svařovacího zdroje, mechanismu pro podávání tavicí se elektrody (drátu), vedení drátu (bowdenu), svařovacího hořáku, řídicí jednotky, zásobníku (cívky) drátu, zásobníku plynu, chladicí jednotky, soustavy vodičů elektrického proudu (svařovací obvod a řídicí obvody), soustavy hadic pro rozvod ochranného plynu a chladicí vody, bezpečnostních a ochranných prvků.



Obr. 8.9 Svařovací zařízení MIG/MAG

8.4.1 Základní typy zařízení MIG / MAG

U svařovacích zařízení MIG/MAG, je konstrukční uspořádání podávání drátu řešeno: s tlačáním drátu v bowdenu (push systém), s tažením drátu v bowdenu (pull systém) a s tlačno - tažným posuvem drátu v bowdenu (push - pull systém).

8.4.2 Svařovací zdroje MIG/MAG

Pro svařování MIG/MAG se používají zdroje stejnosměrného (usměrněného) proudu s plochou statickou charakteristikou a s vhodnými dynamickými vlastnostmi.

Točivé zdroje - svařovací generátory s plochou statickou charakteristikou jsou použitelné na svařování MIG/MAG sprchovým přenosem (zdroje vyššího výkonu do 300 A) i zkratovým přenosem (zdroje menšího výkonu do 750 A). Točivé zdroje mají velkou hlučnost, velkou hmotnost a malou efektivnost využití energie, proto se nahrazují svařovacími usměrňovači.

Svařovací usměrňovače jsou zařízení s plochou statickou charakteristikou. Používají se pro sprchový i zkratový přenos kovu v oblouku. Pro svařování tenkých plechů se používají nízkovýkonové usměrňovače se svařovacím proudem do 160 A pro zkratový přenos kovu v oblouku, při používání svařovacích drátů menších průměrů. Vysokovýkonové svařovací usměrňovače mohou trvale poskytovat proud až do 600 A, využívají sprchový přenos kovu v oblouku, při používání svařovacích drátů větších průměrů.

Měníče (střídače, invertory) - jsou nejnovějšími typy svařovacích zařízení MIG/MAG. Zvýšení pracovní frekvence zdroje na více než 20 kHz, umožňuje podstatně snížit hmotnost transformátoru, a tím i celého svařovacího zařízení. Tyto zdroje mají nižší reakční dobu,

rychlé řízení a kontrolu svařovacího procesu, dobrou regulaci statické charakteristiky a dobrou realizaci impulzního svařování. Tzn., že mají lepší zapalování oblouku, dobrý impulzní přenos kovu v oblouku a snížený rozstřík kovu z oblouku.

8.4.3 Podavače drátu

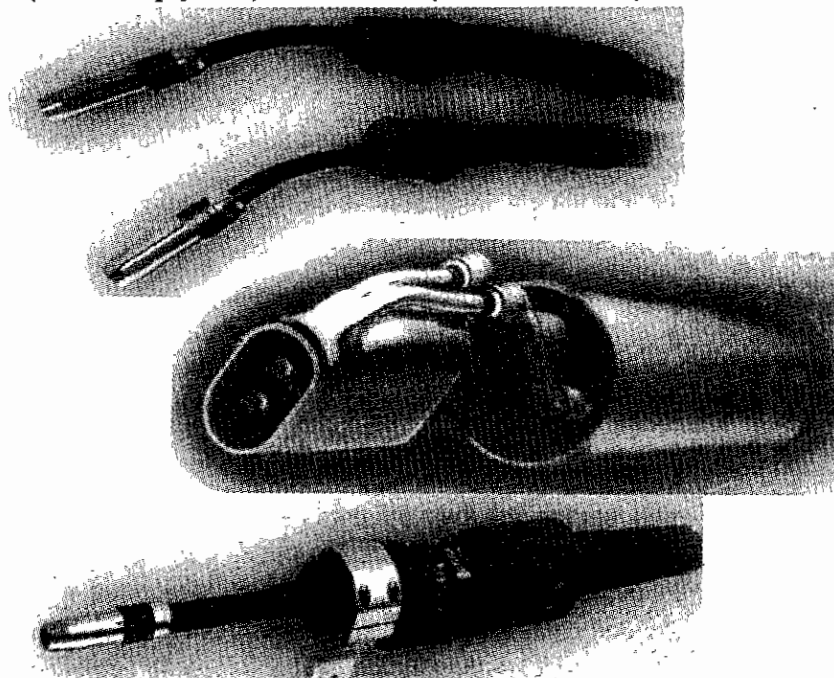
Rovnoměrná rychlost podávání drátu (elektrody) při svařování MIG/MAG do místa jeho odtavování, je základním předpokladem pro dosažení stabilního procesu hoření oblouku a dobré jakosti svarového spoje. Podavač je zařízení s regulačním elektromotorem a mechanickou převodovkou. Dále obsahuje jeden nebo více párů podávacích kladek. Kladky rozlišujeme dle funkce na hnací, přítlačné a rovnací. Z podavače vystupuje drát do vodící trubičky a do kovového bowdenu. Bowden usměrňuje pohyb drátu do svařovacího hořáku. Minimální délka bowdenu pro ruční svařování je 1,5 až 2 m pro plynulý bezodporový přechod při posuvu drátu do špičky (hubice) hořáku. Při strojním svařování může být délka bowdenu menší.

Při použití drátu malé tuhosti, např. drátu z hliníku a jeho slitin, se doporučuje používat bowdenu s vloženou trubičkou z teflonu nebo silikonu, pro snížení tření při posuvu drátu.

8.4.4 Svařovací hořáky MIG / MAG

Svařovací hořáky zabezpečují při svařování: přívod svařovacího proudu na tavící se elektrodu (drát) přes koncovku - špičku, usměrňování ochranného plynu do místa svaru přes dýzu - hubici, usměrnění drátu do místa oblouku a průtok chladící kapaliny do kontaktní koncovky a dýzy (pro hořáky chlazené vodou).

Hořáky se dělí dle provozních podmínek na ruční a strojní. Podle proudového zatížení na hořáky do 200 A (chlazené plynem) a nad 200A (chlazené vodou) - viz obr. 8.10.



Obr. 8.10 Hořáky MIG/MAG pro ruční, strojní a robotizovaná zařízení

Nejvíce tepelně namáhanými dílci hořáku je kontaktní koncovka (špička) a dýza ochranného plynu (hubice). Průměr vodícího otvoru pro drát v kontaktní koncovce je asi

o 0,2 mm větší, než je průměr drátu. Koncovka je z mědi (Cu), případně mědi legované chromem (Cr). Průměr dýzy se volí podle podmínek svařování, hlavně podle svařovacího proudu a podle tepelné vodivosti svařovaného materiálu, případně podle šířky svarového spoje.

8.4.5 Zásobník ochranného plynu

Technické plyny pro svařování MIG/MAG (inertní i aktivní) se nejčastěji dodávají v tlakových nádobách (v lahvích o objemu 20 l). Zkapalněný oxid uhličitý je v lahvích s vnitřním přetlakem 5 MPa.

Láhve na inertní plyny (argon, helium) a směsi se dodávají ve větších lahvích o objemu 40 l. Inertní plyny jsou v láhvi v plynném stavu s vnitřním přetlakem 15 až 20 MPa. Redukční ventil na oxid uhličitý je vybaven tlakoměrem, průtokoměrem a předřazeným elektrickým ohřívacem proti zamrznutí ventilu při větším odběru z láhve. Redukční ventil na inertní plyny je obdobný, ale neobsahuje ohříváč.

8.4.6 Řídící jednotka

Řídící jednotka zabezpečuje dálkové ovládání svařovacího obvodu i okruhu pro řízení činnosti zdroje, např. předfuk a dofuk argonu, časové vymezení chlazení vodou, programování svařovacího cyklu apod.

8.4.7 Svařovací vodiče a hadice

Svařovací vodiče spojují základní komponenty svařovacího obvodu, kterými protéká svařovací proud. Ke zdroji i řídicí jednotce se vodiče připojují pomocí bajonetových koncovek. Na svarech se vodič připevňuje svařovací svorkou. Svařovací vodiče mají být co nejkratší a musí mít dostatečný průřez jádra vhodný pro používaný rozsah svařovacího proudu.

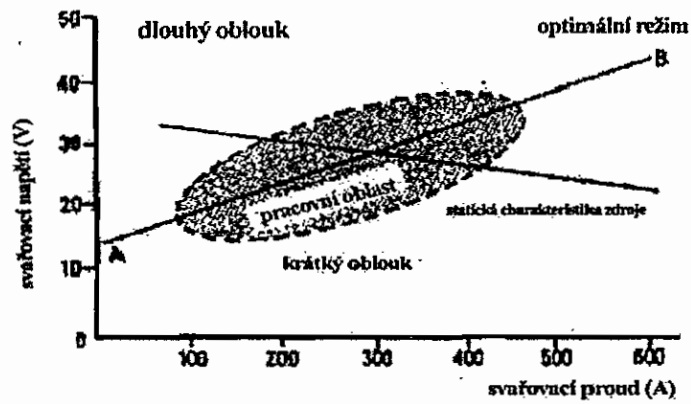
Hadice pro rozvod ochranného plynu a chladicí vody musí být lehké a ohebné, které jsou z teflonu nebo silonu. Délka hadice má být co nejmenší.

8.5 Parametry a podmínky svařování

Činitelé, které při svařování MIG/MAG nejvíce ovlivňují tvar a rozměry svaru, se nazývají základní parametry svařování. Ovlivňují především tepelný příkon svařování a patří k nim svařovací proud (I), svařovací napětí na oblouku (V) a postupná rychlost svařování (v_s). Měrný tepelný příkon svařování (q) určuje množství tepla na jednotku délky svaru ($J \cdot mm^{-1}$).

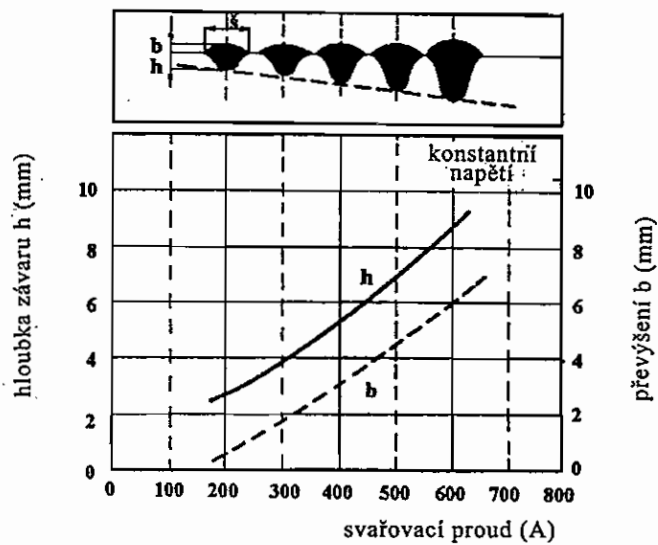
Kromě základních parametrů svařování, ovlivňují tvar a rozměry svarů MIG/MAG i další veličiny - doplňkové parametry, označované jako podmínky svařování. Jsou to: druh a průměr drátu, polarita na elektrodě, výlet drátu z kontaktní koncovky, sklon hořáku, druh a množství ochranného plynu, tvar a rozměry svarových ploch, druh přenosu kovu v oblouku, teplota předehřevu základního materiálu, plocha svařování a směr svařování.

Doporučené hodnoty svařovacího proudu a napětí na oblouku, viz obr. 8.11.

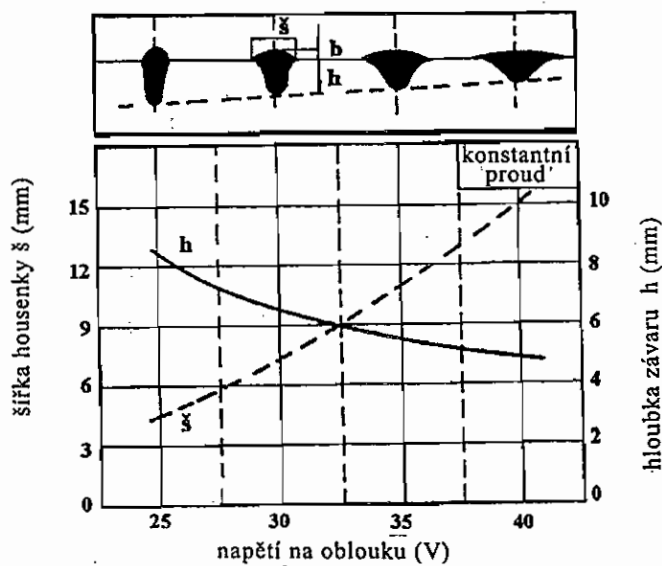


Obr. 8.11 Optimální režim svařování MIG a MAG (příklad)

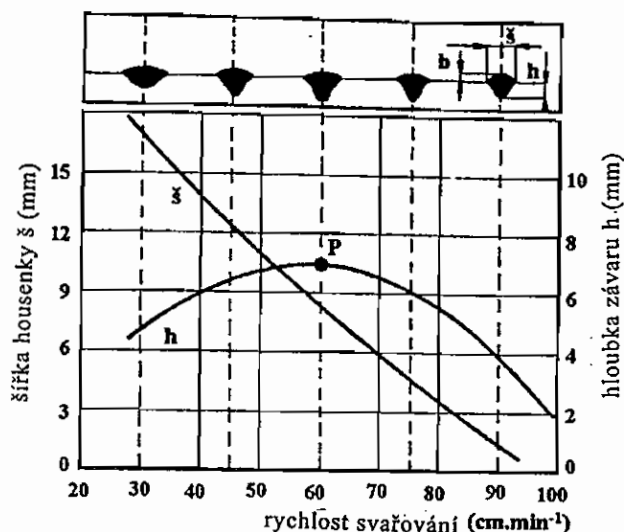
Vliv svařovacího proudu, napětí na oblouku a rychlosti na tvar svarové housenky, viz obr. 8.12, 8.13 a 8.14.



Obr. 8.12 Vliv svařovacího proudu na tvar svarové housenky



Obr. 8.13 Vliv svařovacího napětí na oblouku na tvar svarové housenky



Obr. 8.14 Vliv rychlosti svařování na tvar svarové housenky

Při svařování MIG/MAG se používají přednostně dráty (přídavné materiály) malého průměru, tj. 0,8 až 1,6 mm. Používá se téměř výlučně stejnoseměrný (usměrněný) proud a nepřímá polarita (plus pól na svařovacím hořáku). Výlet drátu z kontaktní koncovky se doporučuje:

$$l = 5 + 5 \cdot d \text{ (svařování v CO}_2\text{)}$$

$$l = 8 + 5 \cdot d \text{ (svařování ve směsných plynech)}$$

$$l = \text{výlet drátu (mm), } d = \text{průměr drátu (mm)}$$

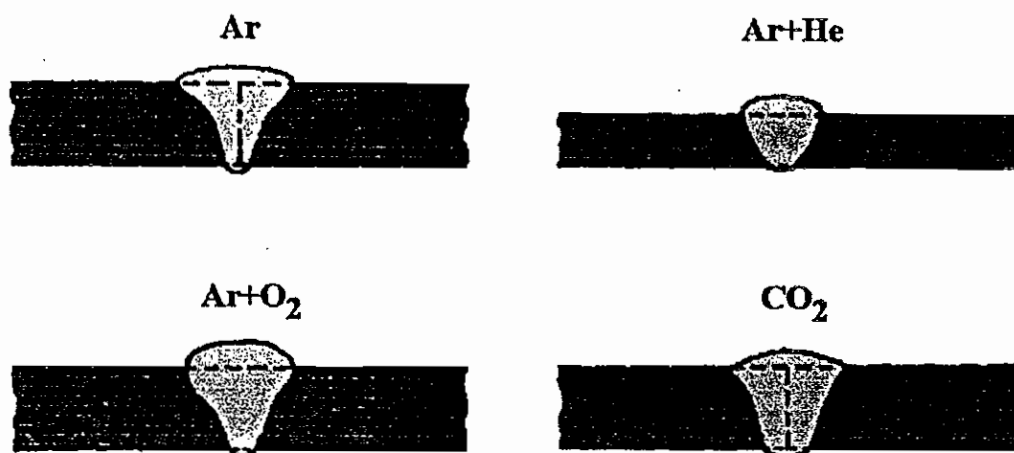
Vzdálenost hořáku - plynové dýzy od povrchu svařovaného materiálu (H) je třeba při ručním svařování MIG/MAG udržovat v rozsahu 15 až 25 mm, podle průměru dýzy a typu spoje. Délka oblouku (h) při svařování zkratovým přenosem je cca 3 mm, při svařování dlouhým obloukem (bezzkratovým přenosem) je cca 6 mm. Průměr otvoru pro uvedení drátu v kontaktní koncovce se volí podle průměru drátu tak, aby se zabezpečil dobrý přestup proudu na drát (tavící se elektrodu) - pro průměry drátu $d = 0,6$ až $1,6$ mm je $d + 0,05$ až $d + 0,15$ mm (vůle se zvětšuje se zvětšujícím se průměrem drátu).

Svařování MIG/MAG se v praxi aplikuje jako svařování vpřed (levosměrné) - úhel sklonu hořáku od povrchu základního materiálu je větší než 90° (110 až 125°), svar je širší, hloubka průvaru a převýšení svaru je menší. Při svařování vzad (pravosměrné) - úhel sklonu hořáku je menší než 90° (60° až 70°), svar je užší, hloubka průvaru a převýšení svaru je menší. Při svařování vpřed je výhodné používat zkratový přenos kovu, při svařování vzad je výhodné používat sprchový přenos kovu v oblouku.

Předehřev základního materiálu zvětšuje šířku svaru a hloubku průvaru, převýšení svaru se zmenšuje, zlepšuje se kresba svarové housenky (vzhled).

Přenos kovu v oblouku ovlivňuje formu a rozměry svaru. Při zkratovém přenosu je hrubší kresba svarové housenky, než při bezzkratovém přenosu kovu v oblouku. Zkratový přenos se používá při svařování tlouštěk materiálů do 3 mm a pro kořenové vrstvy (bez podložení a podložek). Sprchový přenos se využívá při svařování středních a velkých tlouštěk materiálu a pro kořenové housenky (za použití podložek pro formování kořene svaru).

Druh ochranného plynu podstatně ovlivňuje tvar a rozměry svaru - viz obr. 8.15.



Obr. 8.15 Vliv ochranného plynu na tvar housenky

8.6 Ochranné plyny

Ochranné plyny plní tyto funkce:

- chrání konec tavící se elektrody (drátu), svarovou lázeň a vysokoohřátou oblast základního materiálu vedle svaru před škodlivými účinky vzdušné atmosféry (před oxidací a naplyněním),
- vytváří příznivé podmínky pro zapálení a hoření oblouku, přenos kovu v oblouku a stabilitu svařovacího procesu obecně.

Ochranné plyny výrazně ovlivňují:

Tepelný výkon oblouku, přenos kovu v oblouku, chemické složení, formu a rozměry svaru, celistvost a užitkové vlastnosti svařových spojů, produktivitu a hospodárnost svařování.

Při svařování MIG/MAG se používají tyto technické plyny:

Argon (Ar), oxid uhličitý (CO₂), helium (He), kyslík (O₂) a jejich směsi. Jednokomponentní ochranné plyny nezaručují při svařování MIG/MAG některých kovů a slitin požadovaný stabilní svařovací proces a pravidelný přenos kovu v oblouku. Také formování svaru a jeho celistvost není při použití jednokomponentních plynů vždy na požadované jakostní úrovni. Proto se jednokomponentní plyny nahrazují vhodnými směsmi plynů na bázi argonu. Do Ar se v zájmu zvýšení stability oblouku přidávají oxidační plyny CO₂ a O₂, pro zvýšení tepelného výkonu oblouku se přidává He. Optimálním složením směsi a vhodnou koncentrací jednotlivých složek je možné zvýšit stabilitu procesu, snížit rozstřík, zlepšit formování svaru a zvýšit produktivitu svařování MIG/MAG. Pro jednotlivé materiály a jejich tloušťky je třeba vždy zvolit optimální složení směsných plynů.

V praxi se používají jednokomponentní ochranné plyny až čtřekomponentní plyny (např. Ar, CO₂, Ar + CO₂, Ar + O₂, Ar + He, Ar + CO₂ + O₂, Ar + He + CO₂, Ar + He + O₂).

Podle ČSN EN 439 se ochranné plyny zařazují do skupin. Inertní plyny (I) - Ar, He, Ar + He pro MIG svařování. Oxidační plyny (M) - Ar + CO₂, Ar + O₂, Ar + CO₂ + O₂, Ar + He + CO₂ + O₂ - pro MAG svařování. Redukční plyny (R) - Ar + H₂, N₂ + H₂. Oxidační plyny (C) - CO₂, CO₂ + O₂). Nereagující plyny (F) - N₂.

Pro ochranu kořene svaru se u vysokolegovaných ocelí používá tzv. formovací plyn, např. Ar, Ar + N₂, čímž se dosáhne jakostního povrchu kořene.

8.7 Přídavné materiály

Přídavné materiály pro MIG/MAG svařování se používají jako drátové nebo trubičkové elektrody, vhodného chemického složení a operativních svařovacích vlastností. Dodávají se navinuté na speciálních cívkách a ve vhodných obalech, které zabraňují poškození a znehodnocení.

Přídavné materiály plní při svařování tyto funkce:

- doplňují objem svarové lázně a zabezpečují tak svary požadovaného tvaru a průřezu,
- nahrazují prvky, které se při svařování vypálily nebo jinak snížily svou koncentraci ve svaru,
- dodávají vhodné legovací a dezoxidační přísady do svaru pro zlepšení užitkových vlastností,
- jsou částí svařovacího obvodu (vodičem elektrického proudu).

Pro splnění těchto funkcí a dalších technologických požadavků, musí mít tyto vlastnosti:

Vhodné chemické složení, vhodný průřez, vysokou čistotu a hladkost povrchu, přiměřenou tvrdost a tuhost i požadované rozměrové a tvarové tolerance.

Pro svařování MAG mají dráty zvýšený obsah manganu (Mn) a křemíku (Si) z důvodu jejich většího propalu a silnějšího dezoxidačního účinku svarové lázně. Drátové elektrody se používají pro ruční i strojní (automatové, robotizované) svařování.

Drátové elektrody plného kruhového průřezu pro svařování ocelí se vyrábí v průměrech:

Ø 0,6; Ø 0,8; Ø 1,0; Ø 1,2; Ø 1,6 mm pro svařování nezelezných kovů Ø 0,8; Ø 1,0; Ø 1,2; Ø 1,6; Ø 2,4 mm. Tyto mohou být na povrchu pokryty tenkou vrstvou mědi, aby se zabránilo jejich korozi při transportu a skladování. Měděná vrstva zlepšuje přívod proudu v kontaktní koncovce svařovacího hořáku.

Drátové elektrody jsou uvedeny a rozříděny, např. ČSN EN 440 (druhy a směrné chemické složení). Označují se např. G2Si, G2Ti, G3N1, G4Mo, G2Al (symbol chemického složení), ev. G46 3 M G3Si (symbol vlastností a chemického složení), který obsahuje pevnostní vlastnosti, tažnost, rázové vlastnosti svarového kovu, druh ochranného plynu a směrné chemické složení.

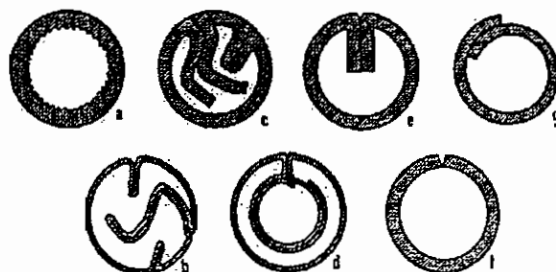
Trubičkové elektrody plněné vhodnými přísadami se dělí podle chemického složení náplně na: elektrody s rutilovou náplní, bázickou náplní a kovovou náplní.

Podle použití se trubičkové elektrody dělí na elektrody pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí (s kovovou, rutilovou nebo bázickou náplní); pro svařování vysokolegovaných ocelí (s rutilovou náplní); pro opravy a renovace (s kovovou, rutilovou a bázickou náplní).

Podle nutnosti použití plynové ochrany se trubičkové elektrody dělí na:

elektrody vyžadující externí plynovou ochranu a elektrody s vlastní plynovou ochranou (bez nutnosti použití ochranného plynu).

Vyrábí se v průměrech: \varnothing 1; \varnothing 1,2; \varnothing 1,4; \varnothing 1,6; \varnothing 2; \varnothing 2,4 mm. Dodávají se na drátěných cívkách, na plastových cívkách, ev. ve svítcích. Typy trubičkových elektrod - viz obr. 8.16.



Obr. 8.16 Typy trubičkových elektrod

Trubičkové elektrody se používají pro ruční i strojní (automatové, robotizované) svařování MAG. Jsou uvedeny a rozříděny, např. v ČSN EN 758 (př. ozn. 81 Ni1 - H, 81B2 - H, 91K2 - H, ...). Předností trubičkových elektrod pro svařování MAG je velmi malý obsah vodíku (H_2) ve svaru.

8.8 Svařování plazma - MIG

Je to kombinace svařování MIG a plazmového svařování. Odtavení drátu se zabezpečuje obloukem MIG, který hoří v prostředí plazmy. Hořák plazma MIG má dvě elektricky izolované elektrody. Jednu elektrodu tvoří drátová elektroda, která se posouvá z hořáku a postupně se odtavuje. Druhou elektrodu tvoří netavící se wolframová elektroda, která je v hořáku umístěna asymetricky.

Přenesený plazmový oblouk vzniká mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem nebo mezi wolframovou elektrodou a měděnou vodou chlazenou dýzou (elektrodou) a základním materiálem. Obě elektrody mají kladnou polaritu vzhledem k základnímu materiálu. Svařovací proud v plazmovém obvodu je malý vzhledem k proudu v obvodu MIG. Vysoké proudové zatížení drátu a prostředí plazmy způsobuje, že drát se v oblouku značně přehřívá a deformuje (zakřivuje se volný konec do tvaru spirály). Vzniká tak přenos kovu v rotujícím oblouku. Vzniká svar (návar) o šířce až 20 mm. Tloušťka návaru je 4 až 6 mm. Promíšení návaru se základním materiálem je minimální.

Přednosti navařování způsobem plazma - MIG: vysoký výkon odtavení drátu, malé promíšení návaru se základním materiálem, vysoká jakost návaru, příznivý průřez navařované housenky, vysoká stabilita oblouku a provádění návaru malých tloušťek.

8.9 Elektroplynové svařování

Toto svařování se podobá elektrostruskovému svařování. Jde o vertikální svařování zdola nahoru. Elektroplynové svařování je klasický obloukový proces MIG. Oblouk hoří v prostředí ochranného plynu, drát se odtavuje obloukem, vytváří se tavná lázeň, která se udržuje v prostoru vymezeném svařovanými materiály a měděnými příložkami (jedna je pevná a druhá pohyblivá). Profil svaru je v kořenu i na povrchu formován měděnými příložkami. Mezera mezi spojovanými materiály je 15 až 17 mm pro svar I. Svarové plochy

je možno upravit i do „V“ - úkosu bez otupení nebo s malým otupením v kořeni svaru. Drát má směřovat do středu svaru (natavené lázně). Tuto metodu a způsob svařování je možno realizovat dráty plnými i trubičkovými dráty plněnými tavidlem. Optimální natavení svarových ploch základnímu materiálu je 3 až 5 mm.

8.10 Zdravotní a bezpečnostní rizika

Při svařování MIG/MAG je třeba respektovat a dodržovat všeobecné zásady pro tavné svařování kovů, uvedené v ČSN 05 0600 „Projektování a příprava pracovišť“ a ČSN 05 0601 „Provoz“ i ČSN 05 0630 „Bezpečnostní ustanovení pro obloukové svařování“.

Při svařování se mohou vyskytnout tato nebezpečí: nebezpečí požáru a výbuchu, nebezpečí úrazu elektrickým proudem, rozstříkáním kovu, popálením, nebezpečí od pohybujících se částí svařovacího zařízení, nebezpečí poškození zdraví působením svářečských dýmů, kovových par, aerosolů, zařízení nebo hluku, nebezpečí poškození zdraví neúnosnými pracovními mikroklimatickými podmínkami, nadměrnou fyzickou nebo nervově psychickou zátěží a nevyhovujícím osvětlením

Proto se musí na pracovištích provádět bezpečnostní prohlídky, opatření, kontroly a revize zařízení, účinné provětrávání a odsávání pracovišť, zajištění hasicích prostředků a osobních ochranných prostředků, provádět střídání a pracovní přestávky pracovníků dle předepsaných zásad bezpečnosti práce a ochrany zdraví při práci (viz výše uvedené bezpečnostní ČSN).

Literatura

BALEJ, Z.; KUDĚLKA, V., OPLETAL, J.: Svařování metodou 141. TDS Brno, ZEROSS Ostrava, 2000.

ORSZÁGH, P., ORSZÁGH, V.: Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovů. Bratislava, 2000.

KUDĚLKA, V., BALEJ, Z., OPLETAL, J.: Směrnice a postupy pro svařování MIG/MAG. TDS Brno, Brno 2000.

Citované normy ČSN a ČSN EN

9. OSTATNÍ ZPŮSOBY SVAŘOVÁNÍ

Nekonvenční způsoby svařování zaujímají širokou a velice rozmanitou oblast. Na rozdíl od běžných metod svařování jsou charakteristické využíváním různých fyzikálních jevů, které mohou být zdrojem tepla, a nebo jsou založeny na působení difuzních procesů. Jejich uplatnění je zaměřeno především na užití u neběžných materiálů, kovů se špatnou svařitelností či vůbec tavně nesvařitelných, různé vzájemné kombinace materiálů či detailů s mimořádnými nároky na přesnost a podobně. Tyto neběžné metody svařování lze tematicky rozdělit do tří skupin:

- metody s koncentrovaným svazkem tepelné energie
- difuzní způsoby
- další metody

9.1 Metody s koncentrovaným svazkem tepelné energie

Metody svařování, které využívají koncentrovaného svazku tepelné energie do tvaru úzkého sloupce či " paprsku" (Elektronový paprsek, Laser, Plazmový oblouk, Světelný paprsek) se původně nazývaly také jako fyzikální, anebo speciální metody.

9.1.1 Elektronový paprsek

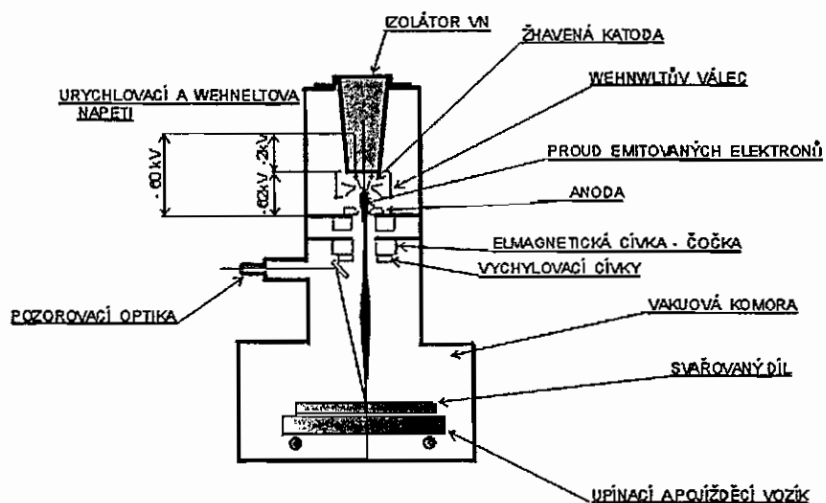
Metoda svařování elektronovým paprskem využívá proudu letících elektronů ve vakuovém prostoru, urychlených statickým elektrickým polem o vysokém napětí. Tento proud letících elektronů je pak soustředěn do úzkého svazku (nepřesně pojmenovávaného paprsku) se zaostřením do ohniska v místě působení na svařovaný předmět. Dopadající elektrony urychlené na vysokou rychlost cca 2/3 rychlosti světla pak přeměňují svoji kinetickou energii na tepelnou. Tato tepelná energie zkoncentrovaná v ohnisku o malém průměru způsobuje velice rychlé natavování základního materiálu a to ve velmi úzké šířce. V krátkém okamžiku dochází ke vzniku protaveného kanálku o malém průměru, jehož stěny jsou tvořeny nataveným materiálem a střed je vyplněn parami daného kovu. Jím prochází zkoncentrovaný proud elektronů svařovanou tloušťkou dílu a relativním pohybem paprsku oproti svarku podél stykové spáry obou dílů se natavený kov přelévá z přední části protaveného kanálku na zadní a tak vzniká svarový spoj. Proud letících elektronů musí mít intenzitu odpovídající svařované tloušťce, užití svařovací rychlosti a typu spojovaného materiálu, což také určuje základní svařovací parametry.

Vzniklý svarový spoj je charakterizován velice malou a prakticky rovnoměrnou šířkou svaru, také i malou šířkou ovlivněné zóny a malými deformacemi. Prostředí vakua, které je nezbytné pro volný pohyb letících urychlených elektronů, působí současně jako nejlepší ochrana nataveného kovu, dokonce působí jako zónová vakuová rafinace svarového kovu.

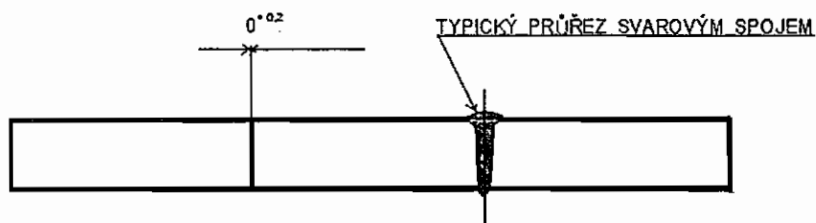
Základní částí každé elektronové svářečky je elektronová tryska (kanon) která musí být rovněž vyvacuována na vysoký stupeň, více než 10^{-4} mbar. Zde jsou z přímo či nepřímo žhavené katody emitovány elektrony volně do prostoru. Přímo žhavená katoda je většinou tvořena wolframovým páskem (u elektronových trysek do výkonu cca 1,5 kW je možné použít i wolframový drátek) a tato katoda je protékána nastavitelným žhavicím proudem ze speciálního zdroje, který pracuje na úrovni potenciálu urychlovacího napětí (většinou 60 anebo 150 kV). U nepřímo žhavené katody vytvarované do čepu s čelním pokrytím emisní vrstvou dochází k jeho

ohřevu dopadem elektronů, vysílaných ze zvlášť upraveného vinutí kolem tohoto čepu a urychlovaných dalším elektrostatickým polem.

Tento použitý systém katody, má vzhledem k anodě urychlovací předpětí výše uvedených 60 anebo 150 kV a ten na vzdálenosti katoda – anoda urychluje emitované elektrony na rychlost až 2/3 rychlosti světla. Tok elektronů a jeho velikost (tím i intenzita výsledného svařovacího proudu) je formován do úzkého sloupce tak zvaným Wehneltovým válcem, který katodu obepíná. Ten má oproti vlastní katodě ještě zápornější potenciál a jeho řízeným snižováním se proud vystupujících elektronů, putujících k anodě zesiluje. Tvar vybraní Wehneltova válce působí svým vytvořeným elektrostatickým polem na dokonalejší soustředění sloupce elektronů tak, aby pronikaly po svém urychlení středovým otvorem v anodě. Zformovaný svazek elektronů postupuje dále do vakuové komory a prochází soustavou zaostřovacích elektromagnetických cívek – čoček. Ty jednak zaostřují dopadající paprsek do ohniska vhodně umístěného vzhledem k povrchu svařovaného dílu a dále zajišťují jeho přesné posunutí oproti stykové spáře. Systém křížově působících vychylovacích cívek pak umožňuje zavedení oscilace dopadajícího paprsku nejen s volitelnou amplitudou a frekvencí, ale i s několika možnostmi zvolení tvaru průběhu oscilace (sinusovka, trojúhelníkový tvar, dvojpulz, kruh, elipsa či parabola). Schéma zařízení a svarové spojení je patrné z obr. 9.1.



USPOŘÁDÁNÍ ELEKTRONOVÉ SVAŘEČKY



Obr. 9.1 Uspořádání elektronové svařičky a schéma svarového spoje

Zařízení na svařování elektronovým paprskem se rozlišují z rozličných hledisek do mnoha typů a konstrukčních provedení. Hlavní charakteristikou je urychlovací napětí. Nižší 30 kV se užívá poměrně zřídka, nejčastější jsou využívány střední typy s napětím 60 kV a dále vysokonapěťové 150 kV. Obecně lze říci, že čím je užito vyšší napětí, tím lze dosáhnout užší a hlubší průvary, avšak zařízení musí být izolačně lépe řešeno a pláště obepínající kanon a komoru musí odstranit vznikající tvrdší rentgenové záření. Další typové rozdělení je možné podle celkového výkonu svařovacího paprsku, velikosti vakuové komory, jejího uspořádání a umístěním pohybových mechanismů, způsobem řízení či programování chodu celého zařízení. V zásadě se zařízení koncipují podle předpokládané výrobní skladby svařovaných dílů co do velikosti, tloušťky provařované stěny, typu materiálu a celkovému charakteru. Elektronové svářečky mohou být univerzálnějšího typu, anebo přizpůsobeny charakteristickému výrobku často v sériové či hromadné výrobě s velikou produktivitou.

Svařuje se bez přídavného materiálu, svarové plochy bez svarových úkosů natupo jsou přitisknuty co nejtěsněji na sebe a procházející elektronový paprsek vytváří svarový spoj. U dopadajícího paprsku lze velice snadno řídit jeho intenzitu, tvar v místě dopadu i polohu jeho působení. Prostředí vakua zabezpečuje tu nejdokonalejší ochranu nataveného kovu. Svařuje se poměrně vysokými rychlostmi, svary vycházejí poměrně velice úzké a jen s malými zónami tepelného ovlivnění ZM. Rovněž se dosahuje jen minimálních deformací obvykle tak desetinových oproti klasickým obloukovým metodám svařování. Lze svařovat i některé konfigurace výrobků s přísnými požadavky na přesnost, které by nebyly jinak dosažitelné (šestihřanné trubky) anebo výrobky z dílů předem vyrobených nahotově, včetně tepelného zpracování. Výhoda svařování EP vynikne i u tlustostěnných svarových spojů svařených jednopřechodově (výkon EP 15 kW umožní provaření nerezavějících ocelí do tloušťky stěny 35 mm). Ušetří se nejen výroba svarových úkosů, ale i přídavný materiál, který je zejména u austenitických ocelí velice drahý a cenu ještě zvyšuje nutná atestace materiálu spojená s užitou tavbou, případně s kvalifikací pracovníků. Výhodou je, že při přesném dodržení nalezených optimálních parametrů dostaneme reprodukovatelně kvalitní svary.

Metoda EP umožňuje svařovat prakticky všechny kovy, včetně silně reaktivních Ti, Zr, dále kovy s vysokou teplotou tavení W, Ta, Nb, Mo, anebo kovy s vysokou tepelnou vodivostí Cu, Al. Jako nevhodné se jeví pouze Zn, Mg a Cd a jejich slitiny, které mají teplotu vypařování poměrně blízko nad teplotou tavení.

Nevýhodou této metody je omezení rozměrů svařovaných dílů tak, aby se vešly do vakuové svařovací komory a mohlo být s nimi v době svařování volně manipulováno. Zařízení vychází jako velice drahá a rozměrná. Při svařování vzniká rentgenové záření, které je pohlceno stěnou vakuové komory, včetně olovnatých skel v průzorech. U velkých vakuových komor je nutné dodržovat pravidla o přítomnosti osob uvnitř.

9.1.2 Laser

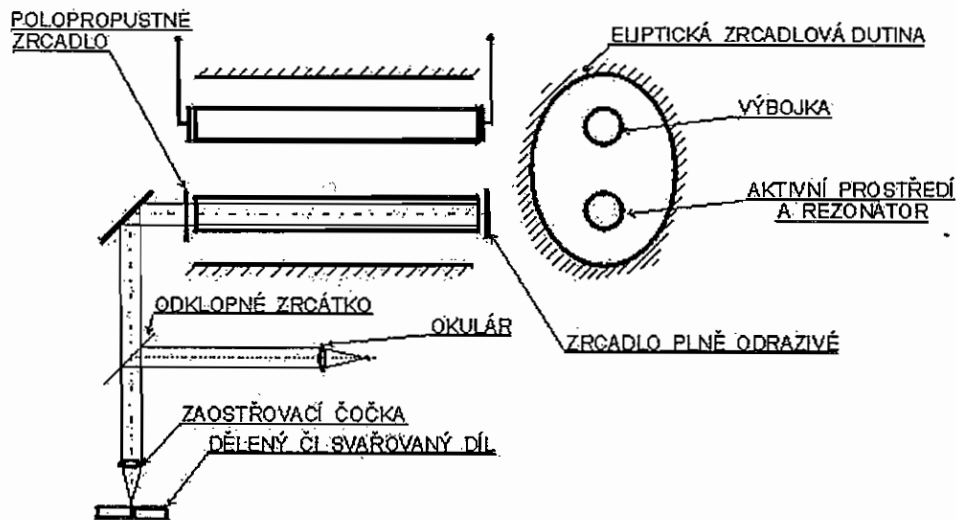
Pro svařování, ale mnohem častěji však pro řezání a další rozmanité aplikace se využívá laserového paprsku, tedy energie monochromatického koherentního světelného paprsku soustředěného opět do úzkého svazku a opticky zaostřeného do ohniska miniaturních rozměrů. Tak je opět dosaženo vysoké koncentrace energie, a tím i vysokých teplot.

Fyzikálně je definován laser jako kvantový zesilovač světla, který využívá stimulovanou emisi záření, zesilovanou v rezonátoru a dále zaostřovanou optikou do místa užití. Funkci laseru je možné přiblížit popisem procesu v atomech aktivního prostředí rezonátoru. U jednotlivých iontů po pohlcení určitého kvanta energie přejdou elektrony na vyšší energetickou hladinu. Z této hladiny excitovaného stavu přejdou po velice krátkém časovém úseku a vyzáření odpovídajícího kvanta záření na nižší, metastabilní energetickou hladinu. Na této orbitě zůstávají elektrony relativně déle nežli v původním excitovaném stavu. Při závěrečném návratu na původní energetickou hladinu, které je iniciováno lavinovitým průchodem fotonů v podélné ose rezonátoru, se rovněž vyzáří foton shodné vlnové délky. Takto lavinovitě emitované fotony mají tak shodnou energii, směr, fázi a polarizaci. Zesilujícího účinku se dosahuje působením optického rezonátoru, kdy na protilehlých koncích působí dvě přesně paralelní zrcadlové plochy, z nichž jedna je polopropustná.

Většina laserů pracuje v pulzním a kontinuálním provozu. Obvykle se používá pevné aktivní prostředí (YAG), zejména u laserů s menšími výkony paprsku. Excitovaný stav je v rezonátoru dosažen ozářením výbojkou, která bývá umístěna paralelně s jeho osou a společně jsou zabudovány v dutině eliptického průřezu, jejíž povrch má zrcadlový lesk. Rezonátor a výbojková trubice jsou umístěny do obou ohnisek eliptické dutiny, takže veškeré vyzáření fotony z trubice přesně dopadají do druhého ohniska, tedy rezonátoru. Vlastní eliptická dutina je protékána chladicí destilovanou vodou. Intenzivní chlazení je nezbytné, neboť vlastní generování laserového paprsku je provázeno se značnými tepelnými ztrátami a celková energetická účinnost je velice malá. (Ztráty dosahují až 98 %).

Podle aktivního prostředí rezonátoru dělíme lasery na pevnolátkové, kapalně a plynné. Pe Rezonátory jsou určeny spíše pro aplikace vyžadující nižší energie paprsku, tj. do 1 kJ. Výkonnější zařízení, určené pro řezání případně i svařování a pracující v kontinuálním režimu již musí být s plynovým aktivním prostředím, ponejvíce na bázi CO₂. Koncentrace aktivních látek je u rezonátorů s plynovým médiem menší, dosahuje se vyšších výkonů např. prodloužením délky aktivního prostředí. Zdrojem excitační energie je stejnosměrný anebo vysokofrekvenční výboj, který hoří v trubici naplněné aktivním plynem. Chlazení ztrátového tepla je zabezpečeno chlazeným pláštěm a intenzivní cirkulací media.

Svazek koherentních fotonů je pak vhodně umístěnými zrcadly či optickými světlovodnými kabely veden k místu užití a je příslušnou optikou zaostřen do pracovního ohniska – viz obr 9.2.



Obr. 9.2 Základní schéma pevnolátkového Laseru

Oblasti využití takto vytvořeného výkonného a koncentrovaného zdroje energie, přeměněné v místě dopadu na energii tepelnou jsou především pro řezání čili tepelnému dělení materiálů. Rychle vznikající kanálek nataveného základního materiálu je velice úzký a pokud je současně vhodně nastaven proudící plynové médium tak, aby natavený materiál ze spáry vyfukoval, dochází při relativním pohybu laserové výstupní hlavičky vůči desce ZM ke vzniku řezu o malé šířce. Použitý plyn na vyfukování zplodin může být O_2 a pak je rychlost řezání ještě zvýšena, ovšem poněkud na úkor kvality řezané plochy. Pro dosažení kvalitnějšího povrchu řezu se užívá N_2 při nezbytném snížení použité nižší rychlosti řezání. Dosažitelné drsnosti povrchu řezu jsou pak do 0,01 mm. Na stejném zařízení lze provádět po určitých korekcích i svařování, kdy plynové médium má podstatně nižší výstupní rychlosti a to tak, aby lázeň nataveného kovu nevyfukoval, ale pouze povrchově chránil. Používá se zde inertní plyn či jejich vhodná směs.

Výhody laserového paprsku jsou hlavně v tom, že je možno pracovat s ním jako se světlem v prostředí normální vzdušné atmosféry. Je možno laserový paprsek poměrně jednoduchými prostředky zavést i do vzdálených či normálně těžko přístupných míst.

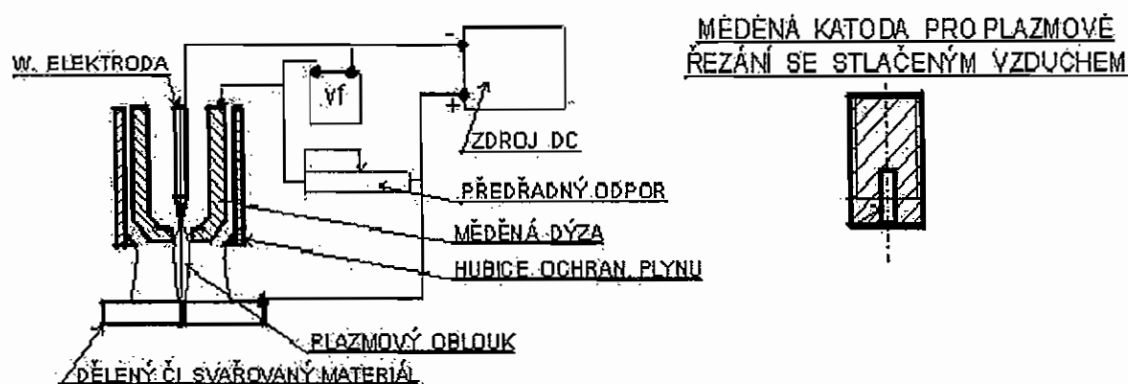
Nevýhodou je práce s materiály, vyznačujícími se lesklými povrchy, které by mohly laser odrážet. Tím jsou ohroženi přítomní pracovníci, zejména při proniknutí do oka by vznikl těžký úraz nenapravitelného charakteru. Proto musí mít laserová řezací a zejména svařovací pracoviště vnitřní stěny pokryty matovými nátěry bez jakýchkoliv lesklých předmětů a ploch. Při svařovacích aplikacích musí být pracovní místo nejlépe překryto speciálně přizpůsobeným krytem, vyloučením návštěvníků sledující proces svařování a vybavení obsluhujících operátorů speciálními ochrannými brýlemi, které pohlcují právě vlnovou délku laserových fotonů provozovaného zařízení. Výkonná laserová zařízení jsou poměrně rozměrné komplety a bývají velice drahá i energeticky náročná. Běžně dosahované řezané tloušťky se pohybují do 20 mm a u aplikace svařování to bude i méně.

9.1.3 Plazmový oblouk

Termín plazma je dnes užíván ve více oborech s naprosto jiným významem. Zde označuje určitou formu disociovaného a vysoce ionizovaného plynu, která umožňuje hoření elektrického oblouku. Koncentrovaný sloupec tohoto plazmového média vzniká stabilizací elektrického oblouku průchodem chlazenou tryskou. Na vnitřním povrchu stěn trysky pak dochází k rekombinaci ionizovaných částic. Tím se jádro sloupce silně přehřívá a vznikající úzký sloupec plazmového oblouku se projevuje svými specifickými vlastnostmi, jako vysoce zkoncentrovanou energií

a axiální dynamickou složkou. Ta působí obdobně protavováním základního materiálu a pokud je výstupní rychlost použitého plynu taková, aby vyfukovala natavený kov ze spáry, dochází k řezání. Pokud jsou parametry voleny tak, aby vystupující plyn pouze chránil natavený kov, je možné dosáhnout vytváření svarového spoje (někdy nazývaný protavování typu klíčové dírky).

Konstrukce plazmového hořáku je založena na wolframové elektrodě, ze které hoří zpočátku plazmový oblouk zapálený vysokofrekvenčně na měděnou dýzu a tento pomocný (pilotní) oblouk je napájený buď ze zvláštního zdroje, anebo přes předřadný odpor. Po přeskočení tohoto pilotního oblouku na základní materiál se zapaluje hlavní elektrický oblouk a ten dle nastaveného režimu svařuje, anebo reže. Pracovním a zároveň ochranným plynem je argon, případně s příměsí vodíku pro zvýšení teploty plazmového oblouku a tedy hlavně užívaný při plazmovém řezání větších tloušťek (až 150 mm). Princip plazmového hořáku je patrný na obr. 9.3.



Obr. 9.3 Princip plazmového hořáku

Hořáky, využívající speciálního typu katody měděné se zalisovaným čepem zirkonia anebo hafnia jsou určeny pro používání jako pracovního plynu pouze tlakového vzduchu. Tato zařízení jsou velice jednoduchá, a tím i s relativně nízkou pořizovací hodnotou, jejich provoz je díky stlačenému vzduchu levnější a jsou snadno transportovatelné. Řezané tloušťky jsou však menší (cca do 40 mm) a při provozu jsou zdrojem škodlivých exhalací a aerosolů.

Řezací plazmová pracoviště musí mít správně dimenzovaná odsávací zařízení. U vysoce výkonných souprav se dělení plazmovým obloukem často provozuje nad vodní lázní, anebo zvlášť upravené soupravy provádí dělení materiálů přímo ponořených pod vodní hladinu.

Při aplikaci plazmového oblouku na svařování se spoj připravuje na svařování rovněž natupo a při svařování kromě pracovního inertního plynu se přivádí i plyn pro ochranu natavené lázně. U některých komplexněji vybavených zařízení s určitou mírou automatizování je zařazen za postupující svařovací hořák ještě normálně unášený hořák WIG s automaticky přiváděným přídatným drátem, aby se dosáhlo převýšení svarové housenky. Zvláštní kapitolu tvoří zařízení v provedení tak zvané mikroplazmy, určené pro svařování tenkých plechů a folií.

9.1.4 Světelný paprsek

Pro některé jemnější detaily je uváděna možnost využití soustředěného bílého světla do ohniska a využívání takto získaného koncentrovaného zdroje tepelné energie. Světlo může být využíváno buď přímo ze slunce, anebo z elektrického oblouku, příp. výbojek. Výhodou jsou poměrně nízké pořizovací náklady. Využití je ale omezeno hlavně na miniaturní součásti v elektronice a měřicí technice.

9.2 Difuzní způsoby svařování

Difuzní způsoby svařování jsou založeny na principu difuze probíhající na styčných plochách spojovaných materiálů. Rychlost samotného difuzního procesu je dána jednak čistotou stykových ploch, přítlačnou silou, časem působení a hlavně teplotou a atmosférou. Teplota určuje rychlost vlastní difuze, dokonce se čtvrtou mocninou. Podle uspořádání jednotlivých aplikací a působení uvedených faktorů urychlujících difuzi je možné mluvit o jednotlivých způsobech difuzního svařování.

9.2.1 Difuzní svařování ve vakuu

Tento způsob svařování je uskutečňován během pronikání atomů z mřížek povrchových krystalů jednoho kovu do mřížek kovu druhého v místě styku. Je proto nutné co nejpřesněji opracování stykových ploch, jejich důkladné očištění od veškerých nečistot a mastnot a přítlačení obou komponent dostatečnou silou (cca 1 MPa). Difuzní proces se urychlí zahřáním na teplotu zhruba 3/4 teploty tavení. Při svařování heterogenních spojů se doporučená teplota vztahuje na materiál, který má nižší teplotou tavení, tedy 3/4 jeho tavicí teploty. Proces probíhá nejlépe v prostředí vakua, i když by bylo možné používat jiný způsob ochrany spojovaných dílů. Posledním parametrem určujícím kvalitu spoje je čas, čili doba výdrže a vůbec celého režimu tepelného procesu. Ta záleží na druhu spojovaného materiálu, případně i jejich kombinací. Tato metoda se uplatňuje zejména tam, kde tavné svařování nepřichází v úvahu, protože vznikají tvrdé a velice křehké intermetalické fáze.

9.3 Svařování tlakem za studena

Tlakové svařování za studena je založeno na principu vytvoření takového uspořádání spojovaných dílů, aby použitím vhodných lisovacích nástrojů bylo možné vyvodit takový tlak, kdy by docházelo na stykové ploše k plastickým deformacím. Tyto deformace vedou k rozrušení povrchových oxidačních vrstviček a k co nejtěsnějšímu přiblížení, až vzájemnému pronikání jednotlivých mřížek krystalů. Tlakovým způsobem se dají svařovat rovněž materiály tavně nesvařitelné. Typickým příkladem je spojování pásnic z mědi s pásnicemi z hliníku. Očištěné

stykové plochy se spojí a zvnějšku prolisovávacím nástrojem se protlačí najednou či postupně odpovídající počet vlisů. Často je aplikována tato metoda při spojování měděných trolejových drátů. Zde spojované konce jsou upnuty do sklíčidel speciálních hydraulických kleští, které stlačí oba konce až dojde k vytlačení výronku, který se dodatečně opracuje s plynulým přechodem.

9.3.1 Svařování výbuchem

Ke spojování kovů při výbuchovém způsobu svařování dochází působením dynamické složky pohybu přivařované části, vyvolané výbuchem vhodné výbušniny, rozmístěné po celé ploše v odpovídající vrstvě. Iniciace výbuchu je provedena rozbuškou umístěnou na okraji a postupující detonační vlna postupně v krátkém okamžiku přirazí enormní silou plátovanou desku na podklad. V těchto krátkých časových úsecích se chová materiál plasticky a na stykové ploše vzniká nejen difuzní spoj ale i určité propojení obou povrchů ve formě drobných vlnek, zřetelně patrných na provedených příčných mikrostrukturách.

Výbuchové plátování se používá zejména při výrobě bimetalických plechů či plátovaných desek. Také bimetalická pouzdra dvou jinak tavně nesvařitelných kovů jsou realizovatelná. Jako příklad lze uvést kombinace titan + nerezavějící ocel, případně zirkoniová slitina + nerez.

9.3.2 Svařování ultrazvukem

Způsob svařování využívá působení ultrazvuku jakožto zdroje energie vytvářené právě v místě styku dvou přivařovaných komponent. Ultrazvuk vzniká ve speciálním měnič, napájeném vysokofrekvenčním generátorem a je na místo působení přiváděn nástrojem, zvaným sonotroda. Ta zároveň zabezpečuje potřebný přitlak přivařované součásti. Všeobecně lze říci, že uplatnění je možné nalézt zejména u přivařování jemných detailů, drátků přívodů v elektronice, jemné mechanice a podobně. Je možné dosáhnout spoje kovů nejen rozličných typů, ale i spojů kov + keramika či plast.

9.3.3 Svařování třením

Dalším nekonvenčním a přitom produktivním způsobem spojování materiálů je využívání tření, zejména u rotačních dílů. V principu se jedná o upnutí jedné součásti rotačního charakteru do otáčející se hlavice (soustruh) a druhá součást je upevněna stacionárně, ovšem přes momentovou spojku. Rotací jedné z komponent a za odpovídajícího přitlaku dojde k ohřátí obou konců a po dosažení těstovitého stavu u materiálů dojde k rychlému spojení svařením. Vzniklý spoj má kolem sebe příslušný výronek, ve kterém jsou vytlačeny všechny povrchové nečistoty. Způsob lze i aplikovat při přivaření rotační části na příklad k upnuté desce. Momentová spojka pak musí být součástí upínacího pouzdra rotačního dílu.

9.4 Další metody

9.4.1 Aluminotermické svařování

Způsob využívá vysoké afinity hliníku ke kyslíku, který redukuje oxidy železa v připravené aluminotermické směsi. Po zapálení speciální zápalkou na teplotu asi 1000 °C vzniká

exotermická reakce, a ta vytváří tekutý a vysoce ohřátý kov. Při vhodném uspořádání formovacích kokilek přes spojované místo se svarová spára tímto nataveným kovem vyplní a patřičně nataví i oba konce spojovaných dílů. Nejpoužívanější aplikací je svařování železničních kolejí. Po odstranění kokilky se opracuje vzniklý výronek zejména na povrchu a bocích koleje.

9.4.2 Elektrostruskové svařování

Svařování využívá vznikajícího tepla při průchodu elektrického proudu vrstvou natavené strusky. Způsob je určený pro svařování desek o větších tloušťkách umístěných vertikálně a s pevně nastavenou mezerou mezi spojovanými plochami. Ty jsou příčně z obou stran zakryty měděnými, vodou chlazenými příložkami a v takto vymezeném prostoru probíhá výše zmíněný elektrostruskový proces. Zpočátku je na startovacím hranolu, tvořící dno a počátek jediné svařovací jednoprůchodové housenky, zahájen obloukový proces svařování pod vrstvou tavidla. Ten zabezpečuje automatově podávaný drát ze speciálně tvarované hubice, napájený ze střídavého svařovacího zdroje. Po chvíli se působením tepla oblouku vytvoří dostatečná vrstva natavené strusky a průchodem podávaného drátu vzniká odporové teplo, které udržuje lázeň ve stavu tekutém. Současně natavuje i stěny a konec přídatného drátu.

Podle tloušťky svařovaných desek se používá podélné kývání hubice s podávaným drátem. Při ještě větších tloušťkách se užívají kývané dvě až tři paralelní hubice. Při tloušťkách nad 500 mm se zařazuje dvojice synchronizovaných automatů kývajících v mezeře proti sobě. Podle stupně zaplňování úkosu se zapojuje postupný pojezd automatu vzhůru (u dvojice automatů shodně). Na jeden záběr tak vznikne kompletní svar, kdy dokonce byla takto svařena najednou i tloušťka bramy větší než 1000 mm. Je rovněž vypracována a provozně prověřena poměrně složitá technologie i na svařování obvodových svarů velkorozměrných prstenců.

Tento způsob svařování se v šedesátých letech jevil jako velice nadějný, avšak technická praxe prokázala jeho podstatné slabiny. Při jakémkoliv přerušení dodávky proudu či zadrhnutí, byť jen jediného z podávaných drátů, či uvolnění okrajové příložky s následným vytečením natavené strusky vzniká defekt, který je prakticky neopravitelný. Komplikované jsou i metalurgické poměry ve vlastním svarovém spoji a tepelně ovlivněné oblasti. Složitá je i příprava vlastního svaru, a proto se dnes tento způsob svařování využívá jen velice sporadicky.

Literatura

- ENGST, P., HORÁK, M.: Aplikace laserů, SNTL Praha, 1989.
MINAŘÍK, V.: Tepelné dělení materiálu. ČVUT Praha, 1993.
KUNCIPÁL, J. a kol.: Teorie svařování. SNTL Praha, 1986.
KUNCIPÁL, J., PILOUS, V., DUNOVSKÝ, J.: Nové technologie svařování. SNTL Praha, 1984.

10. ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ

Ze statistických údajů vyplývá, že technologie svařování elektrickým odporem představují přibližně 15 – 20 % z objemu svářečských prací v průmyslové výrobě. Využívá se zde známého jevu, že při průchodu el. proudu vodičem vzniká teplo. Při odporovém svařování spoj vzniká při průchodu proudu přes stlačené svařované části. Vlivem el. odporu v místě styku se materiál roztaví a vytvoří se metalurgický spoj. Teplo tedy vzniká přímo ve svařovaných materiálech a není přiváděno zvenčí, jako u jiných technologií (např. el. oblouk, plamen). Důležitým parametrem vedle el. proudu je tlak. Bez spolupůsobení tlaku spoj nevznikne. Zdrojem proudu je většinou jednofázový transformátor o sekundárním napětí několika voltů a proudech až 150 kA. Do spoje se proud přivádí elektrodami zpravidla ze speciálních slitin Cu. Znamé jsou např. slitiny pod ochr. známkou „Malory“.

Podle konstrukčního uspořádání elektrod a podle tvaru spoj. dílů se rozlišují tyto způsoby odporového svařování:

1. svařování bodové,
2. svařování švové – vysokofrekvenční odporové,
3. svařování stykové (na tupo) - pýchovací,
- odtavením,
4. svařování na lisu výstupkové (bradavkové), a to:
a) s více výstupky,
b) s jedním soustředným.

10.1 Jouleův zákon

Jak již bylo řečeno v úvodu, při průchodu el. proudu vodičem vzniká teplo. Množství tohoto tepla Q je tím větší, čím je větší:

- a) protékající proud I [A],
- b) el. odpor vodiče R [Ω],
- c) doba průtoku proudu t [sec].

Tato závislost je vyjádřena ve známém Jouleově zákonu rovnicí:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad [J]$$

Z rovnice je zřejmé, že zásadní podíl na vývinu tepla má velikost svařovacího proudu. Při praktickém využití uvedených závislostí pro svařování pak regulačními prvky svářečky můžeme ovlivnit velikost proudu I_{sv} , dobu průchodu proudu t_{sv} a hodnotu přitlačné síly F_{sv} , jež částečně ovlivní velikost odporu R , který je jinak daný.

10.2 Přejchodové a materiálové odpory

V místě svaru můžeme vysledovat několik dílčích el. odporů, jejichž součet tvoří výsledný R_{sv} , který se podílí na vzniku tepla (obr. 10.1). Proud, který prochází materiálem ve sloupci o průměru rovnajícím se přibližně $\varnothing d$ pracovní plochy elektrody, musí především překonat odpory dotyku R_d , které se ve speciálních případech mohou lišit. Dále překonává odpory materiálu R_m , které se rovněž mohou lišit, a to buď vlivem tloušťky t , anebo vnitřním odporem při svařování nestejných materiálů. Výsledný odpor tedy je:

$$R_{sv} = R_{m1} + R_{m2} + R_{d1} + R_{d2} + R_k$$

Z uvedených dílčích odporů má nejvyšší hodnotu odpor R_k a v jeho místě tedy dochází k nejvyššímu vývinu tepla a ke vzniku svarového spoje. Odpor dotyku elektrod je přímo ovlivněn čistotou povrchu svařovaných materiálů a průměrem pracovní plochy elektrod. Na základě empirických poznatků se tento průměr volí podle vzorce:

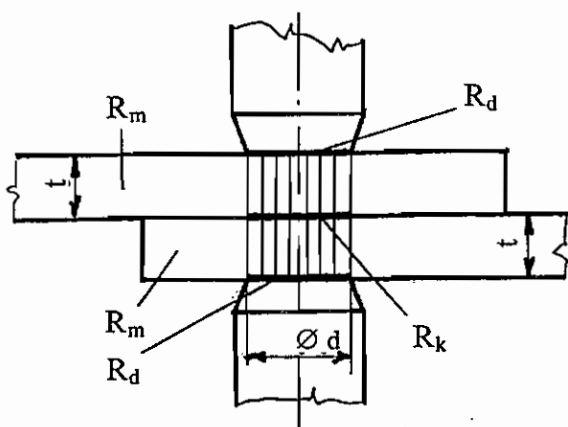
$$\varnothing d \approx 5 \cdot \sqrt{t}$$

kde t = tloušťka plechu.

Ve zvláštních případech, kdy svařujeme plechy rozdílných tlouštěk je zřejmé, že odpory materiálu R_m jsou rozdílné. Tomuto rozdílu je nutné přizpůsobit i průměry pracovních ploch elektrod a zabránit tak tepelné nerovnováze ve spoji. Průměry je pak nutné spočítat pro každou tloušťku zvlášť (obr. 10.2).

Průměry D a d volíme podle vzorce: $\varnothing D = 5 \cdot \sqrt{t_1}$ a $\varnothing d = 5 \cdot \sqrt{t_2}$. Parametry svařování nastavíme tak, že se řídíme tzv. náhradní tloušťkou t_n , kterou určíme ze vzorce $t_n = (2 \div 2,5) t_t$, kde t_t je tloušťka tenčího plechu. Pro svařování stykové je rozložení dílčích odporů patrné z obr.10.3.

Opět zde vidíme odpory R_{m1} , R_{m2} , R_{d1} , R_{d2} a R_k . Jelikož zde je oproti svařování bodovému mnohonásobně větší plocha dotyku čelistí (R_d) než plocha svaru (R_k), je možné odpor R_d zanedbat. Případný rozdíl materiálůvých odporů R_{m1} a R_{m2} se v tomto případě kompenzuje nestejným vyložení svařovaných dílů z čelistí. Toto rozdílné vyložení je nutné na vzorcích nejprve vyzkoušet tak, aby maximální množství tepla vznikalo v místě R_k . Obecně platí, že materiál s vyšším měrným odporem má vyložení kratší.

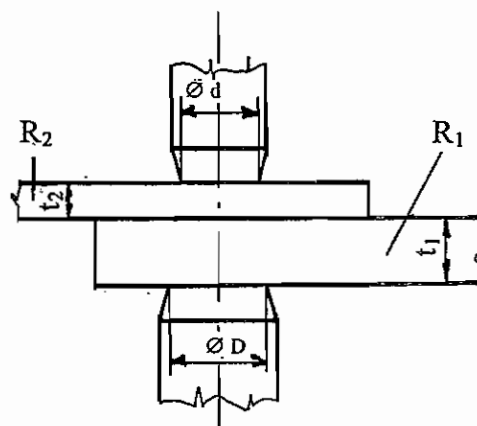


Obr. 10.1 Průběh změny odporu při svařování stejných tlouštěk

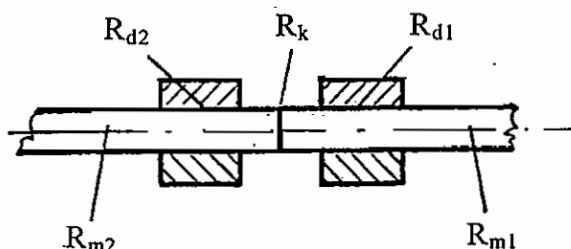
$$t_1 > t_2$$

$$R_1 > R_2$$

$$D_1 > D_2$$



Obr. 10.2 Průběh změny odporu při svařování rozdílných tlouštěk

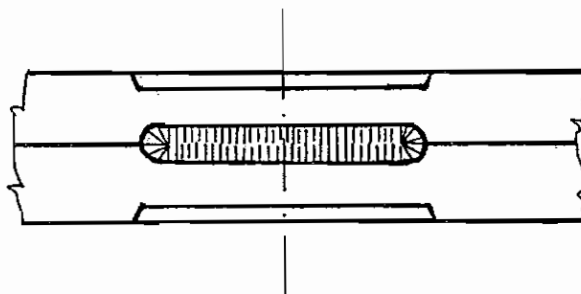


Obr. 10.3 Průběh změny odporu při svařování tyčového materiálu

10.3 Vznik svarového bodu (spoje)

Po sevření a stlačení svařovaných plechů mezi elektrodami se sepne obvod svařovacího proudu. Procházející proud ohřívá místo spoje, a to přibližně ve sloupci o průměru $\varnothing d$ elektrody. Nejvyšší teplota vzniká v místě dotyku plechů. Značné množství tepla ovšem při tom uniká vedením do materiálu a sáláním do okolního prostředí. Jakmile se dosáhne teploty tavení, dojde k vytvoření tekutého jádra a proběhne svaření. Poté se svařovací proud přeruší, ne však přítlak a svar i jeho plastické okolí rychle tuhne. Dochází tak k lisování za tepla, čímž se zlepší mechanické vlastnosti kovu ztuhlého jádra. Takto vytvořený svar se také vzhledem ke svému průřezu nazývá svarová čočka. Zpoždění přítlaku za proudem je nutné a např. u plechů tl. 1 + 1 mm je cca 0,1 sec. Vytvořená svarová čočka má charakter litého kovu, s výrazně dendritickou strukturou. Jedná se o krystalové útvary mající vzhled stromečku, uspořádané svými osami kolmo k chladnému okolí, stejně jako je tomu u ingotu, litého do kokily (obr.10.4).

Přítlak je velice důležitý pro zabránění vzniku dutin ve svaru. Tavenina při tuhnutí zmenšuje svůj objem a vzniká tak nebezpečí vytvoření lunkru.



Obr. 10.4 Struktura svaru

10.4 Vliv čistoty povrchu a elektrod

Aby nedocházelo k poškození povrchu plechů např. popálením, je nutné zajistit, aby přechodový odpor R_d byl co nejmenší. Proto povrch elektrod i povrchy svařovaných materiálů musí být **kovově čisté**. Je nutné dodržovat základní požadavek, že povrch svařovaných materiálů musí být beze rzi, okují, oleje, barev a jiných nečistot. Tento požadavek se zajišťuje buď mechanicky (např. broušením), nebo chemicky mořením. Kovová čistota povrchů má zásadní vliv na reprodukovatelnost svarů konstantní kvality, což je důležité zejména ve velkosériové nebo hromadné výrobě. Jakékoliv znečištění je spojeno se změnou přechodových odporů a tudíž i s celkovou změnou nastavených parametrů svařování.

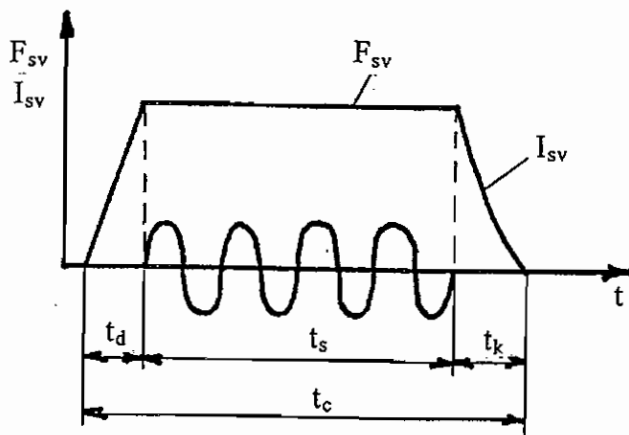
Stejně důležité je průběžně kontrolovat a udržovat optimální geometrický tvar elektrod, správný průměr pracovní plochy, případně šířku u kotoučů švové svářečky. Pracovní povrchy elektrod musejí být čisté, bez zakovaného otřepu, vrubů a vrypů. Při jakémkoliv poškození je nutné práci přerušit a povrch upravit buď pilníkem, nebo speciální frézou či strojním obráběním.

10.5 Časový průběh svařování

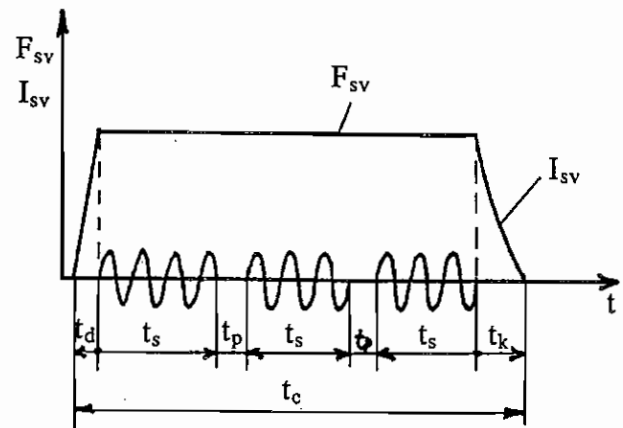
Na obr.10.5 je uveden graf časového průběhu svaření jednoho bodu. Na osu y je vynesena velikost svařovacího proudu I_{sv} a přítlačné síly při svařování F_{sv} . Na ose x je

čas t . Z obrázku vidíme, že síla F_{sv} naběhne na nastavenou hodnotu za časový úsek t_d , což je tzv. dosedací čas potřebný pro dosažení plného tlaku. Po dobu svařovacího času t_s se udržuje nastavená hodnota síly. Teprve po ukončení intervalu t_s (vypnutí proudu) síla F_{sv} klesá zpět k nulové hodnotě v intervalu t_k , což je čas kovací, kdy dochází k prokování chladnouceho svarového kovu. Je nezbytné, aby k uvolnění síly F_{sv} nedošlo před ukončením intervalu t_s , jinak hrozí vznik dutin ve svaru.

Elektronické systémy regulace nyní umožňují pulzní svařování, jehož průběh je zobrazen v grafu na obr.10.6. Časové závislosti průběhu síly F_{sv} a času t zůstávají stejné, avšak rozdíl je v tom, že proud neprotéká v čase t_s v souvislé řadě např. 9 period, ale je rozdělen na 3 pulzy po 3 periodách. Toto řešení je vhodné zejména při svařování rozdílných materiálů, anebo při svařování více vrstev, protože pak nedochází k přehřátí povrchových plechů.



Obr. 10.5 Vyobrazení časového průběhu při svařování střídavým proudem



Obr. 10.6 Vyobrazení časového průběhu při svařování pulzním proudem

10.6 Režimy svařování

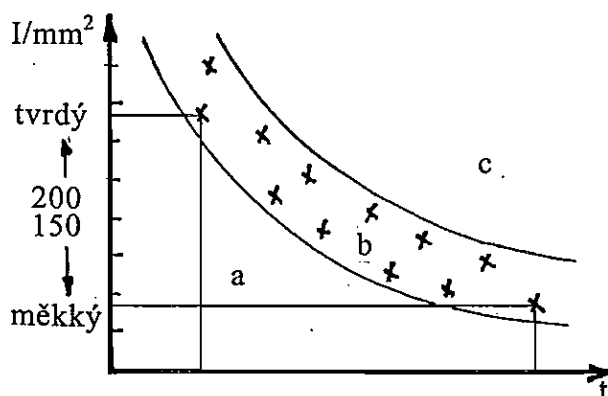
Při nastavování základních parametrů svařování se nabízí nepřehledné množství kombinací velikosti proudu, přítláčné síly a časů. Pokud si však výsledky získané při praktických zkouškách svarů zaneseme do grafu (obr. 10.7), vysledujeme tři oblasti, z nichž pouze kombinace v oblasti **b** vedou k vytvoření bezvadných svarů. V oblasti **a** svary nevzniknou, v nejlepším případě se jedná o difuzní spojení a hovoříme o nedostatku energie. V oblasti **c** dochází k výstřikům svarového kovu, popálení povrchu, případně proděravění plechů. Zde je naopak energie přebytek.

Z grafu je zřejmé, že potřebnou energii lze dodat do svaru dvěma způsoby. Buď při krátkých časech dostatečně zvýšit protékající proud, nebo při nízkých proudech přiměřeně prodloužit čas. Na základě hustoty protékajícího proudu se vžil rozdělení na tvrdý a měkký režim svařování.

Tvrký režim je charakterizován velkými proudy, krátkými časy a velkou přítláčnou silou - 200÷500 A/mm², asi 8 period (0,16 sec.), cca 2000N.

Měkký režim je charakterizován malými proudy, dlouhými časy a nízkou přítláčnou silou - do 200 A/mm², asi 25 period (0,5 sec.), do 1000N.

Tvrký režim se vyznačuje vyšší účinností, takže provoz je levnější. Je vyšší i celková produktivita. Přestože se používá vyšších tlaků, elektrody tolik netrpí. Vzhledem ke snížení přechodového odporu dotyku R_d se elektrody méně zahřívají. Nevýhodou jsou vyšší investiční náklady. Stroj musí být vybaven pneumatickým nebo hydraulickým systémem pro navození tlaku a elektronickou regulací. Pro **měkký režim** jsou příznačné větší ztráty energie vedením a sáláním tepla do okolí. Elektrody jsou nepříznivě tepelně namáhány, takže se rychleji znehodnocují. Deformace svarového spoje jsou větší a otisky elektrod hlubší. Výhodou měkkého režimu je, že se snižuje nebezpečí zakalení materiálu, což je u ocelí s vyšším obsahem C výhodné.



Obr. 10.7 Průběhy režimů svařování

10.7 Parametry svařování

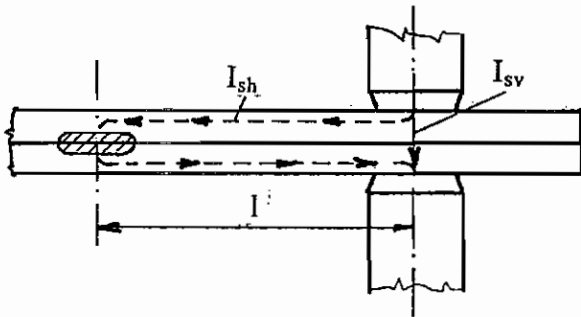
Parametry svařování pro konkrétní druhy materiálů a tloušťky jsou zpravidla tabulkově uspořádány a jsou součástí technické dokumentace ke svářečce. Je možné je vyhledat i v různé technické literatuře vztahující se ke svařování el. odporem.

Vždy je třeba mít na paměti, že údaje mají v podstatě informační charakter a pro praktické použití je třeba provést několik zkušebních svarů na vzorcích, tyto vyhodnotit a dle potřeby parametry upravit. Nastavení parametrů ovlivňuje i vzájemná rozteč svarů. Jsou-li svarové body příliš blízko sebe, dochází k tzv. shuntování (z angl. shunt - odbočka, výhybka) a část proudu se ztrácí el. obvodem přes již provedený sousední bod (obr. 10.8). Body je proto nutné umísťovat v dostatečném rozestupu l . Stejně tak je nutné dbát, aby body nebyly příliš u kraje plechu, protože jinak dochází k vystříknutí tekutého jádra svar. kovu a ke zborcení okraje (obr. 10.9).

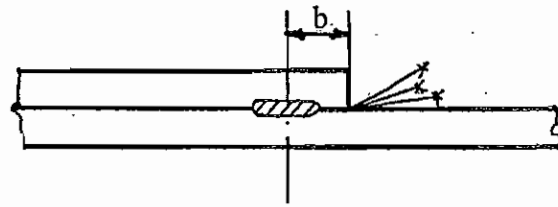
Doporučené minimální hodnoty rozteče bodů a vzdálenosti od okraje plechu jsou uvedeny v tab. 10.1

Tabulka 10.1

Tloušťka svařovaného plechu t [mm]	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Minimální rozteč l [mm]	11	17	24	30	36	43	48	60
Minimální vzdálenost b [mm]	5	6	7	8	9	1	12	14



Obr. 10.8 Vzájemné ovlivnění průběhu proudu předchozím svarem



Obr. 10.9 Vzájemné ovlivnění průběhu proudu okrajem svař. plechu

10.8 Zdroje svařovacího proudu

Nejčastěji používaným zdrojem proudu u odporových svářeček je **jednofázový transformátor**. Většinou je zapojen mezi dvě fáze sítě, tedy na 380V. Jelikož 1 fáze sítě tak zůstává nezátížená, dochází k nepříjemnému nesymetrickému zatížení sítě, zvláště jde-li o svářečku s velkým příkonem. Tento problém řeší svářečky s **třífázovým napájením**, a to buď s usměrněním proudu nebo bez usměrnění. Svářečky s usměrněním jsou však až trojnásobně dražší než bez usměrnění. Přesto takové uspořádání přináší zejména u strojů extrémních výkonů řadu výhod. Vedle rovnoměrného zatížení sítě se sníží potřebný příkon alepší se účinnost. Induktivní odpor, o němž se hovoří dále, je zanedbatelný. Zejména při svařování Al a jeho slitin je nižší spotřeba energie, než u klasického jednofázového transformátoru bez usměrnění. Zmenší se i tepelně ovlivněná oblast v okolí svaru.

Třífázové zdroje bez usměrnění neřeší rovnoměrné zatížení sítě beze zbytku, ale i tak přinášejí technologické i energetické výhody. Postupným řízením lze docílit různých tvarů křivky průběhu proudu a zajímavé je, že přitom současně dochází ke snižování frekvence svařovacího proudu. Toto významně ovlivní snížení indukčního odporu sekundárního vinutí.

Řízení svařovacího proudu se děje dvěma způsoby:

- přepínáním odboček na primární straně trafá - se stoupajícím počtem závitů na primáru se snižuje napětí a protékající proud na sekundární straně vinutí trafá,
- fázovou regulací - jde o fázové řízení průběhu proudu, které je regulováno elektronickým programátorem časů a proudů.

Sekundární vinutí odporových svářeček tvoří zpravidla jeden závit. U svářeček vyšších výkonů je vodič dutý a intenzivně chlazený protékající vodou. Vodou jsou chlazena i ramena (bodovky, švovky) a rovněž i elektrody a upínací čelisti.

10.9 Pohybové a přítlačné mechanismy

Pohyb elektrod a stlačování svařovaných dílů se děje mechanicky, pneumaticky nebo hydraulicky.

Mechanické ovládání pohybu a přítlaku se používá pouze u mikrosvářeček, u bodovek a svářeček na tupo malých příkonů cca do 20 kVA. Síla se navozuje po sešlápnutí

pedálu pákovým převodem. Nevýhodou je kývavý pohyb ramena svářečky. Velikost síly se nastavuje předpětím pružiny.

Nejčastěji se používá **pneumatický systém**, kdy se pohyb a přítlak navozuje přes píst. Rameno s elektrodou pak vykonává přímočarý pohyb. Síla se ovládá snižováním tlaku přiváděného vzduchu.

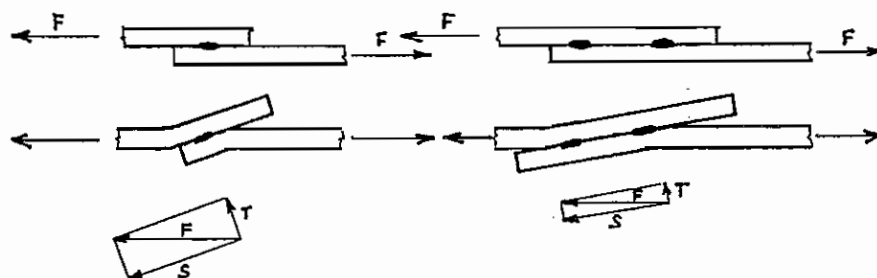
U strojů nejvyšších výkonů, zpravidla svařovacích lisů a odtavovacích svářeček na tupo, se používají **systemy hydraulické**. Určitou nevýhodou jsou vyšší investiční náklady na zařízení.

10.10 Svařování bodové

Při bodovém svařování se vytvářejí přeplátované spoje. Nejběžnější způsob, kdy stroj má dvě protilehlé elektrody, byl již popsán výše. Vedle tohoto uspořádání existuje řada dalších, které umožňují svařit více bodů současně (svařování mnohobodové). Je to např. mnohobodové svařování s jedním sekundárem, mnohobodové se dvěma sekundáry, dvoubodové v protitaktu a další. Znamé a zejména v automobilové výrobě používané je svařování pomocí závěsných bodovek.

Aby se usnadnilo průběžné upravování pracovních ploch elektrod, případně jejich výměna při trvalém poškození, jsou špičky vyměnitelné. Nejčastěji jsou nasazeny pomocí kužele 1 : 10 a jsou do držáků elektrod vsazené. Toto spojení zajišťuje jak dobrý proudový přechod, tak vodotěsnost sekundárního okruhu. Nevhodné je spojení závitové.

Z hlediska únosnosti je u bodových svarů výhodnější volit konstrukci tak, aby převládalo namáhání smykové. U přeplátovaných spojů namáhaných tahem je výhodné dělat dvouřadé spoje. Výsledkem je, že tahová složka síly se výrazně zmenší (obr. 10.10)



Obr. 10.10 Průběh deformace jednořadového a dvouřadového spoje

10.11 Svařování švové

Většina poznatků, které platí pro bodové svařování, platí i pro svařování švové. Hlavní rozdíl je v tom, že svařovací elektrody jsou otáčející se kotouče, nazývané také kladky. Mezi nimi se odvalují svařované díly. Pokud by kladky stály, vytvořil by se pouze jediný bod jako při bodovém svařování. Při švovém svařování je však svar tvořen řadou překrývajících se bodů. Tato řada bodů se vytvoří buď vlivem přirozené modulace střídavého proudu při rychlostech nad 6 m/min., nebo úmyslným přerušováním (modulací) při rychlostech nižších. Pro manuální vedení je rychlost 6 m/min. velmi vysoká, a proto ve většině případů je nutné využít elektronického řízení průchodu proudu. Vhodným skloubením času svařování, přerušování a postupové rychlosti se v oblasti spoje vytvoří taková tepelná rovnováha,

že nedochází ani při nízkých rychlostech k akumulaci tepla, nedochází k propálení, nebo výstřikům taveniny a přesto se body překrývají a vytvoří v případě potřeby těsný svar.

Stejně jako při bodování se jedná o přeplátované spoje, např. těsnicí svary na lemech různých nádrží, radiátorových žebor apod. Zvláštní případ je vysokofrekvenční svařování trubek, kdy sbalená trubka probíhá v induktorem, kde se ohřívá na potřebnou teplotu a svar je vytvořen stlačením tvarovanými kladkami, které trubku posouvají. Tento způsob se zařazuje jako švové svařování, ale ve skutečnosti jde o stykové pýchovací svařování.

Vady ve svarech a jejich příčiny jsou stejné, jako při bodování. Navíc zde ale může nastat další chyba, a to netěsnost svarů. Pokud byl přiveden dostatek energie, bývá příčinou chybně nastavený poměr mezi intervalem svařování a přestávkou, takže body se nepřekrývají.

10.12 Svařování stykové pýchovací

Při tomto způsobu svařování se dva svařované díly upnou do proudových čelistí a vystupující čely se k sobě přitlačí silou F_{sv} . Po sepnutí svařovacího proudu I_{sv} dojde v místě styku, kde je největší přechodový odpor k ohřátí. Část materiálu se z místa svaru vytlačí a vytvoří „výronek“. Poté se proud vypne. Jelikož síla F_{sv} dále působí, pýchování a tvorba výronku ještě může pokračovat, pokud plastický kov neutuhne. Materiál při tomto způsobu nemusí být ani plně nataven. Jedná se vlastně o určitou obdobu „kovářského svařování“, kdy se materiál svařuje v plastickém stavu (obr. 10. 3).

Takto se svařují zejména dráty už od průměru 0,4 mm a tyče menších průměrů do průřezu 600 mm². Na rozdíl od přeplátovaných spojů při bodovém a švovém svařování, zde vznikají spoje tupé. Příprava pro svařování je většinou kolmé zaříznutí.

Svařovací síla F_{sv} se nastavuje zpravidla předpětím pružiny, u větších výkonů pneumaticky. Velikost proudu odbočkami primáru transformátoru. Namísto svařovacího času t_{sv} , se nastavuje délka zpýchování.

Stykové pýchovací svařování nachází uplatnění při výrobě a dalším zpracování drátů, vodičů, při svařování betonářské výztuže, prodlužování vrtáků, napojování pásových pil a při výrobě řetězů.

Vady ve svarech mohou mít příčinu ve špatné svařitelnosti materiálů, opotřebovaných čelistech, špatném technickém stavu stroje, nebo chybně nastavených parametrech. Hraje zde roli i vyložení konců z čelistí. Nadměrně dlouhý čas pýchování nepříznivě ovlivňuje jakost svaru.

10.13 Svařování stykové odtavením

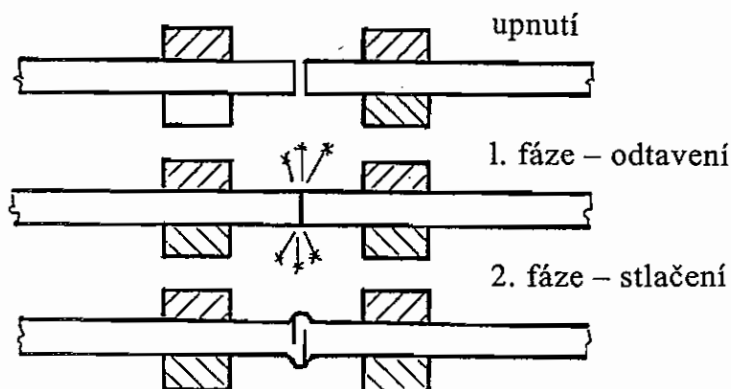
Při tomto způsobu svařování se svařované díly upnou stejně jako při svařování stykovém pýchovacím, ale bez vzájemného kontaktu. Elektrický obvod není uzavřen. Teprve když provedeme přiblížení malou silou a okamžitě odtržení, dochází na některém místě styku čelních ploch k místnímu přehřátí až na teplotu tavení. Tento reverzní pohyb se opakuje a natavovaná plocha se postupně zvětšuje na celý průřez, což je provázeno výstřiky oxidů z taveniny. Tento proces se nazývá odtavování a cyklus trvá od několika sekund až do desítek sekund. Souvislým pokrytím obou čel taveninou končí **1. fáze – odtavování**. Okamžitě následuje **2. fáze – stlačení**. Při ní dojde k energickému stlačení a vypnutí proudu. Tavenina

obou čel se spojí, společně ztuhne a vznikne svarový spoj. Část taveniny ztuhne po obvodu a vytvoří výronek. Průběh stlačování musí probíhat tak, aby mohlo dojít k vylučování oxidů ze svaru na povrch (obr. 10.11).

Stejně jako při pýchovacím svařování jde o tupé spoje. Kromě plných průřezů se odtavením svařují i různé duté profily. Známé jsou rohové svary dveřních zárubní, okenních ráků atd. Pro tyto případy se vyrábějí svářečky k jednoúčelovému použití. Běžně se odtavením svařují průřezy do 3000 mm². Vyrábějí se však i svářečky pro průřezy i nad 40 000 mm². Tyto hodnoty platí pro oceli. Pro lehké a barevné kovy jsou tyto hodnoty nižší. U proudových čelistí platí stejné zásady, jako při svařování pýchovacím. Některé svářečky mají ještě navíc jeden pár čelistí ocelových pro upnutí a navození stlačovacích sil.

Svařování stykové odtavením má široké uplatnění při výrobě dopravních vozidel. Svařují se např. ráfky kol, přivařují se čepy a klouby na polonápravy automobilů. Při budování železničních tratí se používají mobilní svářečky na svařování kolejnic. Ve strojírenství se svařují nástroje z kombinovaných ocelí (nástrojová + uhlíková ocel). Ve stavebnictví se zhotovují zárubně, okenní rámy a nastavují se betonářské tyče do větších délek.

Chyby ve spoji jsou většinou způsobeny přebytkem nebo nedostatkem energie. To se projeví buď nadměrným výronkem, hrubozrnným lomem případně s lunkry a krátery, nebo naopak malým výronkem, s lomem bez krystalické struktury a nízkými mechanickými hodnotami. Špatný technický stav stroje nebo čelistí způsobí přesazení nebo nesouosost ve svaru, nebo zalomení osy svařovaných dílů.



Obr. 10.11 Průběh stykového svařování s odtavením

10.14 Svařování na lisu výstupkové

Při výstupkovém svařování se na jednom svařovaném dílu zhotoví jeden nebo několik výstupků (bradavek). Po sepnutí svařovacího proudu dojde v místě výstupků ke zvýšení jeho hustoty a tím k natavení výstupků a protilehlé oblasti. V konečné fázi svařování se výstupky zbertí, natavený kov obou dílů se spojí a vznikne svar. Výstupky mohou být buď **prolisované** nebo **masivní**. Stlačení dílů se provádí deskovými elektrodami, z nichž jedna je pevná a druhá je součástí pohyblivého beranu. V případě prolisovaných výstupků v plechu svar připomíná vícebodový spoj. Výstupky se nesmí v žádném případě deformovat dříve, než dojde k natavení. Teprve potom se výstupek zbertí a nastane svaření. Část nataveného a plastického

materiálu se vytlačí ve formě výronku, což je průvodní jev dobře provedeného svaru (obr. 10. 12).

Stejně jako u bodového svařování jsou rozhodující parametry síla, proud a čas. Rovněž tak lze použít tvrdý a měkký režim. Při volbě parametrů ale nejsou podstatné svařované tloušťky, nýbrž půdorys svarové plochy.

Přeplátované spoje se dělají zejména pomocí prolisovaných výstupků (obr. 10.13).

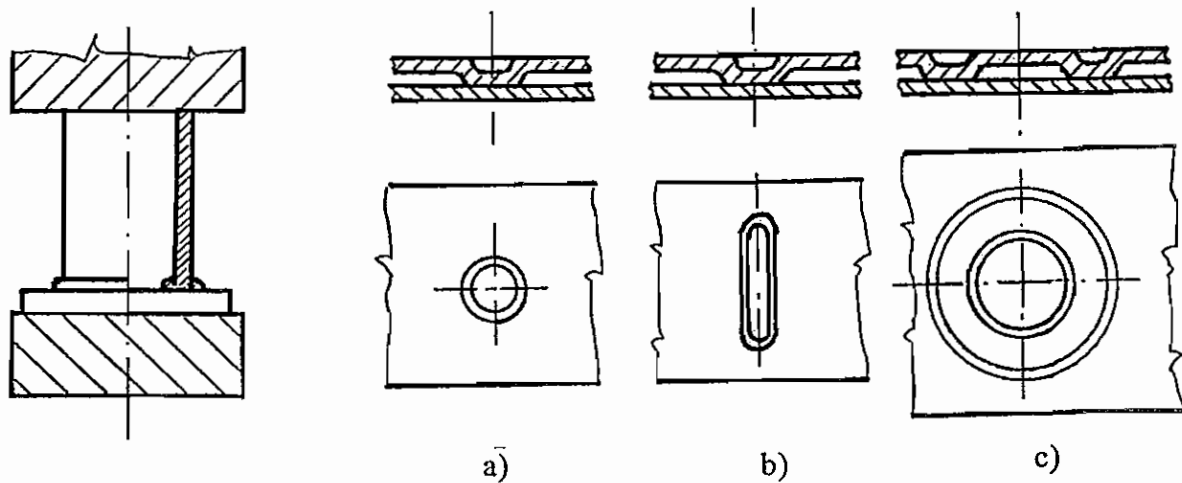
Tupé spoje vznikají pomocí masivních výstupků, např. u tyčí a trubek (obr. 10.14).

Křížové spoje vzniknou např. překřížením drátů, nebo tyčí (obr. 10.15).

Speciální spoje se vytváří pomocí vkládaných výstupků mezi svařované díly (obr. 10.16).

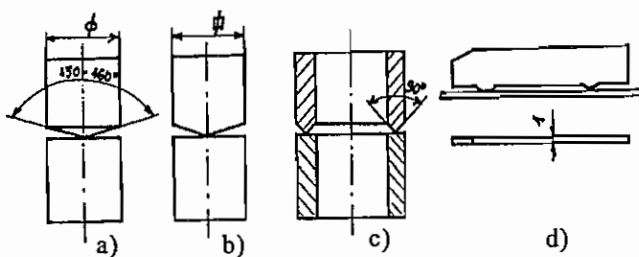
Pomocí svařování na lisu se často nahrazují výkovky při výrobě různých excentrů, svařují se náboje s těly ozubených kol a zhotovují se polotovary při výrobě náradí (nože, frézy apod.) ze dvou druhů materiálů. Uplatnění nachází při výrobě dveřních a okenních závěsů, brzdových čelistí automobilů, roštů chladniček atd. V řadě případů nahrazuje nýtování, např. přivařování ventilačních vložek el. motorů a generátorů (obr. 10.14 d).

Důležitým prvkem pro vizuální vyhodnocení jakosti svarů s masivními výstupky je výronek. Při nedostatku energie výronek prakticky není. Při přebytku je výronek neúměrně velký, kov vystřikuje ze spoje, díly mohou být deformované. Popálení povrchů je způsobeno nedostatečným tlakem. Opotřebovaný přípravek může zavinit špatnou vzájemnou polohu svařovaných částí.

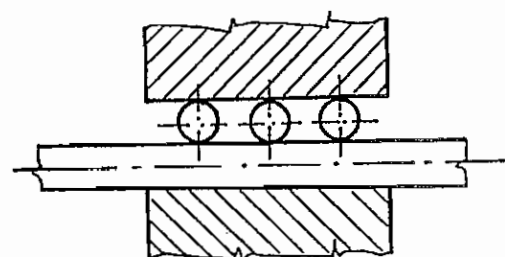


Obr. 10.12 Tvar výronku

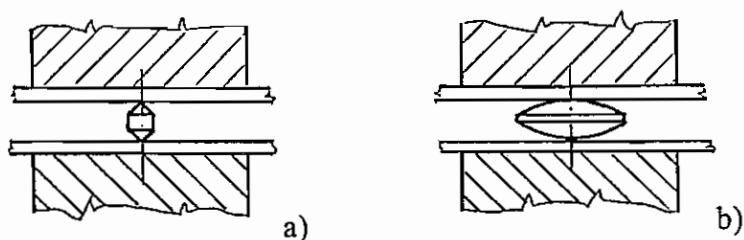
Obr. 10.13 Tvary prolisovaných výstupků na plechu



Obr. 10.14 Tvary výstupků na tyčovém materiálu a trubce



Obr. 10.15 Výstupky tvořené vloženými dráty



Obr. 10.16 Výstupky tvořené vloženými dráty

10.15 Svařitelnost při odporovém svařování

Proti jiným metodám je svařování el. odporem charakterizováno prudkým ohřevem na teplotu tavení a o něco pomalejším chladnutím. Svar je zhotoven v řádu zlomků sekundy. Toto s sebou nese zejména u materiálů s vyšším obsahem C nebezpečí zakalení. Výjimku tvoří pouze svařování na tupo odtavením, kde dochází k určité akumulaci tepla a zpomalení chladnutí.

10.15.1 Svařování bodové

Oceli tř. 11 a 12 do obsahu 0,2 % C nečiní zpravidla potíže. Při vyšším obsahu C, příp. Mn je nutné volit měkčí režim. Stejně tak u ocelí tř. 13 a 16. Nestabilizované oceli tř. 17 se svařují tvrdým režimem.

Pro svařování Al a jeho slitin je nutné použít zdroj dostatečného výkonu. S výhodou se zde používají třífázové zdroje s usměrněním. Překážkou svaření je přítomnost oxidu na povrchu. Proto je nutné tento oxid bezprostředně před svařením odstranit. U duralů je nutné počítat s určitou změnou mechanických hodnot.

Měď je bodově prakticky nesvařitelná, vzhledem ke své el. vodivosti. Svařovat lze celkem úspěšně mosaz. Svařování bronzů je obtížnější a provádí se zřídka. Jiné technické kovy jako W, Mo, Ni a další se v široké míře svařují mikrobodovkami ve výrobě elektroniky a polovodičů.

Tytéž zásady platí i pro svařování výstupkové.

10.15.2 Svařování švové

Oproti bodovému svařování je hlavní rozdíl v tom, že sousedící body se vzájemně tepelně ovlivňují, teplotní gradient je podstatně nižší a jde proto o jakýsi druh měkkého režimu.

U ocelí tř. 11 a 12 nehrozí zakalení až do 0,25 % C. Nestabilizované oceli je nutno z vnějšku chladit vodou (mlhou), aby se zamezila precipitace karbidů chromu.

Pro svařování Al a Cu platí zhruba stejné zásady, jako při bodování. Z jiných technických kovů se svařují zejména slitiny niklu v leteckém průmyslu.

10.15.3 Svařování stykové pýchovací

Pro oceli platí totéž, co bylo řečeno o bodování. Pokud by měl materiál tendenci se kalit, je možné jej ještě ve stroji vyžít několika proudovými impulsy. Svařování Al a jeho slitin nečiní problémy. Je nutné odstranit předem povrchový oxid.

Při této metodě nejsou problémy ani se svařováním elektrovedné mědi. Umožňuje to fakt, že přechodový odpor v místě dotyku proudových elektrod R_d je mnohonásobně menší, než R_k ve spoji.

Svařování nízkouhlíkových ocelí, kromě automatových, nepřináší žádné problémy. Při vhodné volbě parametrů lze svařovat oceli až do 0,9 % C (kolejnice, výhybky). U austenitických ocelí je nutné zajistit, aby TOO byla co nejužší. Jinak hrozí vznik karbidů chromu. Odtavením lze svařovat i ocelolitinu a dokonce i globulární litinu. Svařování Al, Cu a jejich slitin je odtavením možné, ale velmi řídké používané.

10.16 Bezpečnost a ochrana zdraví při práci

Na ochranu zdraví a bezpečnost práce při svařování elektrickým odporem se vztahuje ČSN 05 0650. Svářeč se musí chránit předepsanými ochrannými prostředky před popálením. Důležitá je ochrana očí proti rozstříku kovů. Nutné je dodržovat zásadu, že se smí svařovat pouze materiály, jejichž povrch je kovově čistý, to znamená zbavený rzi, okují, barev, oxidů, tuků a jiných nečistot. Aby se zabránilo zranění obsluhy, řeší se ovládání svařovacích lisů tak, aby spuštění procesu prováděly obě ruce současně a byly tak mimo dosah pohyblivého beranu. Se zařízením je zakázáno pracovat, pokud z chladícího okruhu uniká voda. Je-li např. bodovka ovládána nožním pedálem, musí být tento konstruován tak, aby nemohlo nastat náhodné sešlápnutí jak obsluhou, tak ani kolemjdoucím. Práci je možné provádět jak ve stoje, tak i v sedě na bezpečné stabilní židli. Polohy je možné při práci střídat. Samozřejmostí je pořádek na pracovišti.

Literatura

LIPA, M.: Odporové zvaranie-technologia. VÚZ Bratislava, 1986.
Interní podklady Škoda
Firemní dokumentace Schlatter

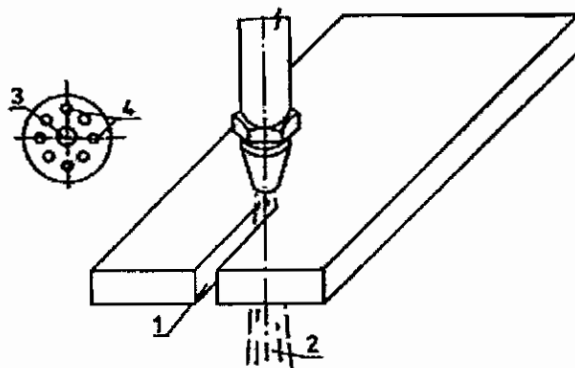
11. TEPELNÉ DĚLENÍ MATERIÁLU – ŘEZÁNÍ KYSLÍKEM A OSTATNÍ ZPŮSOBY DĚLENÍ MATERIÁLU

Tepelné dělení materiálu nachází v průmyslové výrobě velmi široké uplatnění. Všeobecně jsou způsoby tepelného dělení produktivnější než běžně používané mechanické způsoby řezání a dělení materiálu. Nejrozšířenější způsob tepelného dělení materiálů je řezání kyslíkem. Tato technologie dělení materiálů je nejrozšířenější a využívána se především při ručním nebo strojním zhotovování výpalků z uhlíkových konstrukčních ocelí dále při ručním dělení železných materiálů na montážích.

11.1 Princip a podmínky pro řezání kyslíkem

11.1.1 Princip řezání kyslíkem

Proces řezání kyslíkem spočívá v předehřátí řezaného materiálu na zápalnou teplotu a následného přivádění kyslíku pod tlakem, který zajistí spalování kovu a vytvoření řezné spáry. Tento proces je patrný z následného obr. 11.1 Řezání kyslíkem.



Obr. 11.1 Řezání kyslíkem
1 - spára, 2 - struska, 3 - řezací kyslík, 4 - předehřívací plamen

Zápalnou teplotou se rozumí teplota (1150 °C pro železo), při které kov začne intenzivně reagovat s kyslíkem a množství uvolňovaného tepla je vyšší než množství odvedeného tepla. U ocelí se zápalná teplota mění především v závislosti na obsahu uhlíku.

Jestliže je ocel zahřata na zápalnou teplotu, reaguje s přiváděným kyslíkem exotermickou reakcí. Vzniklé teplo předehřívá další objem kovu, teoreticky bez nutnosti přívodu další energie na předehřev. Tento proces probíhá samovolně pokud je kyslík přiváděn do místa řezu.

Proces řezání lze rozdělit na

- ohřev kovu na zápalnou teplotu,
- oxidaci kovu,
- vyfukování roztaveného produktu z řezné spáry.

Pro ohřev kovu na zápalnou teplotu se nečastěji používá jako topný plyn acetylen (méně propan, butan, vodík, zemní plyn). Vlastní tepelná bilance plamene, vzniklého hořením směsi topného plynu a kyslíku, je přímo odvislá od druhu topného plynu, na vzájemném směsném poměru a tepelné reakci.

Oproti svařování se při řezání uvolňuje teplo, které podporuje proces. Předehřívací plamen je ale nezbytný pro krytí ztrát tepla vyzářením a odvodem do materiálu.

V další fázi dochází k oxidaci železa (Fe), při které se vytváří oxid železa (FeO).

V průběhu třetí fáze dochází k vyfukování oxidů typu Fe_3O_4 a Fe_2O_3 , vytvořených nespotřebovaným kyslíkem. Při vytváření oxidu Fe_3O_4 se tvoří nejvíce tepla. Neoxidovaný nebo částečně oxidovaný kov se z žezu odstraňuje i kinetickou energií plynového proudu. Analýzy vyfouknutého materiálu z žezu ukazují, že asi 30 % kovu je neoxidováno. Pro získání kvalitních řezů je potřeba používat vysoce čistý kyslík min. 99,3 %.

11.1.2 Vliv materiálu na řezání kyslíkem

Metallurgický efekt kyslíkového řezání není obecně příliš důležitý u nízkouhlíkových ocelí (pod 0,2 % C), ale může mít nepříznivé důsledky u ocelí vysocelegovaných a slitinových. Studie ukázaly, že na řezné ploše uhlíkových ocelí dochází ke značnému obohacení uhlíkem ve slabé vrstvě. Místně může překročit obsah uhlíku až 2 %. Z toho vyplývá, že dochází k místnímu zbrzdění oxidace uhlíku a zároveň k selektivnímu spalování železa. U slitinových ocelí obsahujících nikl, povrch žezu může ukázat zvýšení obsahu niklu. Při oxidaci - uhlík a nikl nemají stejnou schopnost oxidace jako železo. U vysoce legovaných a slitinových ocelí řezné plochy mají větší tvrdost než základní materiál. Zvýšení tvrdosti může být tak velké, že může následně vést ke vzniku trhlin.

Z toho vyplývá, že řezání kyslíkem je podmíněno, že zápalná teplota řezaného kovu musí být nižší než jeho teplota tavení:

- a) při hoření kovu se musí vyvinout dostatečné množství tepla, aby došlo ke krytí ztrát odvodem a reakce mohla samovolně pokračovat,
- b) materiál se musí během řezání plynule předehřívát v celé řezané tloušťce, nejméně na zápalnou teplotu,
- c) teplota tavení strusky musí být nižší než teplota tavení řezaného kovu, struska musí být snadno tekutá.

11.1.3 Deformace a praskavost materiálu

Podobně jako u svařování probíhá při kyslíkovém řezání teplotní a deformační cyklus. Při řezání nastává místní ohřev materiálu a po zchladnutí se projevuje jako jeho deformace nebo vnitřní napjatost v něm. Na velikost deformace nebo pnutí má vliv množství tepla při řezání, rychlost chladnutí, tuhost materiálu, ale i další vlivy (např. chemické složení materiálu, válcování nebo tváření materiálu). Překračuje-li napětí vznikající ohřevem mez pružnosti řezaného materiálu, vzniká deformace a pnutí v materiálu. Při řezání legovaných materiálů a nebo tlustostěnných materiálů mohou vznikat od vnitřního pnutí na řezných plochách trhlinky, které se mohou šířit z povrchu dovnitř výpalku.

Tento nepříznivý vliv lze omezit i tím, že se válcovaný nebo tvářený plech před pálením vyžihá na odstranění vnitřních pnutí.

Běžně svařitelné konstrukční oceli však nemají sklon ke vzniku trhlin, pokud je nízký obsah vměstků a nenastala silná segregace. Toto je dáno tím, že v kritické tepelně ovlivněné oblasti převládají vysoká tlaková pnutí. V případě, že byly plechy před řezáním za studena tvářeny, může toto být pravděpodobnou příčinou vzniku trhlin v nauhličené oblasti. Významný vliv na vznik trhlin má rychlost ochlazování.

Technikou a vhodným postupem řezání lze účinně zamezovat vzniku deformací, a to:

- a) vhodným podepřením a případným upnutím řezaného plechu na pracovním roštu pálicího stroje,
- b) volbou vhodného poměru výpalku a odpadu materiálu (omezené možnosti, zvyšování odpadu materiálu),
- c) vystužováním plechu a řezaných součástí (při pálení se ponechávají tzv. můstky mezi výpalkem a odpadem),
- d) rovnoměrností ohřevu (řezání více hořáky najednou).

11.2 Zařízení pro kyslíkové řezání a kvalita řezu

11.2.1 Zařízení

Pro montážní práce a kde není kladen zvýšený požadavek na rozměrovou přesnost a kvalitu řezu, používají se ruční řezací hořáky s příslušenstvím (přívodní plynové hadice pro přívod kyslíku a topného plynu, redukční ventily a tlakové lahve nebo z uzávěrů centrálního rozvodu).

Pro zhotovování většího množství výpalků a nebo při požadavku na vyšší přesnost a jakost páleného povrchu se používají strojní hořáky, umístěné na pojezdných vozících nebo na pálicích strojích.

Podle konstrukčního provedení lze hořáky rozdělit na:

- a) hořáky se směřováním plynů pro přehřívací plamen ve špičce hořáku,
- b) hořáky injektorové konstrukce.

Řezací trysky jsou ze slitin na bázi mědi a jsou připevněny na vlastní těleso hořáku. Schématické provedení trysky je patrné z vyobrazení na obr. 10.1.

Pro ruční i mechanizované řezání kyslíkem nabízejí výrobci těchto zařízení širokou paletu řezacích účelových souprav pro různé použití. Tyto soupravy jsou vyráběny a dodávány podle firemního typového označení, které zahrnuje určitý okruh pracovních parametrů a účel užití.

V rámci dodávky soupravy pro ruční řezání kyslíkem je řezací hořák vybaven nezbytnou sadou doplňků, které umožňují vytvářet kruhové, přímočaré a tvarované řezy (jako jsou např. sady výměnných trysek a nástavců, pojezdná kolečka, vodící pravítka a kružítko).

11.2.2 Kvalita řezu

Jakost řezu se obecně hodnotí mezní úchylkou rozměru výpalku a vzhledu povrchu řezu. Vzhled posuzujeme podle hodnoty drsnosti, rovnoměrnosti a tvaru řezné plochy i hrany.

Požadavky na jakost řezu obvykle vycházejí z účelu funkce a namáhání výpalku. Dalším faktorem, který ovlivňuje jakost řezu, je použité zařízení pro řezání. Podle druhu a určení můžeme výpalky rozdělit na:

- a) výpalky, které se nebudou dále mechanicky obrábět (hotové polotovary strojních součástí) v jakosti požadované výrobním předpisem nebo podle stanovených požadavků konstrukcí,
- b) výpalky pro zhotovení svařovaných a sešroubovaných ocelových konstrukcí v jakosti požadované např. normou ČSN P ENV 1090-1/čl. 12.3 - Výroba,

- c) výpalky s přídavkem na obrábění (přídavky na plochu a mezní úchytky se řídí podle vnějšího rozměru a způsobu dalšího obrábění),
- d) výpalky v hutní výrobě (pálení nálitků),
- e) výpalky bez požadavků (např. pálení materiálu na šrotišti).

Jakost hotového řezu především závisí na správné volbě technologie řezání (ruční, mechanizované a strojní řezání), přípravě k řezání (čistota povrchu materiálu, nedeformované nebo vyrovnané plechy, rovný stůl, čisté a tuhé pojezdové dráhy, použité kopírovací zařízení) a na použitých pracovních parametrech (vhodná velikost trysek, správné výškové nastavení hořáku, množství a stabilita tlaku plynů, jakost používaného kyslíku).

Nejčastější nedostatky při řezání, které ovlivňují výslednou jakost jsou např.:

- Příliš malá rychlost řezu je příčinou vyšlehávání spodní části řezu. Struska pevně lpí na spodních hranách, protože obsahuje mnoho nespáleného železa. Nelze ji odstranit pouhým oklepáním, ale musí se odstraňovat sekáním nebo broušením. Často se kapky této strusky na spodní straně svaří a rozříznuté kusy se musí oddělit sekáčem.
- Příliš velká rychlost řezu způsobuje nepravidelnosti na řezných plochách a hluboké rýhy, které jsou značně zahnuté proti směru pohybu. Při dalším zvyšování rychlosti řezání dochází odtrhávání materiálu z řezu.
- Příliš velká vzdálenost hořáku od povrchu materiálu je příčinou odtavování horní hrany a vyšlehávání řezné plochy.
- Příliš malá vzdálenost hořáku od povrchu způsobuje značné natavení horní řezné hrany.
- Příliš velký tlak řezacího kyslíku se projevuje vyšleháním střední části řezných ploch.
- Příliš velký nahřívací plamen způsobuje natavení a opálení horní řezné hrany. Při pálení šikmých ploch- úkosů, způsobuje natavení a sražení povrchové hrany úkosu.
- Znečištěná hubice je příčinou tzv. podkousání a zvětšování mezery ve spodní části řezu.
- Nečistý kyslík se projevuje na řezné ploše jejím vyšleháním, způsobuje hrubý řez a spodní hrany znečišťuje pevně lpící struskou U tenkých plechů způsobuje nečistý kyslík, v součinnosti s malou rychlostí řezání, znečištění spodní hrany struskou.
- Nedostatečná intenzita nahřívacího plamene je příčinou rýhovaného povrchu šikmého řezu. Ale příčinou výskytu jen občasných rýh je nerovnoměrný pojezd hořáku.

Mezní úchytky rozměrů, zhotovených polotovarů z plechů pálením kyslíkem, stanovuje norma ČSN 01 4481, v závislosti na stupni přesnosti (stupeň I – přesný řez, který lze dosáhnout jen strojním pálením, stupeň II – méně přesný řez, který je určen pro běžné použití).

11.3 Ostatní způsoby dělení materiálů

11.3.1 Řezání kyslíkem s přidáváním prášku a řezání kyslíkovým kopím

Při odstraňování nálitů a při dělení značně znečištěných materiálů (na povrchu nebo uvnitř) struskou, nebo jinými nekovovými vměstky se používá řezání kyslíkem s přidáváním ocelového prášku nebo odtavující železné hubice (kyslíkové kopí). Řezání uvedenými způsoby se provádí speciálně upravenými hořáky.

- Řezací hořák s přidáváním prášku:
Princip - Do vystupujícího proudu kyslíku z trysky hořáku je přiváděn (přisáván) měkký ocelový prášek, který zvyšuje řezací účinek oxidické reakce a abraze.
- Kyslíkové kopí:
Princip - Na držák hořáku je nasazena výměnná železná trubka – kopí. Pro zvýšení

řezacího účinku může být trubka uvnitř vyplněna ocelovými třískami. Kyslík je přiváděn středem trubky. Fáze zapálení – nastartování procesu hoření vzniká tím způsobem, že výstupní konec trubky je zahřát vnějším zdrojem tepla až na zápalnou teplotu. Konec trubky začne hořet a začne probíhat exotermická reakce, při které vzniká dostatečná teplota pro tavení kovových i nekovových materiálů. Vnitřní náplň odtavující se trubky umožňuje zvětšit řezací účinek oxidické reakce a abraze. Takto lze řezat i materiály, obtížně řezatelné (beton s železnou výstuží).

Uvedené způsoby řezání umožňují řezat kyslíkem i ty materiály, které se běžně kyslíkem řezat nedají. S úspěchem se uplatňují při řezání nerez ocelí, mědi a jejích slitin, šedé litiny, ale i materiálů s tloušťkou stěny více než 400 mm. Při řezání dochází k značnému vývinu zplodin řezání (dým s kovovými parami, aerosoly), které je nutno odsávat.

Pracovníci, kteří vykonávají práce související s řezáním kyslíkem musí být prokazatelně seznámeni a přezkoušeni ze znalostí bezpečnostních požadavků obsažených v normách ČSN 05 0601 a ČSN 05 0610. Dále musí dodržovat podmínky o požární bezpečnosti při svařování a řezání kyslíkem, obsažené ve Vyhlášce ministerstva vnitra č. 87/2000 Sb. a na tyto práce mají platné oprávnění.

11.3.2 Drážkování uhlíkovou elektrodou a stlačeným vzduchem

Drážkováním uhlíkovou elektrodou a stlačeným vzduchem lze odebírat materiál z povrchu kovových předmětů jakéhokoliv druhu (odlisky, výkovky, svarové spoje). Odebírání materiálu se provádí prostřednictvím elektrického oblouku hořícího mezi uhlíkovou elektrodou a kovovým materiálem. Koncentrovaným teplem oblouku uhlíkové elektrody se rychle taví základní materiál. Roztavenou lázeň tvoří převážně přehřátý roztavený kov, který má malou viskozitu a snadno se odstraňuje proudem stlačeného vzduchu. Proud stlačeného vzduchu proudí rovnoběžně s elektrodou tak, aby co nejméně ovlivnil stabilitu hoření. Vysoká teplota elektrického oblouku stačí k rychlému roztavení všech kovů používaných v technické praxi. Pohybem elektrody dopředu vzniká drážka, jejíž tvar a hloubka závisí na způsobu vedení elektrody a použitých technologických parametrech. Řídce tekutá tavná lázeň, vznikající při drážkování uhlíkovou elektrodou, odstraňuje se čistě mechanicky vlivem kinetické energie stlačeného vzduchu. Tento proces drážkování je charakteristický tím, že není podmíněn oxidací základního materiálu. Zdrojem proudu elektrického oblouku je svařovací agregát. Uhlíková lektroda je upnuta ve speciálním držáku, s uzpůsobeným výstupem stlačeného vzduchu, a to soustředným výstupem vzduchu kolem elektrody a nebo výstupními otvory za elektrodou. Pro drážkování se používají uhlíkové elektrody holé nebo s povlakem mědi o průměru 5 až 10 mm. Vzduch o přtlaku 4 až 6 kPa se v převážné míře odebírá ze vzduchového rozvodu nebo tlakové láhve, a to prostřednictvím regulačního ventilu, opatřeného odlučovačem nečistot. Pracovník, který provádí drážkování uvedeným způsobem musí při práci dodržovat bezpečnostní pokyny, uvedené např. v normě ČSN 05 0601, ČSN 05 0610 a ČSN 05 0630.

11.3.3 Dělení materiálu na zařízeních, které pracují na principu fyzikálních procesů

V současné době se pro řezání legovaných ocelí a neželezných kovů stále více využívá moderních metod tepelného dělení materiálů, u kterých se používá koncentrovaný svazek energie, jehož zdrojem je elektronový nebo laserový paprsek, koncentrovaný tok plazmy. Princip zařízení pro řezání uvedenými způsoby je shodný s principem svařovacích zařízení, které pracují na stejném fyzikálním principu – viz údaje v kap. 9. Odlišné je pouze nastavení pracovních parametrů, kdy při řezání musí koncentrovaný svazek energie procházet celým průřezem materiálu a vystupovat pod úrovní řezaného materiálu. Pro práci na těchto zařízeních platí stejné bezpečnostní pokyny a předpisy jako pro svařovací zařízení. Řezání elektronovým paprskem a laserem dosáhlo rozšíření v sériové i malosériové výrobě,

kde nahrazuje přesné stříhání na lisech. Tyto metody řezání umožňují vytvářet další nová konstrukční a technologická řešení. Plazmové řezání našlo uplatnění při dělení výše uvedených materiálů v montážních podmínkách (vzduchové plazmy) a při výrobě výpalků (stabilní stroje, vybavené plazmovými hořáky s plynovou nebo vodní stabilizací).

Mezi nejmodernější způsoby dělení materiálu, patří řezání vysokotlakým vodním paprskem, který svou vysokou kinetickou energií a abrazivním účinkem řeže mimo kovy a nekovy i jiné technické materiály (např. textil, dřevo, plasty, sklo a keramiku). Zdrojem energie je stlačená voda na cca 500 MPa, která vystupuje ven speciální tryskou v podobě úzkého vodního paprsku. Pro zvýšení abrazivního účinku tlakové vody se do proudícího vodního paprsku přidává abrazivní materiál (např. křemičitý písek, umělý korund).

Literatura

- MINAŘÍK, V.: Tepelné dělení materiálu. Skripta ČVUT, 1993.
KRŇÁK, R.: Řezání a drážkování kyslíkem. SNTL Praha, 1961.
HRUBÍČEK, I.: Drážkování uhlíkovou elektrodou a stlačeným vzduchem. SNTL Praha, 1965.
BUBENÍK, V.: Nepublikované interní učební texty. 2000.
Citované normy ČSN, ČSN EN a Vyhláška ministerstva vnitra č. 87/2000 Sb.

12. MECHANIZOVANÉ, AUTOMATIZOVANÉ A ROBOTIZOVANÉ SVAŘOVÁNÍ

Neustálé zvyšování požadavků na kvalitu svařovaných zařízení, zvyšování pracnosti a snižování průběžné doby výroby vede výrobce k zavádění konstrukčně-technologických inovací a racionalizaci výrobních procesů. Aby výroba svarových spojů byla v ekonomicky přijatelných relacích, je nutné zproduktivnění svářečských prací. To vede k částečné nebo úplné náhradě ručních prací mechanizovanými, automatizovanými nebo robotizovanými systémy. Stupeň náhrady závisí na mnoha faktorech. Jako první je to faktor ekonomický (kolik to bude stát), dále pak technický (do jaké míry lze uvedené zařízení použít) a v poslední řadě faktor personální (máme-li dostatečně zdatné pracovníky).

Podle stupně náhrady lidského faktoru máme celkem tři stupně zproduktivnění svářečských prací:

- a) mechanizované svařování – mechanizováno je podávání přídatného svařovacího materiálu a využívá se stávající svařovací zařízení s jednoduchými elementy pro vedení svařovací hubice případně polohování,
- b) automatizované svařování – mechanizováno je podávání přídatného svařovacího materiálu, vedení svařovací hubice případně i polohování svarového spoje. Vlastní automaty a řešení operační manipulace činí tato zařízení v některých případech srovnatelná se svařovacími roboty zejména po stránce řízení a programování,
- c) robotizované svařování – využití průmyslového robotu, který je definován jako automatické manipulační zařízení, libovolně programovatelné ve třech osách, s technologickými nástroji (v našem případě svařovací hubicí).

12.1 Mechanizované svařování

Používá se všude tam, kde požadavky na přesnost, kvalitu a rovnoměrné kladení housenek případně opakovatelnost nedovolují svařování ruční, ale nasazení automatizovaných nebo robotizovaných zařízení brání jejich vysoká pořizovací cena, malá univerzálnost a mobilita. Využití nachází také u montážních prací.

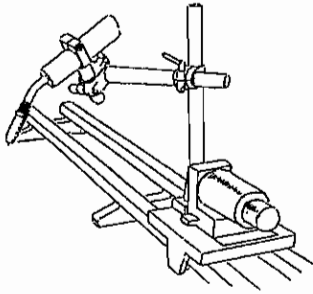
Mechanizované svařování využíváme především při svařování dlouhých rovných svarů, svařování kruhových svarů, obvodových svarů a pro sdružené svařování (obr. 12.1).

12.2 Automatizované svařování

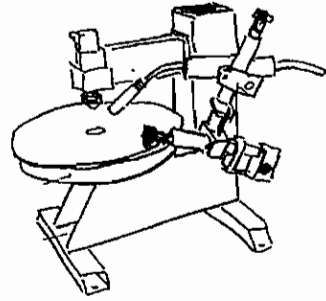
Využívá se všude tam, kde jsou vysoké požadavky na kvalitu, je nutné zproduktivnění výroby a odstranění subjektivních činitelů. Ve většině případů se jedná o specializovaná pracoviště.

- Obvodové svary

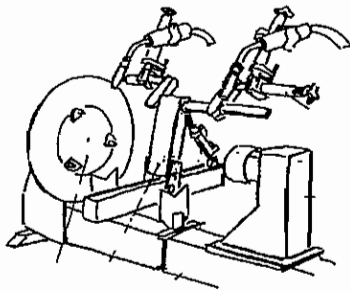
provádějí se zejména u rozměrných svarků na specializovaných pracovištích, která musí být vybavena především polohovadly s regulovanými otáčkami, umožňující plynulé a řízené otáčení se svařovaným dílem a dále pak zařízením, umožňujícím umístění svařovacích strojů tak, aby svařování mohlo být prováděno s vnější i vnitřní strany. Tato zařízení musí být vzájemně elektricky propojena, aby byl zajištěn jednak automatický provoz, ale i blokování jednotlivých zařízení vzájemně. Pracoviště obvodových svarů je na obr. 12.2. Polohu svařovací hubice vzhledem ke svarovým hranám hlídá jednak čidlo umístěné ve svarovém úkosu a také čidlo, které registruje pohyb svarku po kladkách a zabezpečuje jeho stálou polohu.



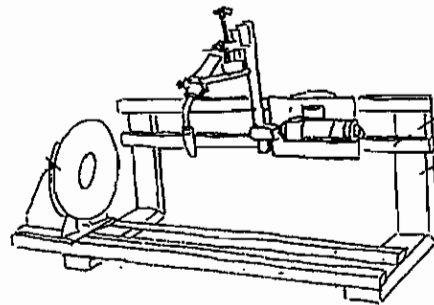
Svařování dlouhých rovných svarů



Svařování kruhových svarů



Svařování obvodových svarů



Svařování sdrúžené

Obr. 12.1



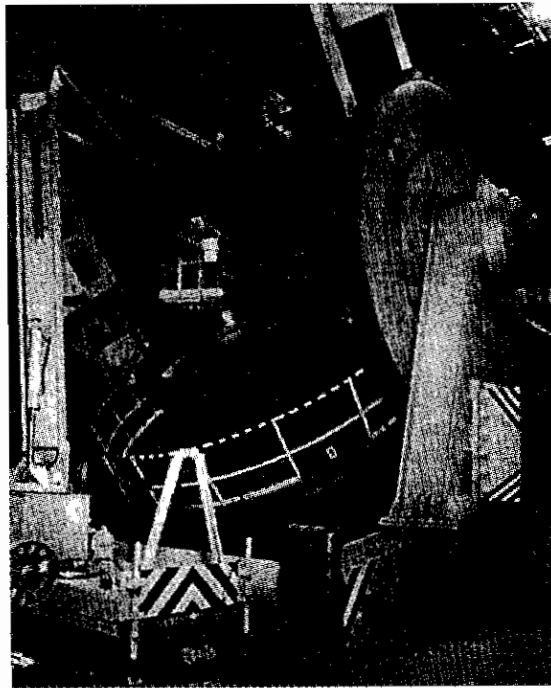
Obr. 12.2

- **návary na válcových plochách**

na rozměrných válcových plochách se provádějí návary na specializovaných pracovištích, umožňujících přístup jak na vnější, tak vnitřní povrch po případě, kdy přístupnost je pouze z jedné strany. Pracoviště musí být vybavena kladkovými polohovadly, zajišťujícími rovnoměrné otáčení svařovaného dílu s možností nastavovat požadovanou rychlost navařování, tj. s plynulou regulací otáček. V případě přístupnosti z obou stran je pracoviště vybaveno traverzou, po které pojíždí vůz se svařovací hlavou, pokud je přístupnost pouze z jedné strany, využívají se různé nosiče (výložníky).

- **návary na sférických plochách (obr. 12.3)**

navarování sférických ploch se vyznačuje řadou odlišností od běžných způsobů navařování rovinných nebo válcových ploch. Především se mění v průběhu navařování průměr, na který se navařuje, a s tím souvisí nutnost plynulé změny otáček, aby se neměnila rychlost navařování. Dále pak je nutné zachovat polohu vodorovnou shora pro navařování, a s tím je spojena nutná změna polohy svarového spoje. Nastavení svařovací pásky kolmo k povrchu je podmínka snadno splnitelná u rovinných a válcových ploch, v případě navařování sférických ploch vyžaduje poměrně složitá řešení. Vlastní pracoviště potom musí být vybaveno nosičem výložníkového typu s výsuvným ramenem a vybaveným na konci pantografem s výškově nastavitelnou plošinou, na které je umístěno svařovací zařízení. Vlastní navařovaný kus je potom uchycen na stůl naklápěcího polohovadla, které je elektricky propojeno jak s ovládacím zařízením výložníku tak svařovacího zařízení.



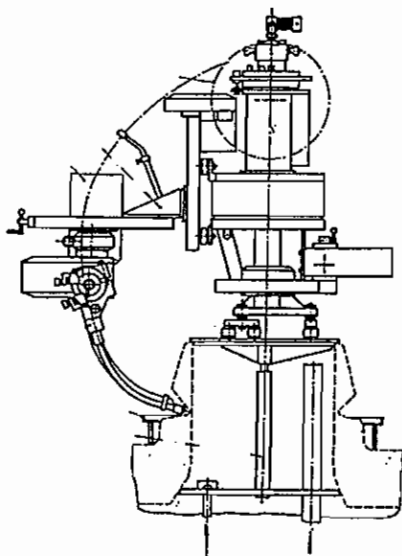
Obr. 12.3

- **navarování rovinných kruhových ploch**

navarování se provádí jednouúčelovým zařízením, jehož hlavní částí je masivní sloup s otočným ramenem, na kterém je umístěn držák svařovacího zařízení, který se otáčí kolem své osy a současně zajišťuje pohyb ve svislém směru. Vlastní navařování je plně automatizováno, ručně se provádí pouze vystředění automatu a nastavení parametrů.

- **přivařování nátrubků**

přivařování nátrubků k tlakovým nádobám nebo jiným součástem se provádí na speciálním jednoúčelovém zařízení (obr. 12.4), které sestává z upínací desky se sloupem, na kterém je umístěna otočná část s křížovým suportem a podávacím zařízením se svařovací hubicí. Dále je na otočné části umístěna kazeta s přídatným svařovacím drátem a zásobník tavidla. Vlastní přivařování je plně automatizováno. Ve zvláštních případech je součástí také chladicí zařízení.



Obr. 12.4

- **orbitální svařování**

využívá se především pro svařování trubek případně přivařování trubky k trubkovnici. Používají se různé typy orbitálních hlav, které slouží jednak k ustředění trubek a následně k vedení svařovacích zařízení. Ke svařování se využívají především metody 131 (MIG) a 135 (MAG), ale i metoda 141 (TIG) s přídatným drátem i bez přídatného drátu. Tato zařízení jsou plně automatizovaná a ručně se provádí pouze ustavení na kusu.

12.3 Robotizované svařování

Průmyslové roboty jsou zařízení nahrazující práci lidských rukou. Jsou to adaptivní automatické systémy, sestávající se z mechanické a řídicí části. Můžeme si je představit jako soubor, který je složen z mechanických uzlů, pohonů, snímačů a řízení. Charakteristickou vlastností průmyslových robotů je univerzálnost a možnost přeprogramování na jiné úkoly.

Aby výkonný orgán robota dosáhl libovolný bod v prostoru, jsou potřebné tři pohybové osy (tři stupně volnosti), aby se v dosaženém bodě mohl libovolně orientovat, jsou potřeba další tři stupně volnosti. Pro svařování se vyrábějí specializované roboty převážně s šesti stupni volnosti.

Pro úspěšný provoz robotizovaných pracovišť je nutné zabezpečit jednak požadovaný pohyb a dále pak informaci o poloze a stavu příslušných prvků. K tomu slouží soubor různých sensorových systémů. Jednak jsou to senzory dotykové nebo bezdotykové (optické, indukční, laserové, apod.). Velký význam se připisuje signálu z elektrického oblouku pomocí senzoru odstupu, který vyhodnocuje za současného měření svařovacího proudu a napětí posun

pracovního bodu elektrického oblouku, při změnách vzdáleností svařovací hubice od hrany úkosu. Užívají se také televizní systémy „technického zraku“.

Při zavádění si musíme uvědomit také zdravotní a bezpečnostní rizika. Mezi základní přínosy zavádění automatizovaných a robotizovaných výrobních procesů patří vedle zvyšování produktivity práce a zkvalitnění výroby také humanizace výrobního prostředí především odstraňováním nebezpečné a zdraví škodlivé monotónní práce. Ale ani zde se nevyhneme určitým rizikům a rizikovým faktorům, které bezprostředně ohrožují život člověka.

Zdroje rizik můžeme podle povahy práce rozdělit do dvou okruhů. Především jsou to rizika při programování, seřizování, údržbě a opravách, kde je to nebezpečí úrazu od pohybujících se mechanických částí a dále možnost úrazu elektrickým proudem. Potom jsou to rizika při vlastní práci, to především ohrožení zdraví škodlivým zářením, teplem a rozstříkáním svarového kovu, ohrožení zdraví škodlivými výparů a aerosoly a do jisté míry také nebezpečí úrazu pohybujícími se částmi.

Literatura

BARTÁK, J., K'ONIGSMARK, J.: Mechanizovaná a automatizovaná pracoviště v závodě Energetické strojírenství k.p. ŠKODA. Technika ŠKODA, 1988.
Firemní literatura

13. MĚKKÉ A TVRDÉ PÁJENÍ

V počátcích výroby a praktického využívání kovů logicky vyvstala potřeba jejich spojování. K nejstarším technologiím, které si dávní řemeslníci osvojili při zpracování kovů patří pájení. Nejstarší předměty, na nichž bylo prokazatelně použito pájení, jsou zlaté vázy a nádoby ze sumerských královských hrobů, pocházející z doby přibližně 3200 let př. Kr. Z dokonalosti provedených spojů lze usoudit, že použití technologie bylo zvládnuto řádově o staletí dříve. Podle ČSN 05 0040 je pájení **způsob metalurgického spojování kovových dílů, nebo nanášení pomocí roztavené pájky, přičemž pájené plochy základních materiálů nejsou natavené, ale pouze smáčené použitou pájkou**. Na vzniku pájeného spoje se podílí řada fyzikálních nebo chemickofyzikálních jevů, které budou popsány dále.

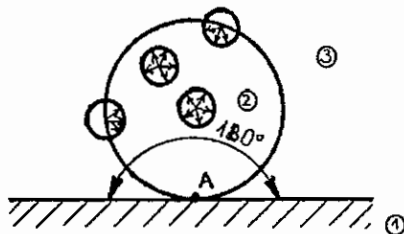
Pájené spoje jsou schopné splnit požadavky na těsnost spojů, el. vodivost, korozivzdornost, mechanickou pevnost při statickém i dynamickém namáhání a řadu dalších požadavků. Dobře provedený spoj má i pěkný vzhled s plynulým přechodem do základního materiálu a nevyžaduje si žádné dodatečné úpravy. Pájet lze prakticky všechny v průmyslu používané kovy, a to i ve vzájemných kombinacích. Lze pájet i sklo a různé keramické materiály. Pájení má své pevné místo i v jaderném strojírenství, v kosmickém výzkumu při výrobě družic a raket a ve výrobě elektronických součástek a zařízení.

Řadu pracovních postupů, zejména v hromadné a velkoseriové výrobě lze jednoduchými prostředky mechanizovat a automatizovat. Ruční pájení se uplatňuje v montážní a kusové výrobě.

13.1 Povrchové napětí

Uvnitř kapaliny, kterou je i roztavená pájka, se přitažlivé síly částic navzájem ruší a vytváří se tak z hlediska napětí rovnovážný stav (obr. 13.1). Jinak je tomu ale na povrchu. Povrchové molekuly jsou pod vlivem jednosměrně působících sil, jejichž směr je kolmý k povrchu kapaliny. Snaží se povrchové molekuly „vtáhnout“ dovnitř. Na povrchu kapaliny tak vzniká oproti vnitřku přebytek energie. Kapka kapaliny (tekuté pájky) tento přebytek kompenzuje tím, že se snaží zaujmout při daném objemu tvar, jehož povrch by byl co nejmenší, čemuž odpovídá tvar koule. Snaha kapaliny zaujmout tvar s nejmenším povrchem je výslednicí účinku sil, které působí na její povrch a tento jev se nazývá **povrchové napětí**. Velikost povrchového napětí pájky je ovlivněna strukturou roztaveného kovu a okolního prostředí, tj. druhem tavidla, typem ochranné atmosféry, nebo stupněm vakua. Pro určitou teplotu a mezeru se zjišťuje pomocí zkoušky kapilární vzlínavosti. Se stoupající teplotou povrchové napětí klesá, výjimkou je čistá měď, kde je tomu naopak.

S povrchovým napětím úzce souvisí další vlastnosti pájek, a to smáčivost, roztékavost a vzlínavost v mezeře.



Obr. 13.1 Průběh povrchového napětí

13.1.1 Smáčivost a roztékavost

Smáčivost je schopnost tekuté pájky přilnout při určité teplotě k čistému povrchu spojovaného materiálu.

Roztékavost je schopnost tekuté pájky roztéci se při určité teplotě po vodorovném povrchu základního materiálu.

Při smáčení nabude kapka pájky tvar, při kterém je povrchová energie systému *základní materiál – pájka – tavidlo (atmosféra, vakuum)* minimální a mohou se projevit meziatomární síly mezi pájkou a materiálem (obr. 13.2).

F₁- jsou přitažlivé síly atomů povrchové vrstvy tuhého tělesa a tekuté pájky, nazývané **síly adhezní**

F₂- jsou přitažlivé síly působící mezi sousedními atomy uvnitř tekuté pájky, nazývané **síly kohezní**

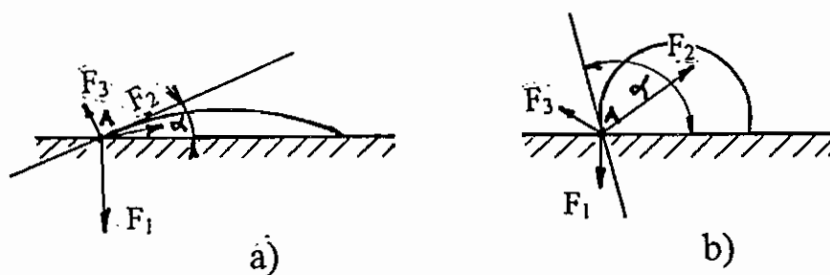
F₃- jsou přitažlivé síly plynného prostředí (tavidla).

Z pohledu praktického využití jsou možné dva případy. Buď se jedná o dokonalou smáčivost, kdy síly kohezní jsou menší než síly adhezní, nebo o nesmáčivost, kdy jsou kohezní síly větší než adhezní.

Smáčení je vlastně první stádium vzájemného fyzikálně chemického působení atomů (iontů) roztavené pájky se základním materiálem. Při smáčení začínají působit meziatomární síly, které způsobují v místech mezifázového rozhraní vazby, jež se rychle rozšiřují po celé ploše styku. Při smáčení se dva volné povrchy mění v jedno **mezifázové rozhraní**. Atomy roztavené pájky přecházejí do oblasti působení sil krystalové mřížky základního materiálu.

Kvantitativním kriteriem smáčivosti je úhel styku α , který svírá tečna, vedená k povrchu pájky v místě styku se základním materiálem. Pokud je $\alpha < 20^\circ$ hovoříme o velmi dobré smáčivosti, která je nezbytná v případě kapilárního pájení (obr. 13.2a). Je-li $20^\circ < \alpha < 90^\circ$ označujeme smáčivost jako dobrou. Smáčivost v případech, kdy $\alpha > 90^\circ$ je označována jako špatná (obr. 13.2b)

Příznivý vliv na snížení mezipovrchových napětí má vhodné legování pájky, základního materiálu a optimální podmínky pájení. Vliv má i kvalita pájené plochy. Vhodný povrch je třískově obroběný, nebo tažený. Leštěné povrchy jsou drahé a nevhodné. Důležitou podmínkou smáčení je teplota. Zejména u materiálů s vysokou tepelnou vodivostí (Cu, Al) je nutné, aby teplota povrchu ještě před stykem s pájkou byla rovna minimálně teplotě solidu pájky. Jako **teplota smáčekci** se označuje teplota, kdy již pájka smáčí povrch, aniž by se roztekla. Tohoto jevu se využívá při **nánosovém pájení**. Při **kapilárním pájení** je teplota obvykle nad likvidem pájky. Pochod pájení je nevratný, tj. nelze již zpětně vytvořit kapku pájky. Vlivem vzájemné rozpustnosti a difuze dojde k vytvoření fáze mezi základním materiálem a pájkou a přitom se zpravidla změní složení použité pájky. Smáčení může nastat pouze tehdy, když se mezi některými prvky pájky a základního materiálu tvoří tuhý roztok, nebo intermetalické slitiny. Vzájemná rozpustnost spojovaných kovů může být i nepatrná.



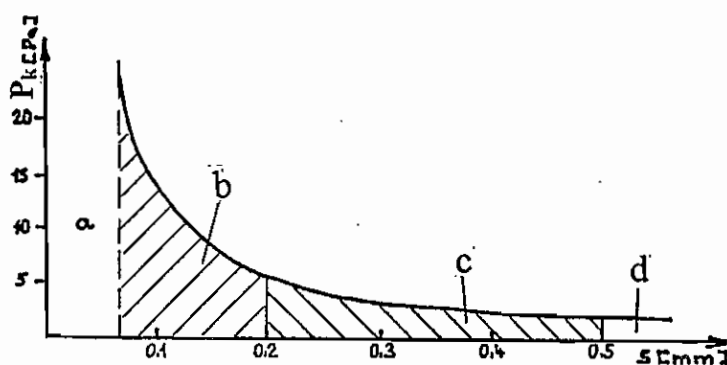
Obr. 13.2 Styk pájky s povrchem materiálu
a) dobře, b) špatně

13.1.2 Kapilarita

Kapilarita je schopnost tekuté pájky vyplnit při pracovní teplotě úzkou mezeru spoje působením kapilárních sil. Velikost kapilární síly se určuje podle zákonů hydromechaniky pro laminární proudění. Vznik hnací kapilární síly se vysvětluje účinkem zakřivení čela postupující pájky do tvaru menisku. Při smáčení svislé stěny kapiláry lze opět zaznamenat účinek již známého úhlu smáčení α (obr. 13.3a, b).



Obr. 13.3 Smáčivost pájky ke svislé stěně
a) vzlíná, b) nevzlíná



Obr. 13.4 Závislost kapilární síly na velikosti mezery

Na velikost kapilární síly P_k má podstatný vliv velikost mezery. Závislost kapilární síly P_k na velikosti mezery pro pájku B-Ag45-Cu-Zn-740/680 je patrná z grafu na obr. 13.4. V grafu jsou vyznačeny 4 oblasti, které charakterizují vhodnost dané mezery pro určitý typ pájení. Oblast a s mezerou $< 0,1\text{mm}$ je pro pájení nevhodná. Nezaručuje zatečení pájky do spoje. Oblast b s mezerou $< 0,2\text{mm}$ je vhodná pro kapilární pájení. Široká oblast

0,2 – 0,5mm má uplatnění při manuálním pájení. Oblast šířky > 0,5 mm je pro pájení nevhodná – kapilární síly přestávají působit.

13.1.3. Metalurgické reakce při pájení – difuze

Při pájení jsou tekutá pájka a tuhý základní materiál po určitou dobu ve vzájemném styku, což umožňuje vznik metalurgických reakcí ve spoji. Tento interval trvá od několika sec. až po max. 300 sec. S ohledem na degradování účinku použitých tavidel by neměl být delší.

Podle druhu pájky a základního materiálu může ve spoji nastat některá z těchto reakcí:

- adhezní spojení,
- vzájemná difuze prvků pájky a základního materiálu,
- rozpouštění základního materiálu pájkou,
- reakce pájky s povrchovými oxidy základního materiálu.

Při adhezi nedochází k vzájemné rozpustnosti pájky a základního materiálu, jako např. u kombinací Pb – Fe, Pb – Cu, Ag – Fe a dalších. Adhezní spoj však není podřadný a využívá se tam, kde nesmí nastat změna chemického složení spojovaných materiálů, např. při výrobě Si diod. Takový spoj má dobrou el. vodivost, ale poněkud nižší τ_{Dov} a σ_{Dov} .

Většinou se však vytvoří přechodové oblasti určitých tlouštěk, které mají jiné chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti, než spojované materiály. Tyto vlastnosti přechodových vrstev pak určují užité vlastnosti spoje.

Podmínkou difuze při pájení je možnost přemístění atomů pájky a základního materiálu. Toto přemísťování je usnadněno nehomogenitou složení. Na hloubku difuze mají vliv poruchy struktury základního materiálu (vakance a dislokace), gradient teploty, vzájemná aktivita jednotlivých prvků a další. Tok prvků při difuzi a hloubku difuze lze matematicky vyjádřit pomocí Fickových zákonů. Tyto vztahy ale platí beze zbytku pro difuzi v čistých kovech. U vícesložkových slitin, a to většinou pájky jsou, se jedná o jev velice složitý, který se stále řeší a je předmětem výzkumu. Difuzní procesy také závisí na typu a nepravidelnostech krystalové mřížky. Mohou probíhat po povrchu, po hranicích zrn, nebo nejpomaleji v celém objemu zrna. Difuze po hranicích zrn je zejména u austenitických ocelí nežádoucí, protože je příčinou tzv. **pájecí praskavosti**. Jedná se o obdobu elektrochemické koroze, kdy pájka mezi zrny tvoří elektrolyt a porušuje soudržnost základního materiálu. Omezuje se použitím pájky, jejíž komponenty mají sníženou rychlost difuze, předchozím vyžháním základního materiálu, snížením pracovní teploty a zkrácením doby pájení.

13.2 Druhy pájení a postup

V závislosti na výšce teploty, jaká je potřebná k provedení spoje se rozlišují dva druhy pájení, a to pájení měkké a pájení tvrdé. Obdobně jsou odvozeny termíny pájky měkké a tvrdé. Při **měkkém pájení** se používají pájky s teplotou tavení do 450 °C. **Tvrdé pájení** probíhá při teplotách nad 450 °C.

Aby vznikl kvalitní pájený spoj, je nutné dodržet určitý sled operací a potřebných opatření.

Prvořadým požadavkem je čistota pájených ploch a přídavných materiálů.

1. Povrchy musí být kovově čisté, tj. zbavené mastnot, rzi, oxidů, barev, vlhkosti a jiných nečistot. Vhodná drsnost povrchu je $> 10\mu < 100\mu$. Povrchy výkovek, odlitků a vývalků za tepla je nutné obrobit.
2. Správně zvolit kombinaci základní materiál – pájka – tavidlo. Využije se údajů v materiálových listech pájek a doporučení výrobců pájek a tavidel.
3. Zajistit vzájemnou polohu dílů před pájením, aby nemohlo dojít k nekontrolovanému posunu částí během pájení nebo chladnutí spoje. Toto se řeší buď konstrukcí spoje nebo pomocí přípravků, kde se kupnutí využívá vaček, závaží apod. Použití pružin je nevhodné, vzhledem k možnému poškození teplem.
4. Zvolit vhodný způsob předehřevu. Ohřev musí být rychlý a neměl by být delší než 300 sec. Jinak hrozí nebezpečí znehodnocení tavidla.
5. Vytvořit optimální podmínky pro zatečení pájky do spoje. Pájku lze většinou do spoje nebo jeho sousedství vložit předem ve tvaru tenkého plechu (folie, síťky, prášku) nebo prstence vytvořeného z drátu u kruhových průřezů.
6. Provést vhodným způsobem ochlazení a konečné úpravy spoje. Chladnutí probíhá většinou volně na vzduchu. V některých případech, např. v elektrotechnice je nutné chlazení urychlit, aby nedošlo k poškození přilehlé izolace vodičů. Děje se tak ofukováním tlakovým vzduchem, vodní mlhou, nebo speciálními chladítky, která brání odvodu tepla dále do vodiče. Konečná úprava spočívá zpravidla v odstranění zbytků tavidel, zejména pokud jsou korozivní a okartáčování. Tavidla se podle druhu odstraní vymořením s následujícím oplachem vodou mechanicky, nebo někdy postačí jen oplach, nebo otření vodou.

13.3 Pájky

13.3.1 Pájky měkké

Jsou to pájky s teplotou tavení pod 450 °C. Jejich pevnost je poměrně nízká a jsou proto vhodné pro spoje, které nejsou příliš namáhány ani pevnostně, ani zvýšenou provozní teplotou. Dvě hlavní skupiny jsou pájky **na bázi cínu** a pájky **speciální**. Pájky cínové jsou slitinou Sn – Pb s pracovní teplotou v rozsahu 190 – 350 °C. Obsah cínu se u nich mění od 4 – 99 % Sn. Speciální pájky jsou většinou vícekomponentní slitiny, kde se vedle Sn, Pb, Cd a Zn vyskytují další legury, jako např. Ag, Cu, Sb, Bi, In, které ovlivňují vlastnosti pájky tak, aby vyhověla kladeným požadavkům. Vznikají tak pájky pro určité specifické použití, a to:

- pro vyšší provozní teploty,
- pro potravinářský a chladírenský průmysl,
- pro elektrotechniku a elektroniku,
- pro pájení skla,
- pro nízké pájecí teploty a na tavné pojistky,
- pro práci za kryogenních teplot,
- pájky modelovací pro výrobu karoserií.

Zvláštní skupinu tvoří měkké **pájky pro pájení lehkých kovů** jako Al, Mg, Ti a jejich slitin. Hlavním požadavkem na tyto pájky je dobrá odolnost proti elektrochemické korozi. Tyto pájky mívají za základ Sn, Pb, Cd s přidáním malého množství Zn, Cu, Al a jiných. Teplota tavení je do 270 °C. Středoteplotní pájky na Al se taví v rozsahu 270 – 400 °C a liší se zejména zvýšeným obsahem Zn (30 – 48 %).

13.3.2 Pájky tvrdé

Používají se pro spoje, které musí přenášet vyšší mechanické namáhání, nebo pracují za zvýšených, anebo kryogenních teplot. Podle hlavních legur se dělí do několika skupin:

Pájky na bázi mědi

E – Cu pro kapilární pájení ocelí, Ni a jeho slitin. Odolává teplotám do 350 °C. Teplota pájení je přibližně 1150 °C.

Cu – P10 je pájka s fosforem na pájení Cu a jejích slitin. Je nevhodná na pájení ocelí a Ni a jeho slitin. Na Cu se používá bez tavidla.

Cu – Zn60 je nejznámější mosazná pájka pro pájení ocelí, mědi a jejích slitin. Podle určení se její vlastnosti upravují malým množstvím legur jako je Sn, Si, Ag, Ni, Mn. Není vhodná pro pájení v atmosféře a ve vakuu.

Cu – Zn – P pro výrobu a opravy v chladírenském průmyslu. Teplota tavení je 700 – 750 °C.

Pájky na bázi stříbra

Tyto pájky jsou několikanásobně dražší než předchozí. Důležitou vlastností je nižší pájecí teplota (630 – 800 °C) v závislosti na obsahu Zn a Cd. Pájí téměř všechny železné i neželezné kovy. Výjimkou jsou lehké kovy, Ti a jeho slitiny.

Pájky na bázi Ni

jsou vhodné pro pájení žárupevných, žáruvzdorných a korozivzdorných ocelí a slitin.

Pájky na bázi železa

jsou vhodné pro pájení vysokotavitelných materiálů ve vakuu i v redukční atmosféře.

Pájky na bázi paladia

jsou žárupevné pájky pro použití ve výrobě plynových turbin, proudových motorů letadel, elektroniky, jaderných zařízení atd. Mají proti Ni pájkám některé výhodnější vlastnosti.

Pájky z drahých kovů kromě Au, Pt, Pd, Ag obsahují ještě Ni a Cu. Tvoří dvě hlavní skupiny – zlaté a platinové. Mají uplatnění v průmyslové výrobě, v zubním lékařství a v umělecké výrobě a ve zlatnictví.

Pájky na pájení hliníku jsou většinou slitiny typu Al – Si, případně Al – Cu – Si. U nás je nejrozšířenější pájka Al – Si12 s teplotou 580/575 °C. Vzhledem k malému rozdílu potenciálů je nebezpečí elektrochemické koroze minimální.

13.4 Tavidla

Volba příslušného tavidla se děje na základě materiálových listů pájek, kde jsou nejvhodnější tavidla doporučena, nebo dle doporučení výrobců pájek a tavidel. Správně zvolené tavidlo musí splňovat tyto požadavky:

- v maximální míře podporovat smáčení základního materiálu pájkou,
- rozpouštět v co největším rozsahu a co nejrychleji povrchové oxidy základního materiálu a pájky ještě před dosažením pájecí teploty,
- musí si podržet svoje fyzikálněchemické vlastnosti po celý interval pájení, tj. podržet si optimální viskozitu, povrchové napětí, hustotu a chemickou aktivitu,
- vývin zdraví škodlivých sloučenin, kovových par a plynů musí být minimální,
- zbytky tavidla by měly být nekorozivní,

- měla by být snadná odstranitelnost zbytků tavidla po pájení.

13.5 Technologie pájení

V průmyslu se využívá celá řada technologií pájení, které se liší způsobem ohřevu, způsobem přidávání pájky a tavidla do spoje, nákladností použitých přípravků a zařízení, reprodukovatelností, produktivitou a dalším. Konkrétní technologie se volí případ od případu v závislosti na požadavcích kladených na spoj, na druhu pájky, na základním materiálu, ekonomičnosti a dalších kriteriích. Mezi základní technologie patří:

13.5.1 Pájení páječkou (pájedlem)

Tato metoda se používá při manuálním měkkém pájení. Měděný blok s hrotem se ohřeje buď v pícce, nebo plamenem, nyní častěji el. odporovými tělesy nad teplotu pájení. Přiložením k místu spoje se teplo předá vedením do materiálu. Po dosažení pájecí teploty se přidá pájka a po zapájení se pájedlo oddálí a spoj se nechá vychladnout. Pájku lze i předem nanést na hrot pájedla. Do této kategorie patří i známé transformátorové páječky používané v elektronické výrobě.

13.5.2 Pájení plamenem

Používá se pro ruční tvrdé pájení, méně pro měkké. Místo spoje se ohřívá energií spalovaného hořlavého plynu se vzduchem, nebo kyslíkem. Pájka se do spoje přidává druhou volnou rukou, nebo se do spoje může vložit předem ve tvaru plíšku, prstýnku apod. Výhodné je použití pájek obalených tavidlem.

13.5.3 Pájení v peci

Používá se v hromadné výrobě, kdy se najednou zapájí velké množství spojů, které je limitováno pouze velikostí pece. V peci musí být možné vytvořit ochrannou atmosféru, nebo vakuum, ale při pájení s tavidlem to není podmínkou. Součástky s předem vloženou pájkou se založí do pece a provede se hromadné zapájení.

13.5.4 Pájení v solné lázni

Používá se pro pájení ocelí a součástí z mědi a jejich slitin. Při tomto způsobu pájení se používají podobné soli jako při tepelném zpracování. Roztavená lázeň má neutrální nebo mírně aktivní charakter a slouží jako tavidlo i jako zdroj tepla pro pájení. Podle potřeby je možné účinek lázně zvýšit předběžným nanesením tavidla na pájené plochy. Mechanizací za použití dopravníku pro ponořování lze docílit značné produktivity např. při pájení rámu jízdních kol.

13.5.5 Pájení v kovové lázni

Spočívá v tom, že se pájené díly ponořují do roztavené pájky, jejíž povrch je krytý tavidlem. Lze takto pájet na tvrdo i na měkko. Nevýhodou je, že pájka ulpí i na povrch ponořené součásti, a tak stoupá její spotřeba. Je vhodné povrch chránit ochranným nátěrem vodního skla s kaolinem nebo grafitem. S výhodou se takto pájí např. spoje vinutí s komutátorem u el. motorů, kdy se na jedno ponoření zapájí celý komutátor.

13.5.6 Pájení elektrickým odporem

Nalezlo své uplatnění zejména v elektrotechnice při tvrdém pájení Cu vodičů o průřezích spoje až do cca 2000 mm². Zdrojem proudu je většinou jednofázový transformátor odporové svářečky. Na sekundární obvod jsou napojeny chlazené kabely s kleštěmi, které mají grafitové výkyvné čelisti. Pájený spoj se čelistmi sevře, vlivem průchodu proudu se grafit ohřeje do žlutého žáru a vedením předá své teplo do spoje. Obsluha vypínáním proudu reguluje rovnoměrnost ohřevu na teplotu pájení. Pájka se do spoje většinou vkládá předem.

13.5.7 Pájení elektrickou indukcí

Umožňuje zhotovovat spoje největších průřezů při výrobě vinutí velkých generátorů tvrdým pájením. Spoj s předem vloženou pájkou se zasune do induktoru a po sepnutí proudu dojde v intervalu několika desítek sekund k ohřevu na pájecí teplotu. Předním výrobcem je v této oblasti norská firma ELWA, která má patentovaný systém změny frekvence v závislosti na teplotě ohřevu, takže omezuje účinek „skin efektu“ a k ohřevu dochází v celém průřezu současně.

13.6 Bezpečnost a ochrana zdraví při práci

Základní podmínkou pro vytvoření jakostního spoje je nejen čistota pájených ploch, ale i čistota samotného pracoviště, pracovního obleku a rukou dělníka. Protože lidský pot zhoršuje smáčivost pájky je třeba zajistit, aby se ruce očištěných ploch nemohly dotýkat. Při pájení předmětů vyráběných z materiálů zvláště citlivých na nečistoty, jako Ni, Ti, polovodiče a pod. je nutné, aby pracovníci používali čisté, nejlépe bavlněné rukavice. Pracoviště musí mít dostatečné přirozené, nebo umělé větrání a dobré osvětlení.

Pokud se používají tavidla, je nutné dbát pokynů výrobců tavidel. Při pájení ponorem je nutné se chránit osobními ochrannými pomůckami proti rozstříku tekutého kovu z lázně. Na pájení plamenem se vztahují předpisy dle ČSN 05 0610. Na pájení odporem potom norma ČSN 05 0650.

Literatura

- RUŽA, V.: Pájení. SNTL, 1988.
- BEATSON, BROOKER: Pájka metalov (překlad). Mašgiz, 1958.
- LÜDER, E.: Příručka pájení. SNTL, 1958.
- Firemní materiály Ögussa
- Firemní materiály Safina

14. SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ

V současné době lze pozorovat výrazný vzrůst výroby plastů, jejich spotřeby a hlavně průmyslového využití. Původně se tyto materiály spojovaly mechanicky nebo lepením. Ukázalo se však, že v řadě případů jsou tyto spoje nevýhodné a začalo se ve větší míře využívat k jejich spojování technologie svařování. Ne všechny plasty lze spojovat svařováním. Svařují se pouze termoplasty, které splňují požadavky na svařitelnost materiálů. Podstata svařování spočívá ve skutečnosti, že termoplasty působením tepla měknou a přechází v taveninu. V této fázi musí dojít ke stlačení nahřátých ploch, aby došlo k promísení molekul a tím vytvoření spoje. Takto vytvořený spoj se musí pozvolna ochlázovat, aby se získalo nerozebíratelné spojení s poměrně vysokými mechanickými vlastnostmi.

Základními parametry svařování jsou teplota, tlak a čas. Musí se vzájemně sladit s ohledem na chemicko-fyzikální vlastnosti svařovaného materiálu, použitou technologii svařování a pracovní prostředí, aby vznikaly svary pokud možno bez vnitřního pnutí.

Kvalita svarových spojů je ovlivňována vedle svařovacích parametrů také postupem svařování, vlastnostmi materiálu a pracovními podmínkami. Velká tepelná roztažnost plastů vede k poměrně vysokým zbytkovým pnutím a jejich malá tepelná vodivost způsobuje pomalou plastifikaci svarových ploch.

Mezi hlavní vlivy okolního prostředí patří teplota a vlhkost vzduchu, působení slunce, vítr a srážky. Důležitými podmínkami pro dosažení kvalitního svarového spojení jsou dále čistota nástrojů, topných elementů a svarových ploch. Dopad na kvalitu svarového spoje má také konstrukce svarku, volba svarového postupu, geometrie svaru, mechanické zatížení a zejména lidský faktor.

14.1 Materiály a jejich svařitelnost

Vhodnost materiálů ke svařování řeší směrnice DVS 2201, díl 2, která zpracovateli polotovarů z termoplastů určuje orientační přezkoušení, aby se zabránilo záměně a zjistily se případné vlastnosti materiálů způsobené dopravou, zpracováním nebo stárnutím, způsobeným okolními vlivy. Pokud existují pochybnosti o druhu svařovaného materiálu, je nutné provést zkoušky jejich identifikace. Orientačně lze zjistit druh plastu srovnáním hustoty a porovnáním hoření. K přesnému určení polotovaru patří určení tavného indexu, teploty měknutí, teplotní tvarová stálost termoanalytické zkoušky, zkouška tahem a stanovení modulu pružnosti případně rázová zkouška.

Svařitelné jsou pouze termoplasty, avšak zpravidla termoplasty stejného druhu a typu, tj. stejné chemicko-fyzikální struktury. Rozhodujícím kritériem pro svařování je tokové chování materiálu. Obvykle se udává, že termoplasty s velkou molekulovou hmotností (> 1 000 000) se nedají svařovat.

Svařitelnost plastů rozdělujeme na:

- **zaručenou**, kdy spojujeme stejné druhy a typy materiálů se shodným nebo blízkým indexem toku taveniny
- **podmínečnou**, kdy spojujeme stejné druhy materiálů, ale odlišné typy

V podstatě nelze kombinovat při svařování různé typy materiálů, např. PP s PE nebo PVC s PE.

14.2 Metody svařování termoplastů

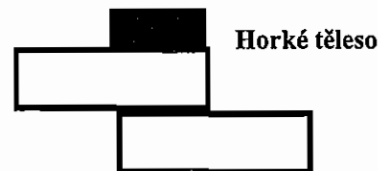
Metody svařování termoplastů rozdělujeme podle způsobu dodávání tepla:

- **Svařování horkým tělesem**, kdy svařované plochy jsou zahřívány horkými tělesy (zrcadly) zpravidla vyhřívanými elektricky. Jejich tvar je přizpůsoben ohřívané ploše nebo svařovaná plocha je ohřívána elektrickou topnou spirálou, navinutou v těle tvarovky. Vlastní svařování může být ruční mechanizované nebo automatizované bez přídavného materiálu. Svařování může být buď **přímé** (obr. 14.1), kdy potřebné svařovací teplo se přenáší bezprostředně na svařové plochy a nebo **nepřímé** (obr. 14.2), kdy horké těleso působí ze strany protilehlé ke svařové ploše.
- **Svařování horkým plynem**, kdy působením horkého plynu (nejčastěji vzduch) se ohřívají svařované plochy do plastického stavu a pod tlakem spojí, případně se svařuje s přídavným materiálem obdobným způsobem jako při svařování kovů.
- **Ostatní metody svařování**, kdy k ohřátí svařových ploch používáme jiných zdrojů jako např. ultrazvuk, tření, infračervený paprsek, laser, vysokofrekvenční ohřev apod.

V tabulce 14.1 jsou potom uvedeny používané metody svařování plastů.



Obr. 14.1 Svařování přímé



Obr. 14.2 Svařování nepřímé

14.3 Svařovací zařízení a registrace parametrů svařování

Konstrukční uspořádání svařovacího stroje musí být přizpůsobeno podmínkám jeho nasazení a vlivům okolí při svařování. Zásady konstrukce a požadavky na svařovací zařízení neřeší žádná česká technická norma a výrobci svařovacích zařízení se řídí převážně německými normami a předpisy. U každého stroje musí být návod k obsluze, který obsahuje charakteristické hodnoty stroje, popisy funkcí, pokyny pro údržbu a tabulky pro svařování (stroje na tupo).

Svařovací parametry a podmínky svařování jsou zachyceny ve svařovacím protokolu, který vyhotoví buď svářeč zápisem do předtištěného protokolu nebo je stroj vybaven zapisovačem a vytiskne přímo tento svařovací protokol.

Tabulka 14.1

Metody svařování plastů		Přídavné materiály	Svařované polotovary
Svařování horkým tělesem (H)	přímé	Na tupo horkým tělesem (HS)	Trubky, desky, profily
		Profilové horkým tělesem (HN)	Desky, profily
		Ohraňováním horkým tělesem (HB)	Desky
		Polyfúzní svařování (HD)	Trubky
		Elektrotvarovkou (HM)	Trubky
		Horkým klínem (HH)	Fólie, profily
		S oddělením svaru (HT)	Fólie a tenké desky
		Bezvýronkové	Trubky
	nepřímé	Impulsní horkým tělesem (HI)	Fólie
		Tepelně kontaktní horkým tělesem (HK)	Fólie
	Kotoučové svařování (HR)	Fólie	
Svařování horkým plynem (W)	Ruční horkým plynem (WF)	drát, tyčinka	Trubky, desky, profily
	Horkým plynem s rychlotryskou (WZ)	drát, tyčinka	Trubky, desky, profily
	Přeplátovací horkým plynem (WU)	bez	Fólie
	Vytlačovací horkým plynem (WE)	drát, granulát	Trubky, desky, profily
Ostatní metody svařování plastů	Vytlačovací sáláním (LE)	drát, granulát	Trubky, desky, profily
	Infračerveným paprskem (IR)		Trubky
	Ultrazvukem (US)		Trubky
	Třecí svařování (FR)		Fólie, desky
	Vysokofrekvenční (HF)		Fólie
	laserem		Fólie

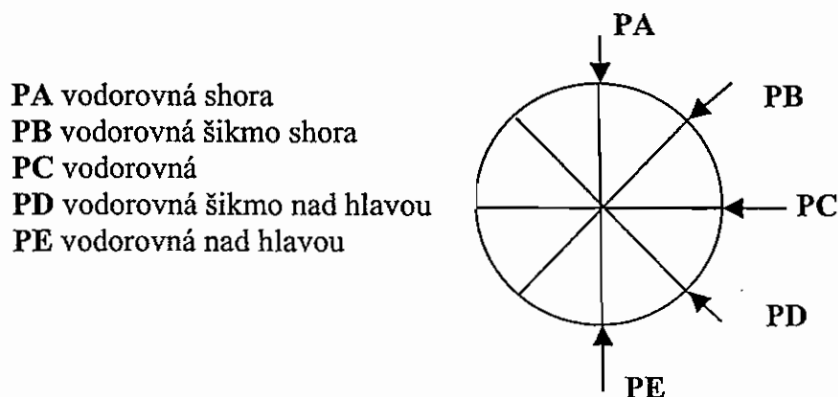
14.4 Značení svaru na výkresech a polohy svařování

Pro správnou přípravu, tvar a provedení svaru je nezbytné značení svaru ve výkresové dokumentaci. Pro značení svarů na výkresech se využívá norma ČSN EN 22553 „Svarové a pájené spoje - Označování na výkresech“. Tato norma podrobně popisuje umístění značek, značky svarů, doplňující a doplňkové značky. Ke každé značce svaru může být přiřazen určitý počet rozměrů, které se na odkazové čáře zapisují tak, že vlevo od značky (tj. před značkou) se uvádí hlavní rozměr svaru (vztahuje se k příčnému řezu svaru) a vpravo od značky (tj. za značkou) se uvádějí rozměry týkající se délky svaru. Pokud je to nutné, mohou se zde uvést i další méně důležité rozměry, jako např. počet stehů, vzdálenost mezi stehy apod. Vzdálenost svaru od kraje dílu se neuvádí.

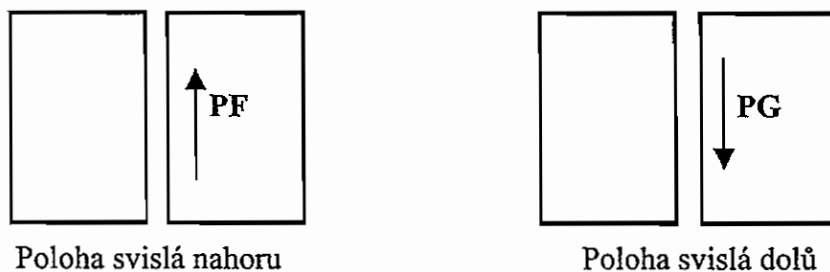
Pokud se týká označování rozměrů svarů, platí zásada, že pokud není za značkou uveden rozměr, je svar proveden v celé délce svařovaných dílů. Pokud není u tupého svarového spoje uvedena jeho velikost, je svar proveden v celé tloušťce svařovaných dílů. U koutových svarů můžeme jejich velikost předepisovat dvěma způsoby. Buď výškou svaru (velikost odvěsny) a potom musíme před údajem označujícím velikost svaru uvést písmeno *z* nebo jeho tloušťku (výšku trojúhelníka) a potom musíme uvést písmeno *a*.

Pro označování poloh svařování byla vypracována mezinárodní norma ČSN EN ISO 6947 "Svařování - Pracovní polohy - Definice úhlů sklonu a otočení". Pro hlavní polohy byly stanoveny symboly, které mohou být jednoduše použity pro daný účel. Tyto symboly byly vybrány nezávisle na již existujících významových zkratkách a to tak, že nebyly odvozeny

z žádného konkrétního jazyka. Hlavní polohy pro tupé i koutové svary jsou uvedeny na obr. 14.3 a obr.14.4.



Obr. 14.3



Obr. 14.4

Aplikace dosud používaných českých pojmenování pro polohy svařování nebyla možná, a proto byla v souladu s překladem této normy zavedena pojmenování nová. Aby se předešlo nedorozuměním je vhodné používat při slovním označení polohy svaru také symboly označení.

14.5 Vady ve svarech a zkoušky svarových spojů

Vady ve svarech rozdělujeme do šesti základních skupin:

- Trhliny
- Dutiny – póry, bubliny, staženiny, skupiny pórů, bublin
- Pevné vměstky
- Chyby v napojení a neprůvary
- Vruby
- Ostatní vady – nedodržení rozměru, poškození svaru teplem

Pro posuzování vad ve svarech u termoplastů není v ČR zavedena žádná norma, která by umožnila obecně platné ohodnocení svarů vzhledem k odstupňovaným požadavkům na jakost a zřetelnou definici chyb. Vyhodnocování vad při svařování určuje německá směrnice DVS 2202, díl 1. Její použití musí být dohodnuto se zákazníkem.

Zkoušky svarových spojů rozdělujeme na destruktivní a nedestruktivní.

Destruktivní zkoušky:

- tahová zkouška (ČSN 05 6821, pr EN 12814 - 1),
- rázová tahová zkouška (ČSN 05 1160, pr EN 12814 – 7),
- zkouška ohybem a ohýbáním (ČSN 05 6822, ČSN 05 6823, pr EN 12814 – 1),
- dlouhodobá tahová zkouška (ČSN 12 1162, pr EN 12814 – 3),
- dlouhodobá zkouška s vnitřním přetlakem (ČSN 05 1161, pr EN 1042).

V přípravě jsou:

- pr EN 12814 – 5 Makroskopická zkouška,
- pr EN 12814 – 6 Tahová zkouška při nízké teplotě,
- pr EN 12814 Slupovací zkouška.

Nedestruktivní zkoušky:

- Vizuální kontrola (EN 13100)
- Zkouška ultrazvukem (nejsou zavedeny samostatné normy, používají se normy pro zkoušky kovů)
- Zkouška prozářením
- Zkouška vysokým elektrickým napětím – jiskrová zkouška
- Zkouška na těsnost

Literatura

Kolektiv autorů: Svařování termoplastů. UNO PRAHA, 2001.
Normy ČSN a EN

15. NAVAŘOVÁNÍ

Oblast navařování zhrnuje využití takových technologických procesů, které vycházejí většinou z běžně užívaných metod svařování. Jsou ovšem přizpůsobeny vhodným způsobem tak, aby výsledkem procesu navaření vznikaly povrchové vrstvy požadovaných vlastností. Převážně se navařováním vytváří u strojních součástí na exponovaných místech či na celém povrchu takové vrstvy, které vykazují zpravidla větší odolnost, nežli má základní materiál. Tím zabezpečují požadované vlastnosti celé konstrukce, jako je odolnost proti korozi, tření, otěru, erozi, kavitaci a podobně. Vlastní tělo součásti či konstrukčního dílu pak může být vyrobeno z běžnějšího materiálu, čímž je dosaženo celkového zlevnění konstrukce. Dále je volbou materiálu základního tělesa s příznivějšími mechanickými vlastnostmi (jak statickými, tak i případně dynamickými), následně vůbec umožněna funkčnost celého navařeného kompletu. Průkazným příkladem zde mohou být především tělesa velkých tlakových nádob s navařenou vnitřní antikorozi výstelkou.

Jako hlavní aplikovatelné metody svařování, které lze upravit či přizpůsobit pro navařovací procesy jsou především ty, které mohou být využitelné jednak jako vhodný zdroj tepla, zabezpečující ohřátí až na teplotu natavení povrchu základního materiálu a současně očištění a udržení čistoty povrchu navařované součásti. Rovněž musí zabezpečit natavení přídavného materiálu, podávaného ať již ve formě drátu, pásky, trubičky, prášku či tyčinky a zajistit jeho přenos až na navařované místo. Někdy se tak děje s velkou kinetickou energií, pak mluvíme o nástřiku, šopování apod. Rámcově lze rozdělit využitelné metody svařování - navařování na plamenové, obloukové, plazmové a ostatní.

15.1 Návary plamenem

Návary prováděné pomocí kyslíkoacetylenového plamene byly zpočátku poměrně velice užívanou a snadno dostupnou metodou navařování. V dnešní době se používají zejména pro navařování menších detailů tvrdými slitinami a materiálů se specifickými požadavky. Hlavní výhodou je dosažitelnost velice tenké návarové vrstvy prakticky bez promíšení se základním materiálem. Navařovaný materiál se přidává buď ve formě tyčinky, anebo prášku. Povrch navařovaného dílu musí být předem pečlivě očištěn a tvarově upraven tak, aby neměl žádné ostré hrany, které by se snadno odtavily a promíchaly s návarovým kovem. Rovněž navařované drážky musí být mělké a také mít hrany dna zaobleny. Navařované díly je vhodné předeřhřát asi na teplotu 400 °C, větší díly i na teplotu ještě vyšší. Plamen se nastavuje na přebytek acetylenu a navařovaný povrch se nahřívá do stavu, až se povrch začne jakoby „potit“ a pak je možné přidávat návarový materiál ve formě drátu, tyčinky či úzkého pásku.

Pro navařování práškem se používá speciálně upravený kyslíkoacetylenový hořák s možností přívodu navařovacího prášku, jehož složení vyplývá z požadovaných vlastností návaru. Zejména firma Castolini nabízí velice rozsáhlé spektrum vhodných typů prášků pro různě požadované provozní podmínky návarů. Kromě prášků dodává i vhodné typy aplikačních hořáků. Firma současně nabízí i rozsáhlý poradenský a konzultační servis, včetně ukázkového navaření zkušebních vzorků.

Výhodou způsobu navařování plamenem je kromě zanedbatelně malého promíšení se základním materiálem i velká variabilita složení navařované vrstvy. Rovněž pořizovací náklady na potřebná zařízení jsou poměrně nízké, zejména u provozů, kde se pracuje běžně s kyslíkoacetylenovými soupravami. Zde je pouze nutné dokoupit příslušné specializované

hořáky. Podstatnou nevýhodou je ale poměrně malá produktivita navařování a při nedodržení technologie může být návar pórovitý. Proto se hlavní oblast užití soustřeďuje převážně na rozličné tvrdonávary typu stelit a jimi se případně provádí navařování dosedacích ploch ventilů, kuželek a pracovních ostří některých nástrojů. Další možné využití je pro opravárenské účely, kdy lze třeba navařením zarovnávat různá opotřebovaná či vydřená místa provozovaných součástí, hřídelí a podobně. Zvláštní oblast využití je tak zvané přesné navařování, kdy je povrch a tvar navařené vrstvy formován přiloženou chladicí podložkou - kokilkou vhodného tvaru. Rovněž příložka, většinou z mědi, musí mít zaoblené všechny hrany, aby nedošlo k jejich natavení a následnému namíchání s návarovým kovem. Nejvhodnější poloha pro navařování všeobecně je vodorovná shora, ale při nastavení vhodných parametrů a dostatečné zručnosti pracovníka je možné navařovat i v jiných polohách.

15.2 Ruční návary elektrodami

Navařování ručně elektrickým obloukem s obalenými elektrodami je určeno rovněž pro vytváření vrstev speciálního určení. Jednak se navařují antikorozi návary i v provedení "silový" návar pro navařování výstupních hrdel a přírub různých tlakových a reaktorových nádob, někde se užívá navařování ve formě "polštářování", zejména u ocelí s horší svařitelností. Dále lze vytvářet také speciální tvrdonávary u mechanicky exponovaných ploch, obdobně jako v předchozí kapitole. Výhodné je navařování relativně malých ploch, případně různě tvarovaných přechodů a prostorově komplikovaných tvarů navařovaných ploch, kdy je nutné navařování realizovat ve všech možných polohách. Jako příklad možno uvést navařování antikorozi výstelky vnitřního povrchu hrdel reaktorových nádob.

Svařovací zařízení jsou tatáž jako pro normální ruční obloukové svařování obalenými elektrodami. Rovněž technika svařování se prakticky neliší od běžného svařování spojů, pouze u antikorozi návary se požaduje svařování úzkými a nízkými housenkami, pokud možno co nejrovnoměrěji. Velké navařované plochy se rozdělí na čtverce, kdy délka jeho strany odpovídá délce housenky, jež lze navařit jednou elektrodou a orientace housenek sousedních čtverců jsou na sebe kolmé. U tvrdonávary je nutné navařovat krátkými housenkami, maximálně 50 mm dlouhými. Důležité je užití předepsaných elektrod, zejména u návary, které je nutné dělat jako dvojrvtvové a víceprůchodové. Zde je důležité dodržovat skladbu housenek tak, aby následující průchody zabezpečily tepelné přepracování základního materiálu nádoby. Jako rozhodující se jeví dosažená tloušťka prvního průchodu (stanovená na příklad metalograficky z rozboru tak zvané klínové zkoušky), jež musí být dosažena přímo navařením, anebo dodatečně upravena opracováním či obroušením. U některých typů návary je nezbytné závěrečné tepelné zpracování navařené celku. Výrobní sortiment světových výrobců elektrod nabízí široké možnosti pro návary vrstev dle různých požadavků od antikorozi, tvrdonavarových, těsnících a oteruvzdorných ploch, jak pro výrobu detailů. Rovněž tak i pro renovaci provozovaných dílů v opravárenství.

15.3 Ruční návary metodou WIG

Použití této metody i pro navařování je prakticky možné, ale jen pomocí ručně přidávaného navařovacího drátu či úzce ustřiženého pásku. Užívá se především u drobných a členitých navařovaných ploch, zejména při opravách lokálního charakteru a v polohách, obdobně jako u předchozí kapitoly navařování plamenem. Promíšení návary se základním materiálem je ale větší a dochází také k celkově většímu tepelnému namáhání okolí.

15.4 Návary automatizované metodou WIG

Pokud se metody WIG používá pro navařování větších ploch, volí se hlavně v automatizované modifikaci, a to s podávaným přídavným navařovacím drátem. Způsob je vhodný zvláště pro opravárenské navařování austenitických nerezavějících výsterek reaktorových nádob a vnitřků potrubí. Jeho vývoj se jeví jako velice perspektivní, především v zautomatizovatelné či robotizované podobě. Pro získání kvalitního a celistvého návaru je pak velice důležité celkové sladění samotného procesu navařování, včetně souvisejících technologických postupů. Od nalezení optimálních svařovacích parametrů, jež musí být dobře sladěny s nastavenou rychlostí podávaného drátu, včetně počáteční prodlevy a přesného místa, kam je do natavené lázně drát přiváděn. Návary mívají středně velké promíchání se základním materiálem.

Pro zvýšení navařovacího výkonu se může u podávaného drátu používat napájení elektrickým proudem tak, aby byl drát předhříván Jouleovým teplem. Tím se urychlí a zrovnoměří jeho odtavování. Přívod drátu a napájení proudem musí být řešeno tak, aby nedocházelo k nepříznivému ovlivňování hoření (foukání) hlavního oblouku. Je možné dokonce paralelně přivádět i dva dráty, rovněž napájené stejnosměrným svařovacím proudem, opět s cílem dále zvyšovat množství navařeného kovu. Velikost napájecích proudů musí být nastavena tak, aby ke vlastnímu tavení přídavného drátu docházelo až přesně v místě okraje natavené svarové lázně.

Správně naladěný proces pak umožňuje provádět navařování i v polohách. To je pak ve zcela zautomatizované či zrobotizované podobě určeno pro dálkové provádění oprav výsterek stěn v nepřístupných prostorách. Jedná se o místa, pro pracovníky obtížně či zcela nepřístupná, ať již z důvodů prostorově nepříznivě stísněných rozměrů (vnitřky potrubí), anebo zamořená radioaktivně či toxicky (reaktory). Robotizovaný manipulátor, dálkově ovládaný pak musí být dovybaven frézovací či brousicí hlavou, která umožňuje provádět úpravy úkosů před navařováním a korekci výsledného tvaru povrchu návaru. Manipulátor by také měl být vybaven nástavci, umožňujícími rovněž dálkově provádět veškeré předepsané nedestruktivní kontroly např. KPM, UZD, vizuální a rozměrovou kontrolu (Dentakrylový odlitek) a případně i další.

15.5 Navařování pod tavidlem - drátem

Metoda využívá elektrického oblouku, hořícího pod vrstvou tavidla, přesněji natavené strusky a vyznačuje se velice stabilním procesem navařování přídavného kovu. Využití je vhodné zejména při navařování nerezavějících vrstev, ať již v provedení návarů silových (napojení tlakově namáhaného potrubí na nátrubek) či návarů antikoročních. Promíchání základního materiálu je zde poměrně velké a hrozí vznikem podnávarových trhlin. Exponované výstelky navařované zejména u reaktorových nádob se řeší většinou jako dvojevrstevové, kdy první průchodová vrstva musí být navařena pouze takovými parametry, aby následující průchod tepelně přepracoval základní materiál pod předchozími průchody.

Navařování se provádí převážně ve vodorovné poloze shora, a to u ploch, které jsou poměrně větších rozměrů a geometricky málo či příznivě členité. Pak je umožněno strojní vedení navařovacího procesu buď na kladkových polohovadlech, rotujících kroužcích či válcových sekcích nádob, anebo podélným lineárním unášením navařovací hlavy podtavidlového automatu. Pro lineární posuv se užívá buď traktor, pojíždějící na kolejkách či na příčnicku, anebo portálem nebo výložníkem. Při navařování s přídavným drátem je nutno

počítat s nerovnoměrnějším formováním navařeného povrchu a také s dosahováním nerovnoměrných hloubek průvarů jednotlivých housenek, zejména u prvních průchodů.

Při vhodné úpravě navařovací hubice a doplněním přídatného korýtka držícího nasýpané tavidlo je možné navařovat povrch vodorovnými housenkami i na kolmé stěně. Zde je velmi důležité sladění všech svařovacích parametrů i nalezení vhodného úhlu sklonu podávaného drátu a určitého zácviku obsluhy. Dokonce tak lze tímto způsobem navařovat i vnitřní či vnější povrchy válcových nátrubků. Navařovací automat musí být přítom přesně unášen po kruhové, koncentrické dráze.

15.6 Navařování pod tavidlem - páskou

Při obdobné metodě navařování, rovněž pod vrstvou tavidla, avšak páskou namísto drátu, lze dosáhnout podstatně větší rovnoměrnosti povrchu návaru i s poněkud menším promíšením návarového kovu se základním materiálem. Pro navařování páskou je možné využití shodného zařízení podtavidlového automatu, pouze dodatečně vybaveného hubicí, speciálně upravenou pro vedení podávané navařovací pásky. (V podniku ŠKODA a.s. jsou výborné, dlouholetou praxí ověřené zkušenosti s podtavidlovými automaty od firmy ESAB). Obvykle se pro antikorozi návary užívá pásky široké 60 mm. Pro obvodové plochy o menší šířce, anebo pro potřebu doplnění zbývající potřebné šířky návaru je určena páska široká 20 mm. Navařování se provádí rovněž ve vodorovné poloze shora a to převážně u ploch, které jsou poměrně větších rozměrů a geometricky málo členité, obdobně jako v předchozí kapitole 15.5. Pak je splnitelná podmínka, aby relativní pohyb navařovací hlavy oproti navařovanému povrchu byl rovnoměrný, ať již lineární či otáčivý, což umožňuje strojní vedení navařovacího procesu. Jedná se zpravidla o kroužky či sekce válcových nádob, rotujících na polohovadlech. Podélné návary jsou pak prováděny buď traktorem, pojíždějícím na kolejkách, nebo na závěsné dráze. Navařovací automat může být rovněž unášen portálem či výložníkem.

Antikorozi návary tlakových nádob se provádí většinou jako vícevrstvé a platí pro ně obdobná pravidla jako v předcházející kapitole. Rovněž zde je nebezpečí vzniku podnávarových trhlin a vůbec celá problematika navařování je velice široká a mnohooborová disciplína.

15.7 Navařování pod tavidlem – dvěma páskami

Snaha o další zproduktivnění procesu navařování, zejména úsilí vytvořit návar o tak dostatečné tloušťce, aby nebylo nutné jej navařovat dvouprůchodově, vedly k vývoji procesu podtavidlového navařování dvěma paralelně podávanými páskami. Rovněž pro toto uspořádání se využívá shodného podtavidlového automatu, ovšem vybaveného hubicí, jež je speciálně upravena pro rovnoběžné podávání dvou navařovacích pásek. Obvykle se užívají pásky široké 60 mm, obdobně jako v předcházející kapitole 15.6 a hlavním cílem tohoto uspořádání je podstatné zvětšení množství navařeného kovu za jednotku času.

Navařování se provádí také v poloze vodorovné shora, a to převážně u rozměrnějších těles a u ploch, které mají poměrně větší rozměry. Povrchy musí být i geometricky málo členitými, aby relativně velká lázeň svarového kovu nepřetékala a na okrajích netvořila přelité neprůvary. K běžným svařovacím parametrům a jejich vzájemnému sladění zde přistupuje další, jímž je pevně nastavená vzdálenost obou konců podávaných pásek. Při dosažení určitého množství nataveného tavidla a tím vzniku dostatečně velké vrstvy natavené strusky

může přecházet obloukový proces na elektrostruskový. Technická, technologická i materiálová problematika je ale zde poměrně složitější a je předmětem dalšího vývoje.

15.8 Ruční návary metodou MIG – MAG

Využití této metody pro navařování umožňuje velký pokrok ve vývoji moderních zdrojů a zařízení pro svařování metodou MIG – MAG, které mají modulovaný přenos svarového kovu, dokonce i programovatelný vlastní proces svařování. Tato zařízení jsou pak využitelná i pro navařování. Dále se příznivě uplatňují nově vyvinuté typy přídavných drátů, včetně trubičkových. Ty otevírají další škálu možností v oblasti navařovacích možností. Trubičkový drát totiž obsahuje uvnitř sbaleného pláště tvořeného přídavným kovem tavidlovou náplň, zabezpečující lepší hoření oblouku, současně zabezpečuje i lepší ochranu nataveného kovu a jeho případné dolegování.

Proces svařování, respektive navařování, rovněž podstatně ovlivňuje dosavadní výrazný vývoj ve výzkumu působení a využívání různého složení směsných plynů, které jsou dnes již dodávány přímo dle potřeby odběratelů. Mají dlouhodobými zkouškami zjištěné optimální složení a to je plněním zaručené. To pak umožňuje dále kladně ovlivňovat vlastnosti navařeného kovu, současně dosahovat co největší stability obloukového procesu a co nejhomogennější vrstvy navařeného kovu, bez vzniku bublin, pórů a jiných necelistvostí. Vzhledem k poměrně velkému množství nataveného kovu je v ruční aplikaci pro navařování využíváno této metody spíše pro menší, členité plochy. Pro náročnější detaily a větší plochy je vhodné strojní vedení navařovacího hořáku, případně je nutné jím manipulovat robotizovanou rukou. Nejzavedenějšími značkami pro podmínky v naší republice jsou svářečky od firem KEMPPI, LINCOLN, FRONIUS a další.

15.9 Návary automatové metodou MIG – MAG

Zařízení určená pro obdobnou automatovou variantu, lépe řečeno pro strojně manipulovanou, jsou totožná se zařízeními na ruční svařování či navařování, popsaná v předchozí kapitole 15.8. Strojní manipulace s koncovou hubicí hořáku umožňuje, ale navíc dosažení rovnoměrného formování navařované housenky a dodržet její požadované rozměry. To je důležité pro pravidelnou skladbu housenek hlavně při svařování či navařování v opravárenství a navařování tvarově komplikovaných a ohraničeně lokalizovaných vrstev. Při vhodném nastavení úhlu hubicí podávaného drátu a sladění nejvhodnějších parametrů je možné navařovat i vodorovně na svislé stěně. Dokonce lze realizovat i skládání housenek v poloze šikmo nad hlavou. Pro dosažení kvalitního a celistvého návaru je zde rozhodující úprava parametrů pro závěrnou housenku. Jejím položení musí předcházet i správná volba navařovacích parametrů a pravidelná skladba housenek předcházejících. Velkou roli zde může hrát rovněž volba užitého směsného plynu.

15.10 Návary plazmou s přídavným drátem

Plazmový oblouk, označovaný jako stabilizovaný a působící jako koncentrovaný zdroj energie je základem a perspektivou mnoha nadějných aplikací nových způsobů navařování, ať již ve výrobě či opravárenství. Plazmové zařízení musí být na bázi netavicí se wolframové elektrody a pracovním médiem hlavního plazmového oblouku musí být argon, případně s heliem anebo vodíkem. Pracují buď v režimu závislého, anebo nezávislého plazmového oblouku. Dosažení požadovaných vlastností u návaru ulehčuje možnost oddělení působení plazmového oblouku a proudem napájeného drátu. Tím lze jemně doregulovat

množství nataveného návarového kovu, ale i jeho formování a dosažení hloubky natavení, a tím i poměru namíchání se základním materiálem. Drát je podáván buď přímo do plazmového sloupce pod určitým úhlem, anebo dotykově až k okraji lázně nataveného kovu. (Podobně jako v kapitole 15.4 u metody WIG). Podáváný drát může být rovněž napájen z nezávislého zdroje a jeho přívod je pak konstrukčně řešen různě výrobcí daného zařízení. Dokonce je uváděno plazmové navařovací zařízení, se dvěma a ze dvou stran přiváděnými přídatnými dráty.

15.11 Návary plazmou s přídatným práškem

Rovněž u této aplikace je plazmový oblouk stabilizovaný a působí jako koncentrovaný zdroj energie jako u předchozí aplikace v kapitole 15.10. Přídatný materiál je zde přiváděn buď působením gravitace (s podporou vibrační soustavy), anebo unášen přiváděným plynovým mediem, které slouží jako pracovní a zároveň ochranný plyn. Vhodný návarový prášek je tedy přiváděn přímo do plazmového oblouku. Proces je velmi často nazýván jako „plazmové stříkání“. Výrobci je nabízen velký soubor různých navařovacích prášků, včetně nekovových pro navařování nových typů vrstev, ať již ve výrobě či opravárenství. Vysoká teplota plazmového sloupce je především vhodná pro nanášení vysokotavitelných materiálů, včetně oxidů, karbidů, nitridů, boridů a dalších. Dosažení požadovaných vlastností u návarů ulehčuje možnost volby působení intenzity plazmového oblouku, dále volby druhu směsného plynu dopravujícího prášek a určujícího jeho výstupní rychlosti z hořáku, která pak následně způsobuje zvyšování kinetické energie letících částic nataveného prášku. Tím lze jemně doregulovat nejen množství nataveného návarového kovu, ale i jeho formování, hutnost a velikosti přilnutí k navařovanému povrchu. Konstrukční uspořádání plazmového navařovacího hořáku je řešeno různě jednotlivými výrobcí zařízení. Pro navařování či stříkání povlaků na elektricky nevodivé materiály se používá plazmový nezávislý oblouk. Ochranu prášku před oxidací zabezpečuje provádění nástřiků v komoře s ochranným plynem. Částečně pomáhá i zvýšená rychlost média unášející natavené částičky navařovacího prášku a jejich přívod do míst co nejbliže k nastříkávanému povrchu.

15.12 Návary automatové metodu plazma – MIG

Metoda navařování, která kombinuje působení plazmového oblouku s metodou MIG byla patentována asi před dvaceti lety firmou PHILIPS. Plazmový sloupec, označovaný jako stabilizovaný a působící jako koncentrovaný zdroj energie, má středem vedený a velkou rychlostí podáváný přídatný drát. Ten je napájený ze zdroje, běžného pro metodu MIG se shodnými voltampérovými charakteristikami, jak statickými, tak dynamickými. Kombinací způsobů plazma – MIG je dosahováno mimořádných efektů, kdy vzájemné ovlivňování určuje základní chování celého procesu. Oddělenou regulací plazmového procesu a procesu MIG a následným superponováním obou těchto vlivů, dochází k rotování sloupce natavených kapiček návarového kovu, který vychází ve formě spirály z konce podáváného drátu (potvrzeno snímáním časovou lupou). Tato konfigurace oblouku pak navařuje podáváný přídatný materiál v poměrně široce formované housence. Ta se pak může vyznačovat minimálním stupněm natavení, a tím i s minimálním promíšením se základním materiálem. Dosažení vyššího protavení je naopak snadno dosažitelné při zvýšení výkonu působení plazmy a snížení rychlosti přívodu napájeného drátu, ale současně i zvýšením proudu u MIG procesu. Tato kombinace je možná, díky oddělení obou procesů. Metoda navařování způsobem plazma – MIG je velice produktivní a množství navařeného kovu může dosahovat až 20 kg za hodinu, dle údajů výrobce. Jeho dosažení však vyžaduje náročné osvojení metody a doplnění o různé pomocné přípravky.

15.13 Elektrovibrační svařování

Způsob elektrovibračního navařování je založen na působení podávaného přídavného drátu, napájeného navařovacím proudem a přitom neustále kmitajícího. Během každého dotyku podávaného drátu s povrchem základního materiálu dojde ke zkratu. Při jeho odtrhnutí vzniká krátký elektrický oblouk, doprovázený malým přenosem nataveného přídavného materiálu. Ochranu nataveného kovu zabezpečuje inertní plyn, může však být použita i vhodná kapalina. S výhodou je pak tato metoda použitelná při renovaci opotřebených válců, kdy je nutný minimální ohřev celého navařovaného dílu.

15.14 Plátování výbuchem

Využití způsobu svařování výbuchem, popsaného v kapitole 9.3.1 se hlavně využívá pro výrobu plátovaných bimetalových plechů. Vzhledem k užití metodě, kdy není vytvářen tavný návar, ale je využíváno plastických vlastností materiálů, je možné plátování i velice netradičních materiálů, které by byly jinak obtížně proveditelné. Metoda je použitelná pouze na pracovištích se statutem práce s výbušninami.

15.15 Navařování difuzní

Tento způsob navařování je uskutečňován během difuzního pronikání atomů z mřížek povrchových krystalů jednoho kovu do mřížek kovu druhého v místě styku, obdobně jako u způsobu difuzního svařování, popsaného v kapitole 9.2.1. Použitelné je zejména u přivařování destiček či tvarovaných detailů z materiálů, odlišných strukturních bází a mimořádných vlastností. Pro difuzní navařování je rovněž nutné co nejpřesnější opracování stykových ploch, jejich důkladné očištění od veškerých nečistot a mastnot a přitlačení obou komponent dostatečnou silou (cca 1 MPa). Difuzní proces ve vakuu se pak urychlí zahřáním na teplotu zhruba 3/4 teploty tavení (u navařování heterogenních materiálů teplotu určuje materiál s nižší teplotou tavení). Tato metoda se uplatňuje zejména tam, kde by tavné svařování nepřicházelo v úvahu vůbec pro vznikající tvrdé a velice křehké intermetalické fáze. Jedná se především o možnost navařování různých sintrovaných materiálů, dokonce i keramických prvků v leteckém či kosmickém průmyslu.

Závěr

Praktické možnosti navařování jakýchkoliv vrstev jsou velice široké a pro běžné potřeby je možné uvažovat hlavně s metodami ručními (plamenem, elektrodou, WIG, podtavidlové páskou a do určité míry i MIG). Ostatní metody, zejména automatizované vyžadují velký objem osvojovacích prací, anebo drahý nákup této technologie kompletně i se zařízením. V literatuře popsané nadějně metody, někdy i ukázkově předváděné na výstavách, přinášejí často při provozním průmyslovém nasazení řadu obtíží. Někdy i nepřekonatelných.

Literatura

TURŇA, M.: Špeciálne metódy zvarania. ALFA Bratislava, 1989.
Firemní literatura

Poznámky:

DÍL III

SVAŘOVANÉ KONSTRUKCE A JEJICH NAVRHOVÁNÍ

Autor: Prof. Ing. Rudolf Kovařík, CSc.
Recenzent: Doc. Ing. Stanislav Vejvoda, CSc.

SVAROVANÉ KONSTRUKCE A JEJICH NAVRHOVÁNÍ

Úvod

V průběhu let se svařování stalo nejdůležitějším způsobem spojování při výrobě zařízení a konstrukcí v mnoha průmyslových odvětvích. Při návrhu svařovaných konstrukcí se dimenzují rozměry nosných průřezů konstrukcí a volí se jejich materiály tak, aby byla zaručena správná funkce a bezpečnost provozu konstrukčních prvků a celé svařované konstrukce po celou dobu její požadované životnosti. Tato podmínka je zajišťována při vzájemné spolupráci konstruktéra, svařovacího technologa a materiálového inženýra. Provozní funkce svařované konstrukce určuje nejen rozměry a tvar konstrukce, ale rozhoduje o použitých materiálech, technologii a i o výrobních nákladech na konstrukci. Pro návrh svařované konstrukce má zásadní důležitost druh a velikost zatížení, průběhy napětí a deformací, provozní teplota a pracovní prostředí.

Východiskem pro návrh materiálu svařované konstrukce jsou výrazná R_e nebo smluvní R_p 0,2 mez kluzu či mez pevnosti R_m . Při záporných teplotách je nutno navíc přihlídnout ke kritériu přechodové (tranzitní) teploty TT a zajistit, aby byla svařená konstrukce provozována při teplotě nad TT s dostatečnou rezervou proti vzniku křehkého lomu. Materiál v tomto případě musí mít potřebnou lomovou houževnatost K_{IC} . Při zvýšených teplotách se musí uvažovat vliv tečení (creep) a materiál se navrhuje vzhledem k dovolenému namáhání podle meze tečení R_T nebo podle meze pevnosti při tečení R_{mT} . Životnost svařené konstrukce namáhané časově proměnlivým napětím je daná zejména mezi únavy σ_C , stavem napjatosti a součinitelem proměnlivosti cyklu r . Při návrhu svařované konstrukce je nutno uvažovat s tepelně-deformačním cyklem svařování, který může ovlivnit strukturu a tudíž pozměnit vlastnosti v teplem ovlivněné oblasti svarového spoje (TOO). Nezanedbatelný je i vliv deformací a vnitřních pnutí ve svařené konstrukci.

Při návrhu svařované konstrukce je mnohdy nutno v rámci prováděné technologičnosti svařovaných konstrukcí řešit i protichůdné požadavky konstruktéra, svařovacího technologa a materiálového inženýra. Základní zásadou při návrhu svařované konstrukce by mělo být: **navrhovat vždy tak bezpečně, jak je nutno, ale tak hospodárně, jak je možno.**

1. ZÁKLADY NAUKY O PRUŽNOSTI A PEVNOSTI

Úlohou nauky o pružnosti je určit napjatost a přetvoření (deformaci) ideálně pružných těles vlivem působení účinků vnějších sil a momentů nebo teplotních změn. Ideálně pružné těleso se po odstranění příčin změn tvaru a napjatosti vrátí do původního nedeformovaného stavu a do stavu původní napjatosti. **Nauka o pevnosti** umožňuje stanovit přípustné limitní hodnoty napjatosti a přetvoření pro správnou funkci konstrukce. **Nauka o pružnosti a pevnosti** umožňuje na základě znalosti působících sil a vlastností použitých materiálů dimenzovat průřezy konstrukcí a svarových spojů. Umožňuje vytvořit konstrukční návrh s optimálními tvary a rozměry při respektování požadavků na bezpečnost provozu, životnost a cenu konstrukce. Hlavními pojmy v nauce o pružnosti a pevnosti jsou napětí a deformace od působení vnějších sil a momentů.

1.1 Základní pojmy

- **Vnější síly** jsou síly, které působí na těleso z vnějšku (zatížení tahem, tlak větru apod.) nebo jsou způsobeny hmotou tělesa (gravitace, síly odstředivé apod.). Povrchové osamělé vnější síly působí v bodech (osamělé břemeno na nosníku, reakce v podporách nosníku apod.), spojitě zatížení je rozloženo po celém povrchu tělesa (např. tlak v nádobě). Síly objemové působí v celém objemu tělesa (nejčastěji je to vlastní hmotnost tělesa). Vnější zatěžující síly se projeví buď jako **zatížení statické**, při kterém je napětí v tělese stálé či rostoucí zvolna do maxima a dále se s časem nemění nebo jako **zatížení dynamické**, při kterém se u většiny konstrukcí hodnota působícího napětí mění buď pravidelně, cyklicky nebo nepravidelně, stochasticky. Zvláštním případem dynamického zatížení je **zatížení rázy**, při kterém dochází k velkým okamžitým zrychlením a k několikanásobnému zvětšení napětí.
- **Vnitřní síly** vznikají účinkem vnějších sil a momentů. Jsou to síly, které brání deformaci, tj. změně tvaru a rozměrů tělesa. Ke zjištění účinku vnějších sil na deformované těleso se v nauce o pružnosti a pevnosti používá tzv. metoda řezu. Spočívá v tom, že se těleso myšleným řezem rozdělí na dvě části a účinek odříznuté části se nahradí vnitřními silami. Vnitřní síly působící na odříznutou část musí být v rovnováze s vnějšími silami působícími na tuto část. Každá akce vyvolává reakci stejné velikosti, ale opačné orientace.
- **Deformace** vzniká účinkem vnějších sil na těleso. Např. při deformování malé krychle dojde v zásadě ke změně délky jejích stran (prodloužení nebo zkrácení) a ke změně pravých úhlů krychle (zkos). V prvním případě se jednalo o **deformaci délkovou**, ve druhém případě o **deformaci tvarovou**. Tyč neproměnného průřezu o původní délce L_0 změní po zatížení na volném konci silou F délku na hodnotu L . Rozdíl konečné a původní délky se nazývá **absolutní prodloužení** ΔL ,

$$\Delta L = L - L_0 \quad (\text{mm}) \quad (1.1)$$

Relativní prodloužení ε je poměr velikosti změny délky k délce původní

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \text{ resp. } \varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1.2)$$

- **Napětí** je vnitřní síla působící na jednotku plochy. V případě, že je napětí rovnoměrně rozloženo po průřezu S , je možno podle orientace složek síly F působící na plochu průřezu S rozlišit

$$\text{normálové napětí} \quad \sigma = \frac{F_n}{S} \quad \left(\frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right) \quad (1.3)$$

$$\text{smykové napětí} \quad \tau = \frac{F_t}{S} \quad \left(\frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right) \quad (1.4)$$

F_n složka síly F (N) kolmá na průřez S (mm^2)

F_t složka síly F (N) ležící v průřezu S (mm^2)

Normálové a smykové napětí charakterizují intenzitu vnitřních sil vztaženou na jednotku plochy. Vyjadřují odpor, který materiál klade vnějším silám, deformujícím těleso. Mezi zatížením, deformací a materiálem platí až po určitou mez (mez úměrnosti v diagramu statické zkoušky tahem) základní zákon nauky o pružnosti a pevnosti (**Hookův zákon**):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{MPa}) \quad (1.5)$$

σ napětí (MPa)

ε poměrná deformace

E ... modul pružnosti v tahu (MPa).

Modul pružnosti je materiálovou konstantou. Pro ocel je $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa, nad teplotou 100 °C prudce klesá. U uhlíkových ocelí E mírně klesá s rostoucím obsahem uhlíku (cementit má nižší E než ferit).

- **Napjatost** je stav v tělese, způsobený souhrnem napětí, vyvolaných všemi silami, které na těleso působí. Obecně se rozlišuje napjatost jednoosá (přímková), dvojosá (rovinná), trojosá (prostorová). Vlivu trojosé napjatosti je těleso podrobeno v případě, že jsou tři složky hlavního napětí (ve směru osy x, y, z) nenulové. V případě, že je jedna ze tří složek hlavního napětí nulová, je těleso podrobeno stavu rovinné napjatosti. Když je jedna ze složek hlavní deformace rovna nule, jedná se o stav rovinné deformace.

1.2 Chování kovů při zatěžování

Mezi základní druhy zatěžování patří namáhání tahem a tlakem, namáhání jednoduchým smykem, namáhání ohybem a namáhání krutem. V praxi může dojít k složenému namáhání, kdy současně na konstrukci působí alespoň dva uvedené druhy namáhání (tah a ohyb, smyk a krut, ohyb a krut, aj.). Složená namáhání se řeší tak, že se rozdělí na základní druhy namáhání, pro která se určí průběh napětí a deformací. Z dílčích napětí a deformací se pak zjišťuje výsledné napětí nebo výsledná deformace. V tabulce 1.1 jsou uvedeny charakteristické veličiny základního namáhání.

Tab. 1.1 Charakteristické veličiny základního namáhání

Druh zatížení	Tah, tlak	Jednoduchý smyk	Ohyb	Krut
Působí při zatížení	F	F	M_o	M_k
Druh napětí	σ	τ	σ	τ
Velikost napětí	F/S	F/S	M_o/W_o	M_k/W_k

F síla (N)

M_o ... ohybový moment (Nmm)

M_k ... kroutící moment (Nmm)

S plocha průřezu (mm^2)

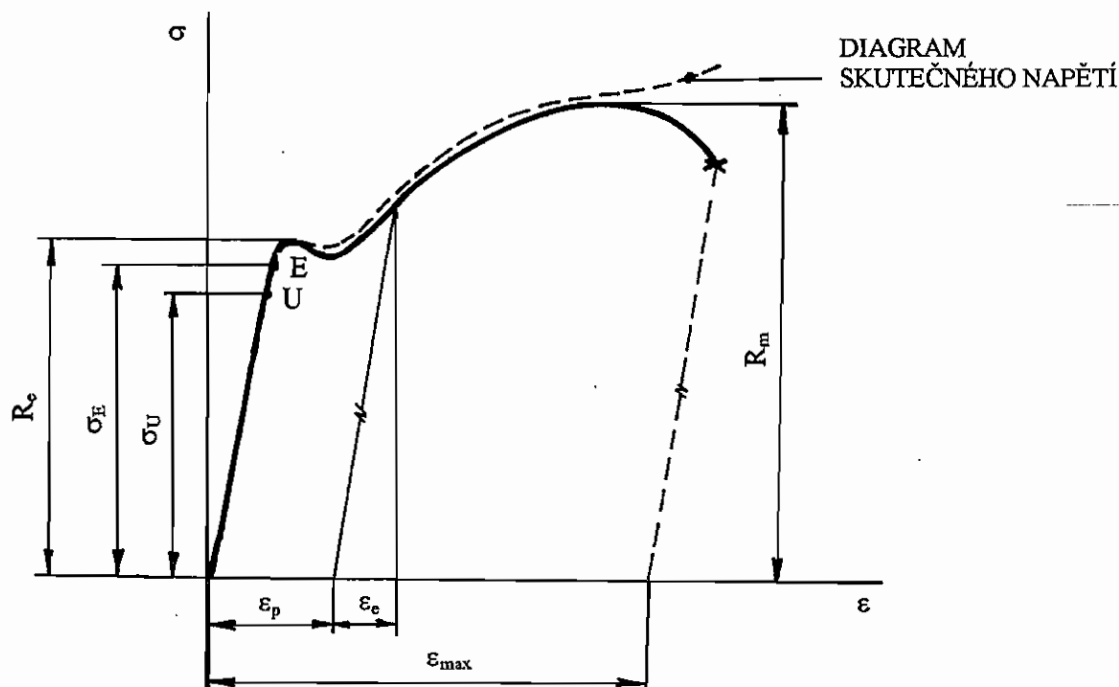
W_o ... průřezový modul v ohybu (mm^3)

W_k ... průřezový modul v krutu (mm^3)

- **Namáhání tahem a tlakem**

Přímá tyč je namáhána čistým tahem (tlakem) tehdy, působí-li tahová (tlaková) síla v těžištní ose tyče kolmo k jejímu příčnému průřezu. V jiném případě se projeví vliv ohybu. Působení sil a napětí tahových (označují se +) a tlakových (-) na tyč není

rovnocenné. Při jistých podmínkách zatěžování může na rozdíl od tahu při namáhání tlakem dojít k vybočení tyče, ke ztrátě její stability. Při **zkoušce tahem** podle [1] se plynule (tj. staticky) zatěžuje zkušební tyč normovaného průřezu až do přetržení. Odezvou materiálu na toto silové působení při jednoosé napjatosti je napět'ově deformační charakteristika, tzv. diagram zkoušky tahem. Je uváděn buď v souřadnicích $F-\Delta L$, nebo v souřadnicích $\sigma-\varepsilon$. Příklad tahového diagramu je uveden na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Tahový diagram měkké oceli

V tahovém diagramu se definuje buď smluvní napětí

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (MPa) \quad (1.6)$$

F ... působící síla (N)

S_0 ... velikost počátečního průřezu tyče (mm^2)

nebo skutečné napětí v každém okamžiku zkoušky

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (MPa) \quad (1.7)$$

S ... velikost okamžitého průřezu tyče (mm^2)

Prvá část pracovního diagramu, kde je závislost napětí na deformaci lineární, odpovídá elastickým (vratným, pružným) deformacím. Zde platí Hookův zákon. **Mez kluzu** je napětí na úrovni počátku makroskopické plastické (nevratné, trvalé) deformace. U materiálů s výrazným zlomem na diagramu se definuje výrazná mez kluzu R_e , u houževnatých materiálů smluvní mez kluzu $R_p 0,2$, která se stanovuje z 0,2 % trvalé plastické deformace. **Mez pevnosti** R_m je maximum napětí na diagramu. Po překročení R_m se začne výrazně zužovat průřez tyče a dojde k jejímu přetržení. Koncovým bodem diagramu, ve kterém dochází k lomu zkušební tyče, je určena **tažnost A**

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1.8)$$

L_u ... délka tyče po přetržení (mm)

a kontrakce Z

$$Z = \frac{S_u - S_o}{S_o} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1.9)$$

S_u ... velikost průřezu tyče po přetržení (mm^2)

U uhlíkových ocelí se s rostoucím procentem uhlíku zvyšuje mez pevnosti a mez kluzu, ale klesá tažnost. Čím je ocel kvalitnější, tím má vyšší poměr meze kluzu k mezi pevnosti (bývá do 0,85 i více). S nárůstem pevnosti oceli zejména nad cca 500 MPa klesá její tažnost a roste nebezpečí vzniku trhlin při svařování. Např. ocel S 235 má $A \cong 25 \%$, S 355 má $A \cong 22 \%$, S 690 má $A \cong 14 \%$, S 960 má $A \cong 12 \%$. Při dynamickém namáhání se navíc projeví skutečnost, že vyšší pevnost oceli neposkytuje vyšší dovolené napětí, nežli ocel o nižší pevnosti. Příčinou je vyšší citlivost na vruby u pevnějších ocelí. Proto při dynamickém namáhání nelze uvažovat vyšší dovolené napětí např. u oceli S 355 než u oceli S 235. Podle velikosti tažnosti a kontrakce se usuzuje na plastické vlastnosti. Pro houževnatý materiál je charakteristická velká tažnost a velká kontrakce.

Pozn.: Houževnatost jako mechanická vlastnost se zjišťuje zkouškou rázem v ohybu (vrubová houževnatost) podle [2] a zkouškou lomové houževnatosti (lomová houževnatost) podle [3, 14].

Zkouška tahem svarových spojů se provádí podle norem [4, 13].

Dlouhodobé zatěžování oceli v rozsahu teplot cca $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ až $250 \text{ }^\circ\text{C}$ nemá vliv na tvar tahového diagramu získaného při krátkodobém zatěžování podle [1].

Pro navrhování svařovaných konstrukcí je důležitý následující závěr: Prodloužení ΔL je nepřímo úměrné modulu pružnosti v tahu E. Proto čím bude větší E, tím bude menší deformace (např. prodloužení, průhyb) při stejném zatížení. Vzhledem k tomu, že je modul E pro všechny konstrukční oceli prakticky stejný, není možné deformaci zmenšit volbou kvalitnější tj. dražší oceli, ale zvětšením tuhosti ocelové konstrukce, např. zvětšením kvadratického momentu průřezu.

- **Dovolené napětí v tahu a smyku**

Při návrhu konstrukce je nutno zabránit nejen porušení konstrukce lomem, ale je nutno zabránit jakékoli její trvalé deformaci. Pro konstrukční materiály se proto stanovují dovolená napětí v tahu a smyku, která při uvažování jisté míry bezpečnosti zaručí, že konstrukce bude při provozu namáhána v pružné oblasti diagramu tahové zkoušky. Dovolené napětí v tahu se u staticky namáhaných houževnatých materiálů počítá z meze kluzu, u křehkých materiálů z meze pevnosti. Pro dovolené napětí v tahu σ_D platí:

$$\sigma_D = \frac{R_e}{n} \quad (\text{MPa}) \quad \text{či} \quad \sigma_D = \frac{R_m}{n} \quad (1.10)$$

n ... součinitel bezpečnosti

Pro svarové spoje se podle normy [5] dovolené napětí svarového spoje v tahu σ_{Dsv} určí pomocí vztahu:

$$\sigma_{Dsv} = \alpha \cdot \frac{R_e}{n}$$

α ... převodní součinitel svarového spoje ($\alpha = 0,65$ až $1,0$ viz [5])

n ... součinitel bezpečnosti. Zpravidla se volí při statickém zatížení $n = 1,5$, při dynamickém zatížení $n = 1,5$ až 3 .

Podle obdobných zásad se stanovuje pro namáhání smykem, ohybem nebo krutem **dovolené napětí ve smyku** τ_D , resp. τ_{Dsv} . V případě konstrukcí zatěžovaných dynamicky je hodnota dovoleného napětí menší. Hodnoty dovolených napětí udávají normy výrobku.

Pro kontrolu napjatosti materiálu při složeném namáhání se používají předpoklady (hypotézy), podle kterých je nebezpečný stav obecné napjatosti porovnáván s nebezpečným stavem při jednoosé napjatosti. Stanovuje se při tom tzv. srovnávací napětí. Např. podle hypotézy HMM [9, 10] je srovnávací napětí σ_v :

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_D \quad (1.11)$$

σ ... napětí v tahu (MPa)

τ ... napětí ve smyku (MPa)

σ_D ... dovolené napětí v tahu (MPa)

- **Namáhání jednoduchým smykem**

Tento případ namáhání se vyskytuje pouze u přesného stříhání materiálu. V praxi se uvažuje např. při výpočtech svarů u příhradových konstrukcí, kde rameno dvojice sil je relativně malé a prakticky nedochází k ohybu. V ostatních případech jde o **smyk doprovázený ohybem**. Platí Hookův zákon pro smyk, podle kterého smykové napětí τ je rovno

$$\tau = \gamma \cdot G \quad (\text{MPa}) \quad (1.12)$$

γ ... poměrné posunutí

G ... modul pružnosti ve smyku (MPa). Pro ocel $G = 0,38 E$.

Pro výpočet napětí τ při namáhání smykem platí vztah:

$$\tau = \frac{F_t}{S} \leq \tau_D \quad (\text{MPa}) \quad (1.13)$$

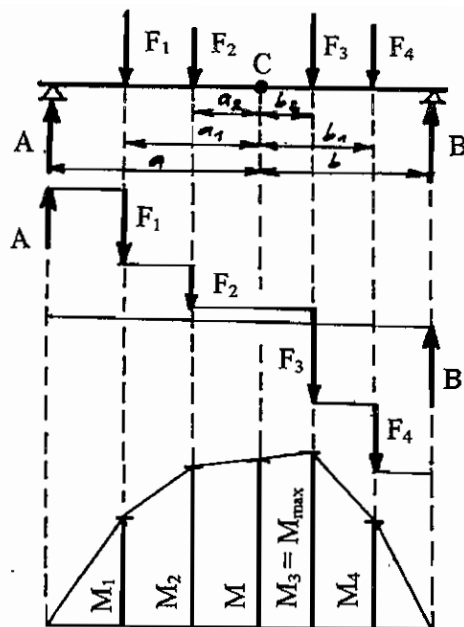
F_t ... složka síly F (N) ležící v průřezu S (mm^2)

S ... plocha průřezu (mm^2)

τ_D ... dovolené napětí ve smyku (MPa)

- **Namáhání ohybem**

S tímto namáháním se nejčastěji setkáme např. u nosníku na dvou podporách, který je zatížen osamělými silami podle obr. 1.2.



Obr. 1.2 Řešení nosníku na dvou podporách

Vnější síly F_1 až F_4 mají za následek průhyb nosníku a vyvolají uvnitř nosníku vnitřní síly a momenty, které představují odpor materiálu proti deformaci. Při návrhu nosníku je nutno vyřešit jeho rozměry tak, aby vzniklá napětí i deformace byly v přípustných mezích.

Postupuje se takto:

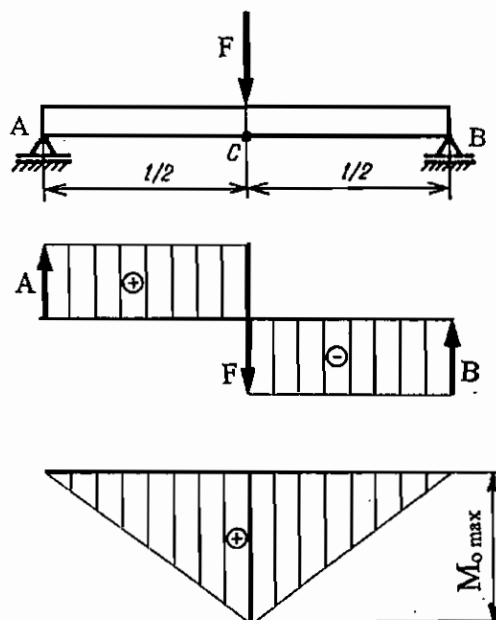
Vede se řez v místě, kde chceme řešit vnitřní síly, momenty nebo napětí. Např. v místě C. Odstraní se část nosníku a do řezu C se přeloží všechny vnější síly po levé straně řezu, tj. reakce A, a síly F_1 , F_2 . K těmto silám se musí přidat dvojice sil s momenty: $A \cdot a$, $F_1 \cdot a_1$, $F_2 \cdot a_2$. Přeložené síly dají v řezu C výslednici F_0 , která se nazývá **příčná posouvající síla**. Obecně platí, že velikost příčné síly je rovna algebraickému součtu složek všech vnějších sil kolmých na osu nosníku, které působí na odstraněnou část. V řešeném případě tedy $F_0 = A - F_1 - F_2$. Dvojice sil dávají k řezu C výsledný moment M_0 , který se nazývá **ohybový moment**. Obecně platí, že velikost ohybového momentu je rovna algebraickému součtu momentů všech vnějších sil a momentů, působících na odstraněnou část. V řešeném případě tedy $M_0 = A \cdot a - F_1 \cdot a_1 - F_2 \cdot a_2$. Maximální ohybový moment je vždy v tom průřezu, ve kterém je posouvající síla rovna nule, nebo ve kterém mění své znaménko (viz obr. 1.3). Smykové napětí od posouvající síly je prakticky velmi malé, zanedbává se a nosník se řeší pouze na ohyb. Maximální napětí je v okrajových vláknech nosníku, ve středu nosníku je napětí nulové (neutrální vrstva). Horní vlákna jsou při ohybu tlačena, dolní tažena. Normálové napětí σ v libovolném místě průřezu nosníku ve vzdálenosti y od neutrální osy se určí ze vztahu:

$$\sigma = \frac{M_0}{J_x} \cdot y \quad (\text{MPa}) \quad (1.14)$$

M_o ... ohybový moment (Nmm)

J_x ... kvadratický moment průřezu k ose x (cm^4), viz kapitola „Základy výpočtu svarových spojů“

y ... vzdálenost od neutrální osy (mm)



Obr. 1.3 Rozdělení napětí v nosníku namáhaném ohybem

Největší napětí σ_{\max} na okraji nosníku se potom určí ze vztahu:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma_D \quad (1.15)$$

M_o ... ohybový moment (Nmm)

W_o ... průřezový modul v ohybu (mm^3), viz kapitola „Základy výpočtu svarových spojů“

σ_D ... dovolené napětí v tahu (MPa)

• Namáhání krutem

Při namáhání krutem se příčné řezy (např. nosníku tvaru válce) po sobě posouvají a vzniká smykové napětí τ . To roste přímo úměrně se vzdáleností od neutrální osy válce a dosahuje své maximální hodnoty na povrchu válce. Platí:

$$\tau_{\max} = \frac{M_k}{W_k} \leq \tau_D \quad (\text{MPa}) \quad (1.16)$$

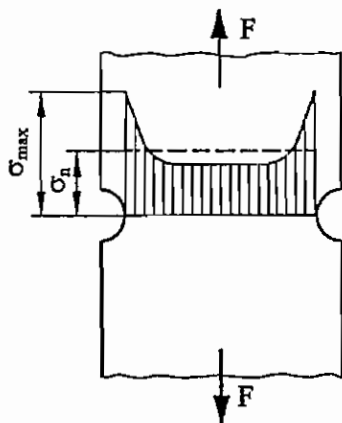
M_k ... krutící moment (Nmm)

W_k ... průřezový modul v krutu (mm^3), viz kapitola „Základy výpočtu svarových spojů“

τ_D ... dovolené napětí ve smyku (MPa)

1.3 Účinek vrubů

Praxe ukazuje, že většina lomů, zejména při kmitavém (cyklickém) zatěžování, vzniká u konstrukcí v místech vrubů. Příčinou tohoto jevu je skutečnost, že vrub jednak vyvolává ve svém kořeni prudké místní zvýšení (koncentraci) napětí a jednak mění i jednoosou napjatost, kterou je namáháno těleso, v napjatost trojosou v kořeni i okolí vrubu. Vruby mohou být **konstrukční**, tj. výrazná změna rozměru nebo tvaru součásti (drážky, zápichy, otvory, náhlé změny průřezu aj.), **technologické** (zápaly, struska ve svaru, studený spoj aj.) nebo **metalurgické** (lamely grafitu v šedé litině, místní vady ve struktuře aj.). Při mechanickém zatěžování vruby obecně znamenají náhlou změnu v rovnoměrném průběhu silového toku po průřezu konstrukce. V místě nahuštění silového toku potom dojde ke špičce napětí, viz. obr. 1.4.



Obr. 1.4 Zvýšení napětí v místě vrubu tažené tyče

V místě vrubu se chová i houževnatý materiál jako materiál křehký. Vrub zvětší pevnost v tahu, ale značně zmenší houževnatost. Špičkou napětí přetížený vrub se chce tvárně přetvořit, ale vedlejší méně namáhaná místa tomu odporují. Celkové přetvoření je proto menší, vruby tak zmenšují možnost deformace součástí. Vruby jsou nebezpečné zejména při kmitavém zatěžování konstrukce, jsou příčinou vzniku únavových trhlin a lomů. Nebezpečnost vrubů naopak není tak výrazná při statickém zatěžování, kde se místní napětíové špičky sníží místní deformací.

Statickým zatěžováním zkušební tyče tahem v pružné oblasti lze zjistit **součinitel koncentrace napětí** α_σ (také tvarový součinitel), což je poměr největšího napětí v místě koncentrace (zjistí se na zkušební tyči s vrubem) ke jmenovitému napětí (zjistí se na zkušební tyči hladké). Tento součinitel závisí na tvaru a velikosti vrubu (poloměr zakřivení dna, hloubka), na druhu namáhání (tah, ohyb, krut) a na geometrii tělesa. Nezávisí na materiálu. Součinitel koncentrace napětí α_σ bývá tím větší, čím ostřejší a hlubší je zápich nebo náhlejší přechod od většího k menšímu průřezu. Např. pro zaoblený zápich je $\alpha_\sigma = 1,5$, pro ostrý zápich je $\alpha_\sigma = 6$.

Při kmitavém zatěžování zkušební tyče při zkoušce únavy kovů [8] se zjišťuje **součinitel vrubu** β_σ . Je to poměr hodnot mezního výkmitu σ_A zkušební tyče hladké bez vrubu, tj. bez koncentrace napětí a mezního výkmitu σ_A^* stejné zkušební tyče, ale s vrubem.

Součinitel vrubu závisí na velikosti α_σ , materiálu, stavu napětí, druhu a způsobu zatížení, době zatížení aj.

Vrubová citlivost q je charakteristika daná poměrem

$$q = \frac{\beta_\sigma - 1}{\alpha_\sigma - 1} \quad (1.17)$$

β_σ ... součinitel vrubu, zjištěný zkouškou únavy

α_σ ... součinitel koncentrace napětí, zjištěný zkouškou tahem.

Na vrubovou citlivost má podstatný vliv materiál. Obecně platí, že čím je kvalitnější ocel, tím je na vruby citlivější. Hodnota q je v rozmezí od 0 (materiál necitlivý na vruby, např. litina) do 1 (nejkvalitnější ocel).

Někdy se blízko sebe vyskytuje ve svařené konstrukci více vrubů. Výsledný vrubový účinek může být buďto příznivější nebo nepříznivější než účinek jednoho vrubu. Záleží jednak na vzájemné poloze vrubů, jednak na jejich uspořádání vzhledem k silovému toku. Přímou v místě vrubu je napětí vyšší než jmenovité, kdežto v místech vzdálenějších je naopak skutečné napětí nižší než jmenovité. Upraví-li se vruby pomocí odlehčovacích vrubů tak, že každý z nich leží v místě, kde je jmenovité napětí sníženo druhým vrubem, potom je výsledná špička napětí přiměřeně nižší než napětí odpovídající jedinému vrubu. Odlehčovací vrub je záměrný vrub, který vhodným usměrněním silového toku slouží ke snížení účinku funkčně nutných konstrukčních vrubů.

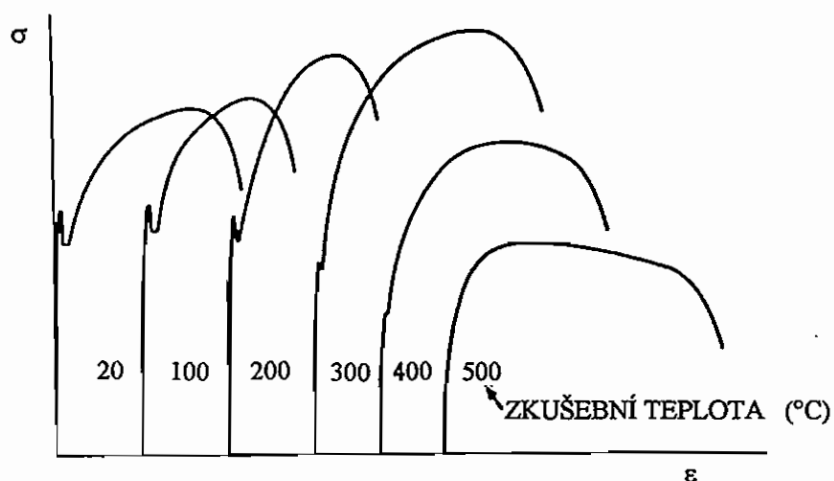
Při stejném geometrickém tvaru vrubu a konstrukce jsou nejvyšší špičky napětí při namáhání tahem (tlakem), menší při namáhání ohybem a nejmenší při namáhání krutem. Při stejném druhu namáhání jsou špičky napětí vyšší u plochých zkušebních tyčí než u tyčí válcových.

1.4 Vliv teploty na chování kovů

Chování kovů a jejich mechanické vlastnosti jsou teplotně závislé. K tomu je nutno přihlídnout při návrhu svařované konstrukce a vždy uvažovat materiálové charakteristiky při příslušných provozních teplotách. Pro běžné konstrukční oceli obecně platí, že se hodnoty jejich pevnostních charakteristik R_e , R_m s rostoucí teplotou od cca 200 °C snižují. Naopak hodnoty A , Z , které představují plasticitu materiálu, se s rostoucí teplotou zvyšují.

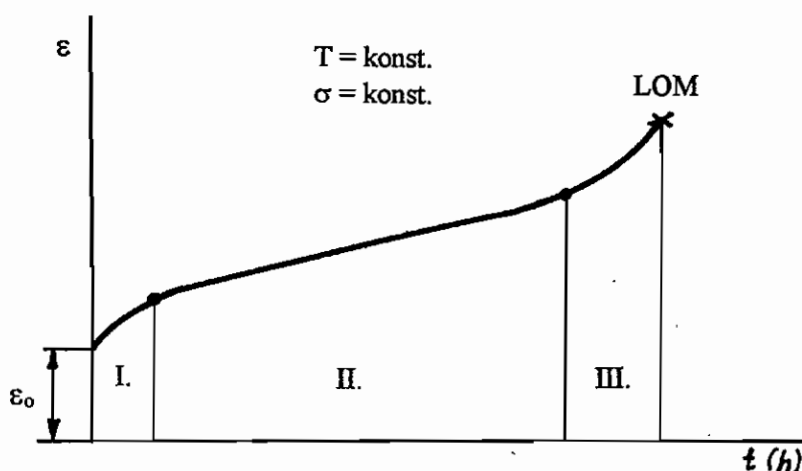
Při snižování teploty pod 0 °C dochází u feriticko perlitických ocelí (mřížka kubická prostorově středěná) k výraznému poklesu vrubové houževnatosti K_{IC} . Lom houževnatý se při poklesu teploty mění v lom křehký a o použitelnosti materiálu rozhoduje jeho přechodová (tranzitní) teplota T_T a hodnota lomové houževnatosti K_{IC} .

Při zvýšené teplotě bude při zatěžování materiálu jeho chování záviset nejen na výši teploty, ale i na době působení zatížení při dané teplotě. Krátkodobá zkouška tahem při zvýšené teplotě prokáže (viz obr. 1.5), že se při stoupající teplotě mj. ztrácí výrazná mez kluzu.



Obr. 1.5 Diagram zkoušky tahem nelegované oceli při zvýšené teplotě

Při dlouhodobém zatěžování při zvýšené teplotě (u oceli nad teplotou cca 350 °C) se v materiálu začne uplatňovat jev **tečení (creep)**, i když působící napětí bude nižší než je mez kluzu materiálu. Rychlost tečení je obecně tím větší a doba do lomu je tím kratší, čím jsou vyšší teplota a napětí. Pro praxi má největší význam vysokoteplotní tečení a zejména jeho druhé stadium (viz obr. 1.6), které rozhoduje o provozní době konstrukce.



Obr. 1.6 Křivka vysokoteplotního tečení oceli

Zkoušky tečení se provádějí podle normy [6]. Zjišťuje se buď **mez pevnosti při tečení R_{mT}** , tj. napětí, při jehož trvalém působení při teplotě T (°C) je střední doba do lomu t (h). Např.: $R_{mT} (10^3/750) = 56$ MPa. Nebo se zjišťuje **mez tečení R_T** , tj. napětí, které za dobu t (h) při teplotě T (°C) způsobí určité trvalé poměrné prodloužení (%). Např.: $R_T (10^4/1/500) = 83$ MPa.

Při provozu konstrukce za zvýšených teplot může v jistých případech docházet k jevu **relaxace** (např. u víka turbinového tělesa, nalisovaného spojení aj.). Podmínkou pro relaxaci je, aby celková deformace zůstala po dobu relaxace konstantní. Celkovou deformaci tvoří součet deformace elastické a plastické. V důsledku tečení materiálu se při relaxaci přeměňuje pružný podíl deformace na trvalou deformaci. Proto napětí s narůstajícím časem klesá (je dáno pouze elastickou deformací). Relaxace se využívá při žihání svarků ke snížení pnutí.

Při něm je stav napjatosti po svaření snižován relaxací při teplotě žhání, a to v důsledku přeměny deformace elastické na deformaci plastickou. Zkoušky relaxace se prováděly podle normy [7].

1.5 Napětí vzniklé účinkem tepla

V praxi se vyskytují případy, kdy je konstrukce vystavena kromě mechanického zatěžování navíc tepelným účinkům. Ohřev materiálu je zákonitě provázen jeho prodlužováním, při ochlazování naopak dochází k jeho smršťování. Ohřeje-li se např. volně položená tyč bez vnitřního pnutí z původní délky L_0 o rozdíl teplot Δt , bude mít po ohřevu délku L_t :

$$L_t = L_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (1.18)$$

α ... součinitel délkové teplotní roztažnosti

Pro uhlíkovou ocel $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Po ochlazení na původní teplotu bude mít tyč původní délku a nebude v ní žádné napětí.

Tuhost konstrukce výrazně ovlivňuje velikost a rozdělení vznikajících napětí a deformací tím, že zabraňuje volnému prodlužování a smršťování materiálu. Proto dochází ke vzniku napětí v konstrukci. Při ohřevu (např. ve svarovém spoji) vznikají v místě ohřevu tlaková napětí a v místech, kde byla překročena mez kluzu v tlaku materiálu za dané teploty, dojde k jeho napěchování. Při následném ochlazování nemůže napěchovaný materiál zaujímat svůj původní tvar a proto vzniknou v dříve napěchovaných oblastech tahová napětí, a v okolních oblastech napětí tlaková.

Velikost napětí σ např. v pevně upnuté tyči při jejím ohřevu lze zjistit ze vztahu:

$$\sigma = \alpha E \Delta t \quad (\text{MPa}) \quad (1.19)$$

E ... modul pružnosti v tahu (MPa)

Δt ... rozdíl teplot při ohřevu ($^\circ\text{C}$)

Vzniklé napětí tudíž nezáleží na délce součásti.

1.6 Elastická a plastická deformace

Bude-li kovový materiál namáhán vnější silou, může podle její velikosti reagovat třemi způsoby. Dojde buď k deformaci vratné (neboli elastické, pružné) k deformaci nevratné (neboli plastické, trvalé) nebo dojde k lomu.

V případě **deformace elastické** se těleso vrátí do svého původního tvaru, přestane-li působit vnější síla, která tuto deformaci vyvolala. Platí pro ni Hookův zákon. Elastická deformace je nezávislá na čase a po odlehčení vymizí. Uskutečňuje se vysunutím atomů z rovnovážných poloh. Pružné chování kovů charakterizuje modul pružnosti v tahu nebo smyku. V diagramu tahové zkoušky je modul pružnosti vyjádřen směrnici počáteční přímkové části diagramu, $E = \text{tg } \alpha$. Hodnota E je měřítkem tuhosti v oboru pružných deformací.

Deformace plastická je rovněž nezávislá na čase, ale po odlehčení trvale zůstává. Vyvolává ji zatížení o velikosti nad mez platnosti Hookova zákona. Je výsledkem posuvů úseků krystalové mřížky podél určitých krystalových rovin a směrů o celé násobky vzdáleností atomů.

1.7 Typy lomů

Na chování materiálů při lomu konstrukce mají rozhodující vliv tyto tři charakteristiky:

- Vlastnosti materiálu (struktura, velikost zrna, vměsky, mřížkové poruchy, pevnost, tažnost).
- Rychlost a způsob zatěžování (statické, kmitavé, rázy, napěťový stav, teplota zatěžování).
- Přítomnost nerovnoměrně rozdělených vnitřních pnutí (po tváření, svařování).

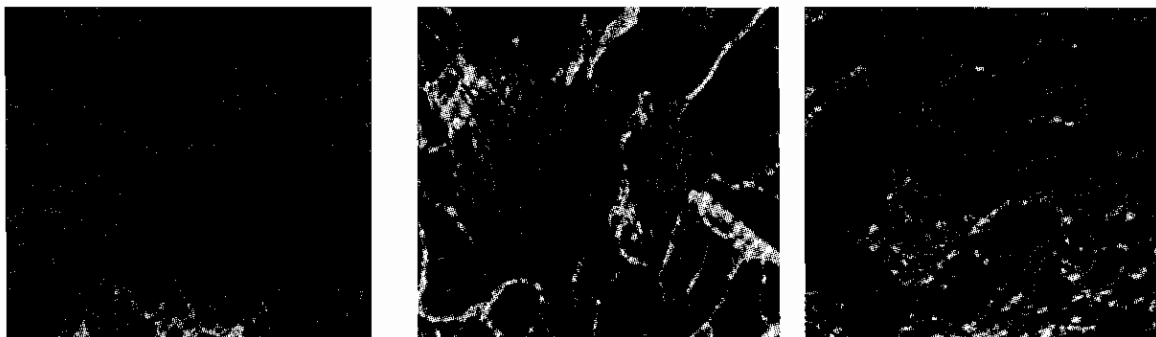
Na rozdíl od trhliny, která svojí délkou nezahrnuje celý průřez součásti, se lomem nazývá pochod, při kterém dojde k porušení meziatomových vazeb a k oddělení materiálu v celém průřezu součásti. Lom se skládá z etapy iniciace a z etapy šíření trhlin. Zárodkem lomu jsou necelistvosti z výroby nebo necelistvosti, které vznikly až při zatěžování konstrukce. Hovoří se o **mikrotrhlinách** (bez optického zvětšení nejsou patrné) nebo o **makrotrhlinách** (pouhým okem patrné, délka větší než 1 mm). Na ostrém čele trhliny se koncentruje napětí a deformace. Dochází k zvětšování délky trhlin, k vytváření nových volných povrchů (lomových ploch) a k jejich propojování.

- **Houževnatý lom**

Za podmínek houževnatého porušování má kovový materiál dostatečnou plasticitu, aby se místně zvětšené napětí před čelem trhlinky snižovalo relaxací. Dochází při tom k postupnému **stabilnímu růstu trhliny**, který je pomalý a až do lomu vyžaduje dodávat vnějším zatěžováním energii. Houževnatý lom má známky makroplastické deformace (viz. obr. 1.7a). Dojde k němu po překročení určité délky trhliny, kdy se nezávisle na vnějším zatížení trhlina rozběhne a to při napětích nad mezí kluzu. K houževnatým lomům dochází při přetížení nebo v případě nesprávně navržených nosných průřezů (statické silové lomy).

- **Křehký lom**

Při křehkém lomu (obr. 1.7b) dochází k náhlému **nestabilnímu růstu trhliny**. Lom nastává účinkem elastické energie nakupené v tělese v podstatě bez plastické deformace, a to při napětích nižších než je mez kluzu. Materiál se až do lomu deformuje pouze elasticky. Křehký lom se rozvíjí až od určité tzv. kritické délky trhliny při daném napětí (nebo od kritického napětí pro danou délku trhliny). Na vznik křehkého lomu má vliv zejména tloušťka materiálu, velikost vnitřního pnutí v konstrukci a pracovní teplota. Ve svařované konstrukci může vznik křehkého lomu způsobit zejména trojosý stav napjatosti v určitém místě konstrukce (křížení svarů, vady typu trhlin aj.).



a)

b)

c)

Obr. 1.7 Mikroskopické typy lomů
a) houževnatý; b) křehký; c) únavový

- **Únavový lom**

Při kmitavém namáhání dochází k **lomu únavovému** (obr. 1.7c). Vlastní únavový lom je v podstatě hladká, většinou rovinná část lomové plochy, bez známek makroplastické deformace. Tato část lomu vzniká při postupném šíření únavové trhliny. Zbytkový lom průřezu je většinou hrubozrnější, nepravidelný, někdy se známkami plastické deformace. Při dynamickém zatěžování vzniká únavový lom často hluboko pod hodnotou napětí, které odpovídá únosnosti při statickém zatěžování. Únavový lom závisí zejména na druhu kmitů (míjivé, střídavé aj.), způsobu namáhání (tah, tlak aj.), na počtu kmitů zatěžování a na přítomnosti vrubů v konstrukci.

- **Lom interkrystalický a transkrystalický**

Z hlediska charakteru mikromechanismu porušování se rozlišuje lom (průběh trhlin) po hranicích zrn neboli **lom interkrystalický** a lom zrny neboli **lom transkrystalický**. Někdy se může charakter lomu při jeho průběhu měnit. Např. při svařování jsou trhliny za horka vždy interkrystalické, trhliny za studena transkrystalické, které někdy přecházejí do interkrystalických.

- **Lom tvárný a štěpný**

Z hlediska fraktografického lze rozlišit lom tvárný a lom štěpný. Při **tvárném lomu** dochází k tvorbě, růstu a propojování mikroporuch, které vznikají na inkluzích a precipitátech obsažených v základní matici. Tvárný lom má matný vzhled a lomová plocha je tvořena u běžných konstrukčních ocelí tvárnými důlky. Může být buď transkrystalický nebo interkrystalický. Tvárný charakter mají většinou lomy houževnaté. Tvárný lom však nemůže nastat bez plastické deformace. Ta je někdy omezena pouze na malý objem materiálu a lomová plocha je potom relativně rovná (konstrukční slitiny s vysokou pevností a malou houževnatostí). Tyto tvárné lomy se považují za křehké. Při **štěpném lomu** dochází k porušování meziatomových vazeb podél určitých krystalografických rovin. Proto je lom téměř rovinný a relativně hladký a lesklý. Štěpný lom může být transkrystalický (např. křehký štěpný lom) nebo interkrystalický. O tom, zda dojde k lomu tvárnému nebo štěpnému rozhoduje i stav napjatosti v tělese. Štěpný lom je řízen tahovou složkou napětí, tvárný lom obvykle smykovou složkou. Proto je pravděpodobné, že v případě napjatosti, kdy je smykové napětí nulové a hlavní

normálová tahová napětí ve třech směrech jsou si rovna (hydrostatická napjatost), dojde ke štěpnému lomu. Roste-li vliv smyku, nastává lom tvárný.

Literatura

- ČSN EN 10002-1. Kovové materiály. Zkouška tahem. Část 1: Zkouška tahem za okolní teploty, 1994.
- ČSN EN 10045-1. Kovové materiály. Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho. Část 1: Zkušební metoda, 1998.
- ČSN 42 0347. Zkoušení kovů. Lomová houževnatost kovů při statickém zatížení, 1991.
- ČSN EN 895. Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů. Příčná zkouška tahem, 1997.
- ČSN 05 0120. Výpočet svarových spojů strojních konstrukcí, 1972.
- ČSN 42 0351. Zkoušení kovů. Zkoušky tečení za vyšších teplot, 1988.
- ČSN 42 0356. Zkoušení kovů. Zkouška relaxace oceli za vyšších teplot, 1962. Zrušena.
- ČSN 42 0363. Zkoušení kovů. Zkoušky únavy kovů. Metodika zkoušení, 1987.
- HÁJEK, E. aj.: Pružnost a pevnost I. [Skripta]. Ediční středisko ČVUT, Praha 1984.
- MRŇÁK, L. – DRDLA, A.: Mechanika. Pružnost a pevnost. SNTL, Praha 1980.
- KAISER, J. aj.: Pružnost a plasticita. Alfa, Bratislava 1990.
- KOVAŘÍK, R.: Materiály pro energetiku a jejich zkoušení. [Skripta]. Ediční středisko ZČU, Plzeň 1990.
- ČSN EN 876. Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů. Podélná zkouška tahem svarového kovu, 1998.
- ČSN EN ISO 12737. Kovové materiály. Určení lomové houževnatosti při rovinné deformaci, 2000.

2. Pnutí a deformace svarových spojů

Při tavném svařování se do místa svarového spoje přivádí teplo, potřebné k roztavení přídavného materiálu a k natavení svarových úkosů. Fyzikální podstatou vzniku vnitřních pnutí a deformací při svařování je přivedené teplo a nestejněměrný ohřev a ochlazování. Vnitřní pnutí při svařování jsou složena ze dvou částí. Jsou to jednak pnutí smršťovací, která vznikají z důvodů omezeného prodlužování a omezeného smršťování ohřáté oblasti svarového spoje a jednak pnutí strukturní, která vznikají při objemových změnách při chladnutí tavné svarové lázně a při strukturních přeměnách materiálu. Vnitřní pnutí a deformace jsou při výrobě svařovaných konstrukcí nežádoucím jevem. Nelze jim zabránit, je však možno minimalizovat jejich velikost.

Vnitřní pnutí jsou pnutí, která jsou ve svarku přítomna, i když na něj nepůsobí žádné vnější síly a momenty. V některých částech svarku jsou tahová a jinde tlaková. Mohou působit ve více osách, ale vzájemně jsou v rovnováze. V případě svařování tenkých plechů působí vnitřní pnutí v rovině (ve směru podélné a příčné osy svaru), u plechů tlustých (cca od 30 mm) a u koutových svarů vzniká prostorový stav napjatosti. Vnitřní svarová pnutí jsou značně velká, mohou dosáhnout meze kluzu svařovaného materiálu. Vnitřní pnutí, která trvale zůstávají ve svarku se někdy nazývají zbytková neboli reziduální pnutí. Vnitřní pnutí, která se v dílu při jeho svařování vytvoří, nejsou na svarku patrná. Mohou se nepříznivě projevit až vznikem trhlin ve svarovém kovu či v TOO, nebo deformacemi při následném obrábění, kdy dojde k uvolnění vnitřních pnutí a následkem toho ke změně tvaru. Vnitřní pnutí se může nepříznivě projevit i při provozu svařené konstrukce, např. snížením její únosnosti při dynamickém zatížení, rozměrovou nestálostí nebo zvýšenou náchylností ke korozi pod napětím.

Deformace jsou nežádoucí změny tvarů a rozměrů jednotlivých dílů i celých svařených konstrukcí, které jsou nepřijatelné buď z hlediska dalšího použití nebo pouze ze vzhledových důvodů. Obvykle je možno deformace po svaření odstranit. Všechny způsoby odstraňování deformací (např. rovnání, opracování svarku) však zvyšují výrobní náklady.

2.1 Vztah mezi vnitřním pnutím a deformací

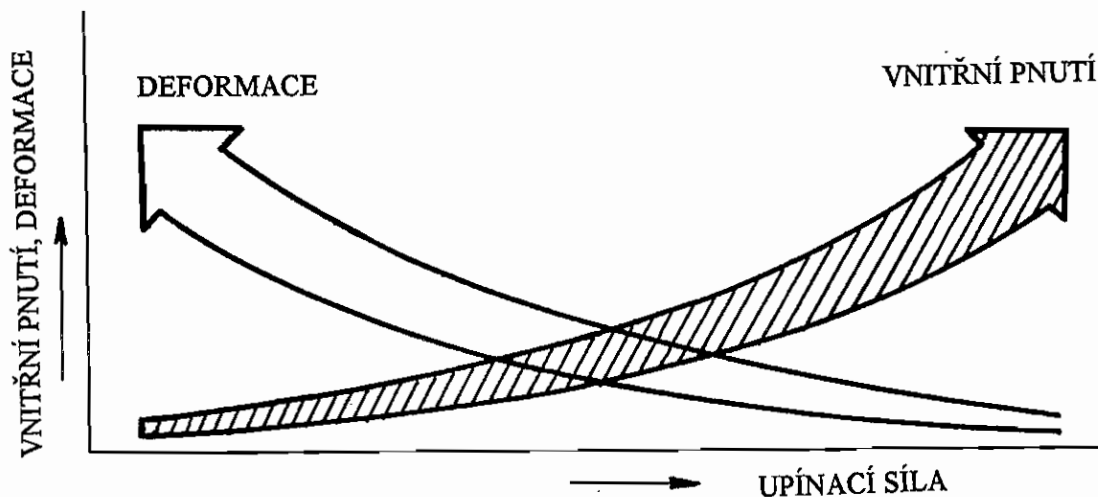
Mezi vnitřním pnutím a deformací při svařování je příčinná souvislost. Jsou to dva na sobě závislé jevy, nelze je od sebe oddělovat. Jsou výsledkem působení tepelné deformačního cyklu svařování. Tepelné napětí při svařování vyvolá deformaci, která může být elastická nebo plastická. Elastická deformace vznikne v případech, že napětí v materiálu nepřesáhne mez úměrnosti, tzn. jeho velikost bude v oblasti platnosti Hookova zákona. Zbytková pnutí a plastická deformace vzniknou jen tehdy, překročí-li napětí ve svarovém spoji mez kluzu v tlaku, tzn. že dojde k napěchování materiálu.

Základní příčinou vzniku vnitřních pnutí a deformací jsou:

- Existence teplotních gradientů ve svarku, daná nestejněměrným ohřevem a ochlazováním. V ose svaru teplota dosahuje maxima, na obě strany od osy směrem do základního materiálu teplota exponenciálně klesá až na teplotu místnosti či přehřevu. V závislosti na teplotě dochází k prodlužování a smršťování míst svarového spoje.

- Strukturální změny v základním materiálu i ve svarovém kovu spojené s objemovými změnami. TOO je v důsledku tepelného cyklu svařování postupně ohřáta na teploty nad Ac_1 a Ac_3 . Při fázových přeměnách při přechodu těchto teplot dochází ke změnám objemu. Při růstu krystalu martenzitu vznikají vysoké hladiny vnitřních pnutí. Vznik strukturálních pnutí se výrazněji projevuje u legovaných ocelí s vyšší prokalitelností.
- Tuhost svařované konstrukce. Přířímým důsledkem tuhosti je vznik tlakových vnitřních pnutí při ohřevu a tahových vnitřních pnutí při ochlazování svarového spoje.

Pro svařovací praxi platí pravidlo: Při svařování volně uložených dílů vznikají ve svaru a jeho nejbližším okolí zpravidla velké deformace (smrštění) a malá vnitřní pnutí. Při svařování dílů upnutých např. ve svařovacím přípravku většinou vznikají malé deformace a velká vnitřní pnutí. Vzájemný vztah mezi vnitřním pnutím a deformací je patrný z obr. 2.1.



Obr. 2.1 Vztah mezi vnitřním pnutím a deformací při svařování

2.2 Činitelé ovlivňující vnitřní pnutí a deformace

Určujícími pro vznik vnitřních pnutí a deformací jsou přívod a odvod tepelné energie do svaru. Velikost vnitřních pnutí a deformací při svařování ovlivňují při vzájemném komplexním působení následující činitelé:

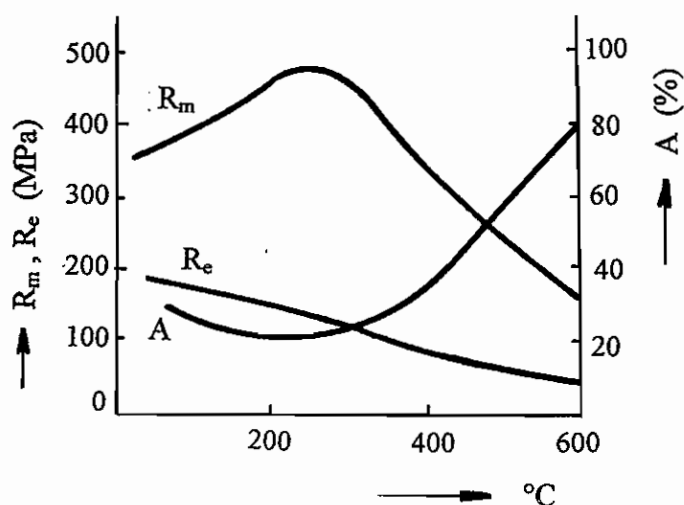
- Metoda svařování, tzn. koncentrace tepelné energie v místě svaru.
- Parametry svařování, tzn. množství vneseného tepla na jednotku délky svaru. Rozhoduje především svařovací proud a rychlost svařování.
- Technologie svařování, např. směr kladení housenek, vystřídání svarů, počet svarových housenek, druh obalu a průměr elektrody.
- Druh základního materiálu a svarového kovu, jejich mechanické a fyzikální vlastnosti a chemické složení. Vliv má především velikost součinitele délkové teplotní roztažnosti α , modulu pružnosti E , teplotní vodivosti λ , měrného tepla c .
- Struktura v TOO a její přeměny při ohřevu a ochlazování svarového spoje.
- Rozpustnost plynů (zejména vodíku) v TOO a ve svarovém kovu v závislosti na teplotě.
- Teplotní režim při svařování, tj. předehřev, interpass teplota, dohřev.
- Druh a režim tepelného zpracování před a po svaření.

- Konstrukční řešení svařované konstrukce, její geometrické rozměry a tuhost. Určujícími jsou např. svařovaná tloušťka, druh a velikost svarů, počet svarů a jejich uspořádání v konstrukci.

Uvedení činitele určují mj. tvar teplotního pole při svařování a šířku teplotního pásma, ve kterém byla překročena teplota 600 °C, potřebná k napěchování. Velikost vnitřních pnutí a deformací závisí na poměru šířky tohoto pásma k celkové šířce svařovaného plechu. Při plamenovém svařování je pásmo ohřáté nad 600 °C širší než při svařování elektrickým obloukem, budou při něm proto větší deformace. Při svařování pod tavidlem jsou obecně vysoké svařovací rychlosti, což se projeví ve velmi úzkém pásmu ohřátém na teplotu nad 600 °C. Budou při něm proto menší deformace. Předehřevem se rozšiřuje pásmo ohřáté nad 600 °C, ale zpomaluje se rychlost ochlazování.

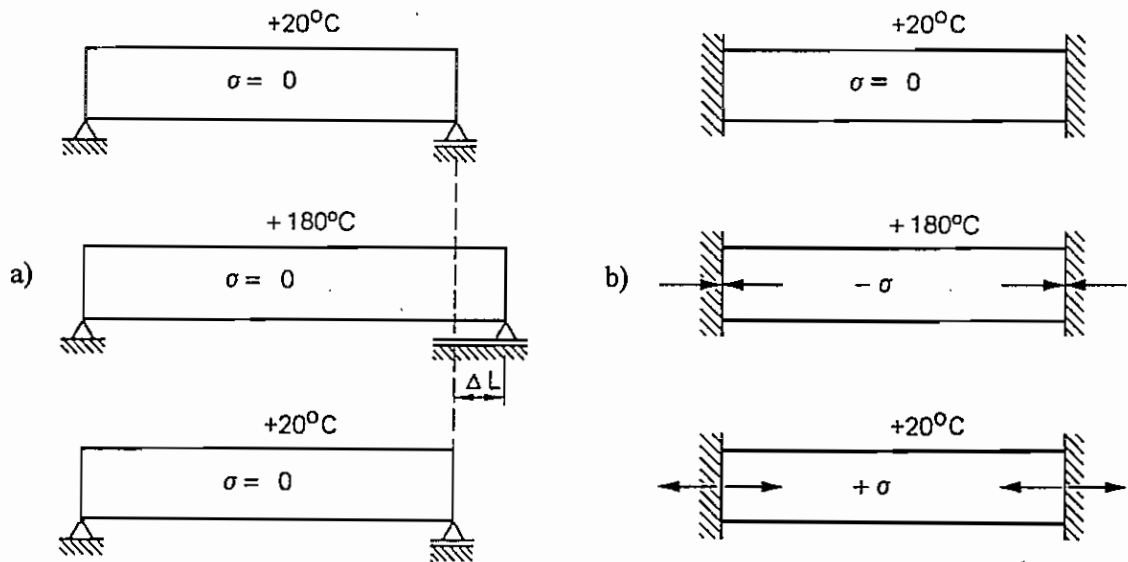
2.3 Vznik vnitřních pnutí a deformací

Pro pochopení mechanismu vzniku vnitřních pnutí si je nutno uvědomit závislost mechanických vlastností ocelí na teplotě. U nízkouhlíkové konstrukční oceli klesá v oblasti kolem 200 až 400 °C tvárnost, která naopak od teploty 500 až 600 °C rychle vzrůstá. Mez kluzu a pevnost se stoupající teplotou klesají a dosahují při teplotě 500 až 600 °C obecně 15 až 25 % své původní hodnoty. Se stoupající teplotou u uvedených ocelí stoupá součinitel délkové teplotní roztažnosti, ale klesá modul pružnosti. Příklad závislosti mechanických vlastností oceli S 235 na teplotě je uveden na obr. 2.2.



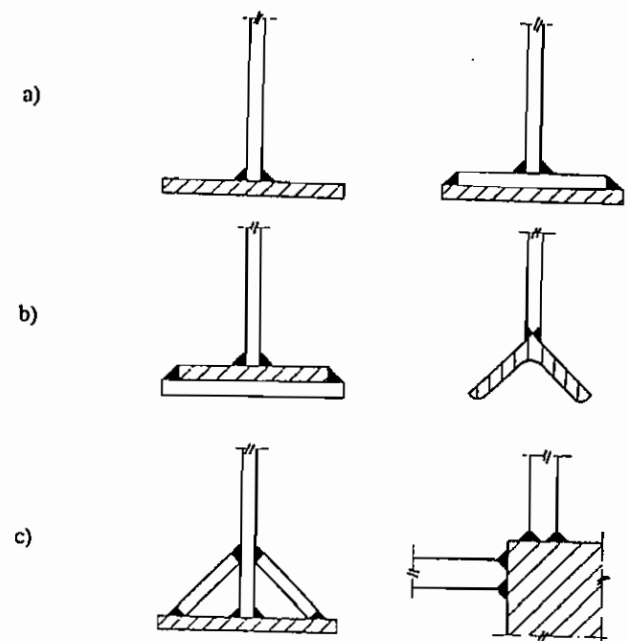
Obr. 2.2 Závislost mechanických vlastností oceli typu S 235 na teplotě

Deformace a vnitřní pnutí při svařování jsou způsobeny tím, že má svarový spoj snahu roztahovat se při ohřevu a smršťovat se při ochlazování. Vzhledem k objemu svarku má svarový spoj relativně malý objem a proto bude svařovacím teplem neovlivněný základní materiál (resp. tuhost konstrukce) bránit uvedeným snahám o změně délky. Výsledkem bude napěchování, tj. plastická deformace materiálu ve svaru a jeho nejbližším okolí a vznik vnitřních pnutí. Čím větší jsou plastické deformace v okolí svaru při ohřevu, tím větší jsou po ochlazení na teplotu 20 °C vnitřní pnutí ve spoji. Princip vzniku vnitřních pnutí a deformací je možno vysvětlit na příkladě tyče, která je při ohřevu buď volná (obr. 2.3a) nebo pevně upnutá (obr. 2.3b).



Obr. 2.3 Napěťový stav při ohřevu a ochlazení tyče
 a) Tyč volná; b) tyč pevně upnutá

Tyč volně uložená (obr. 2.3a) se při ohřevu prodlouží podle vztahu (1.18) o délku ΔL (např. ocelová tyč o délce 1m se při ohřevu o 100 °C prodlouží o 1,2 mm). Není v ní žádné vnitřní pnutí před ohřevem ani po ochlazení. Je-li tyč upnutá (obr. 2.3b) zabrání se jejímu prodloužení i smrštění a v tyči vzniká vnitřní pnutí. Jeho velikost lze určit pomocí vztahu (1.19). Podobně vzniká vnitřní pnutí i ve svařované konstrukci. Ve svařovém spoji je proto vždy určitý stav napjatosti, v zásadě závislý na svařovaném materiálu, přivedeném teple a tuhosti konstrukce. Příklady napěťového stavu ve svařeném uzlu jsou na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Napěťový stav ve svařeném uzlu
 a) nízký; b) střední; c) vysoký
 Šrafovány jsou části, které rozhodují o napěťovém stavu

2.4 Rozdělení a velikost vnitřních pnutí a deformací

• Vnitřní pnutí

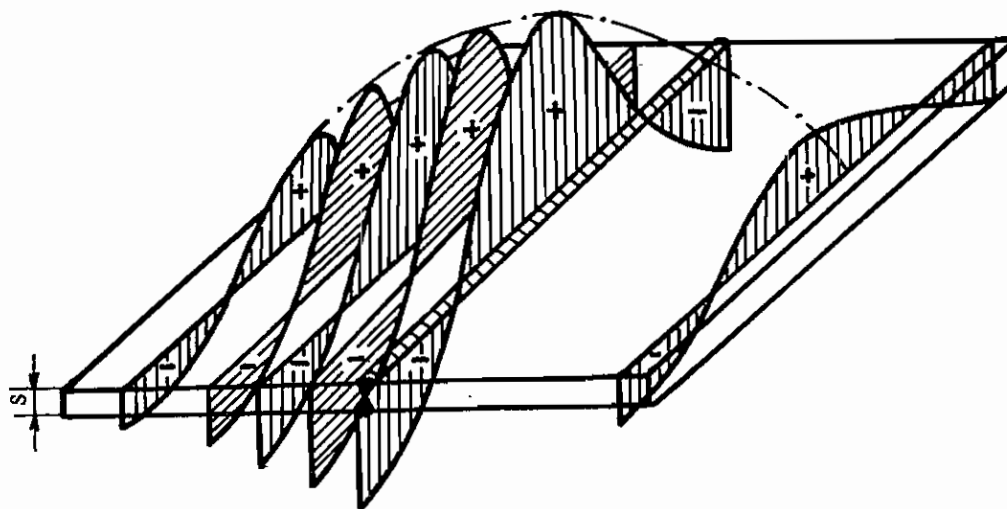
Podle velikosti objemu, ve kterém vnitřní pnutí působí se vnitřní pnutí rozděluje na pnutí:

I. druhu – **makroskopické**. Působí ve velkých objemech konstrukce a má určitý směr. Má rozhodující vliv na vznik trhlin a na užitkové vlastnosti svarků.

II. druhu – **mikroskopické**. Působí v zrnech kovu, nezávisí na rozměrech a na tvaru konstrukce.

III. druhu – **submikroskopické**. Působí uvnitř krystalové mřížky. Má vliv pouze na mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti kovů.

Podle směru působení vzhledem k ose svaru se vnitřní pnutí rozděluje na podélné, příčné a pnutí po tloušťce. Příklad rozložení podélného pnutí je na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Průběh podélných pnutí ve svařené desce

Příčinou vzniku vnitřních pnutí při svařování je zabránění tepelným dilatacím. V praxi k tomuto dochází buď „vnějším“ **upnutím**, kdy je vnější silou zabráněno smršťování dílů, např. pomocí přípravku. V tomto případě se hovoří o tzv. reakčním vnějším pnutí, které lze omezit volným uložením dílů při svařování. Nebo je **upnutí „vnitřní“**, způsobené tuhostí svařovaných dílů nebo svařených podskupin. Vyskytuje se např. při přivařování pásnice ke stojině krčným svarem, nebo při svařování volně uložených tlustých plechů. Znamená to, že i volně uložené plechy nejsou po svaření zcela bez vnitřních pnutí.

Vnitřní pnutí při svařování mohou v případě dvouosé napjatosti dosáhnout až hodnotu $1,15 R_e$. Obecně jsou nejvyšší v povrchových vrstvách svarových spojů, kde převládá dvouosý stav napjatosti v tahu.

• Deformace

Deformace po svařování lze posuzovat a třídit podle různých hledisek. Prakticky se jedná o různé projevy smrštění. Pro praktickou potřebu se deformace dělí podle doby jejich trvání a podle jejich působení k osám svaru.

Rozdělení deformací podle doby jejich trvání:

Deformace elastické. Trvají jen po dobu působení napětí v oblasti Hookova zákona.

Deformace plastické. Zůstávají i po odstranění síly, která je způsobila.

Zborcení (vyboulení) roviny.

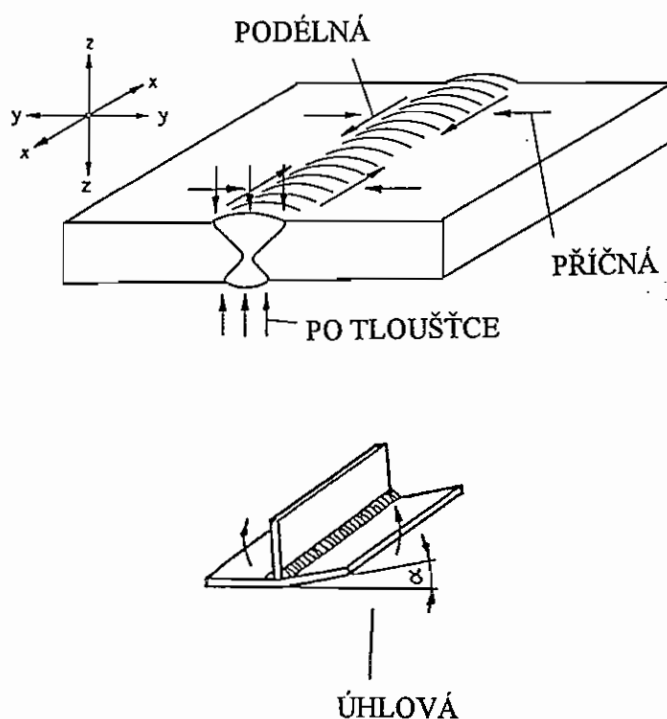
Rozdělení deformací vzhledem k osám svaru:

Deformace podélné. Nastávají ve směru podélné osy svaru. Jedná se o podélné smrštění svařených desek (viz obr. 2.6).

Deformace příčné. Nastávají příčně k podélné ose svaru. Jedná se o příčné smrštění svařených desek (viz obr. 2.6).

Deformace úhlové. Jsou důsledkem příčného smrštění (viz obr. 2.6).

Deformace ve směru tloušťky plechu. Uvažují se od tlouštěk větších než 30 mm (viz obr. 2.6).



Obr. 2.6 Deformace po svaření.

Velikost deformací je možno orientačně za zjednodušujících předpokladů (neuvažuje se např. tuhost konstrukce) vypočítat pomocí empirických vztahů. Ve svarku mohou uvedené deformace působit současně.

Deformace podélné

Při ochlazování plasticky deformovaného svarového kovu vyvolají pnutí vznikající v podélném směru svaru podélné smrštění svařované desky. V závislosti na tuhosti svařované desky se podélné smrštění projeví buď zvlněním a vyboulením (např. v případě tenkého plechu) nebo relativně malým podélným zkrácením původní délky. U plechů o velké tloušťce

se podélná deformace projeví pouze na koncích plechu. Podle tuhosti konstrukce bývají podélné deformace u středně tlustých plechů (cca 10 mm) v rozmezí 0,1 až 0,5 mm na metr délky svaru [1]. Praxe ve ŠKODA Plzeň uvažuje 0,75 až 1,0 mm a u zvláště tuhých konstrukcí 0,35 až 0,65 mm podélného smrštění na metr délky tupého svaru [2]. Tento údaj se schoduje s údaji z NSR [3]. Krční koutové svary u I nosníku způsobí zkrácení cca 0,2 mm/1m délky [4]. Protože jsou podélná smrštění relativně malá, jsou u tuhých konstrukcí velká tahová vnitřní pnutí, která mohou zapříčinit vznik trhlin orientovaných napříč svarem. Při odhadu podélné deformace se při vícevrstevovém svařování k podélnému smrštění od první vrstvy připočítává jeho jedna desetina na každou další vrstvu. O uvažované podélné smrštění je nutno zvětšit objednanou délku plechů.

Podélná deformace závisí na svařovacím proudu, tloušťce a průřezu plechu, rychlosti svařování a na postupu svařování. Oproti ručnímu svařování obalenou elektrodou s přerušováním svařování pro výměnu elektrody jsou při svařování pod tavidlem větší podélná smrštění. Obecně platí, že čím jsou delší časové úseky mezi svařováním jednotlivých housenek nebo čím je větší rychlost svařování, tím jsou menší podélné deformace [4].

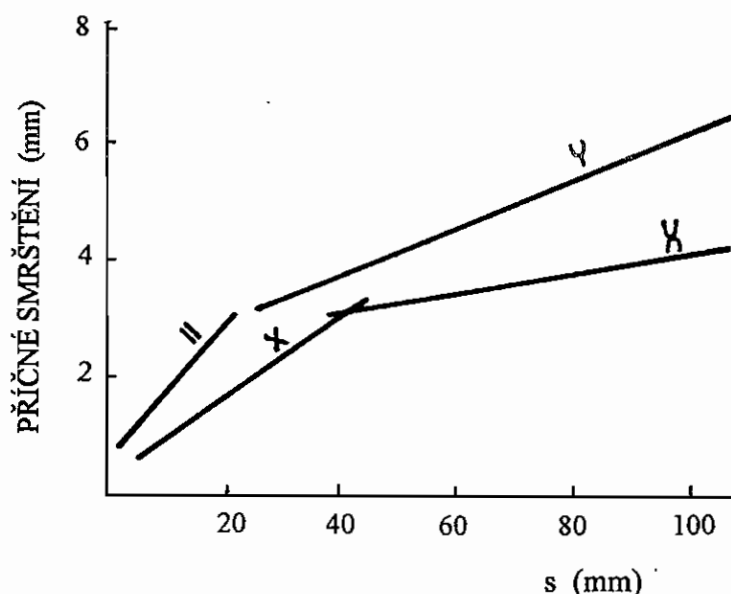
Opatření ke snižování podélných deformací:

- Větší konstrukce rozdělit do podskupin. Skupiny vyrovnat za studena nebo plamenem.
- Použít co nejmenší měrné svařovací teplo.
- Svařovat co nejméně, tzn. např. používat při výrobě skříňových profilů válcované profily nebo hraněné plechy.
- Pokud je to dovoleno, používat zejména u slabých plechů přerušované koutové svary.
- Volit malý úhel rozevření α , co nejmenší průřez svaru a malý počet vrstev.
- Svařovat vratným nebo střídavě vratným krokem.
- Sestavovat a svařovat od geometrického středu svarku směrem ven k volným koncům.
- Volit symetrické uspořádání svarů vzhledem ke geometrické ose svarku.
- U oboustranných svarů svařovat pokud možno z obou stran současně, aby se zachovala teplotní rovnováha.

Deformace příčné

Příčné smrštění si zaslouhuje zvýšenou pozornost. Je složeno z 90 % ze smrštění základního materiálu a z 10 % ze smrštění svarového kovu [4]. Projevuje se již při stěhování svarů zmenšováním svarové mezery. S příčným smrštěním je nutno počítat hlavně u tupých svarů. Při svařování obalenými elektrodami se při tloušťce plechu 15 až 25 mm může orientačně počítat s příčným smrštěním o velikosti jedné desetině tloušťky plechu. Smrštění bude větší při tloušťce plechu menší než 15 až 25 mm a menší při tloušťce plechu větší než 15 až 25 mm. U koutových svarů jsou příčná smrštění menší než u tupých svarů, závisí na poměru velikosti koutového svaru k tloušťce plechu.

Velikost příčných deformací závisí na měrném příkonu svařování, na metodě svařování, na příčném průřezu svaru (tzn. na objemu svarového kovu – viz obr. 2.7), na tloušťce plechu, na druhu použitých elektrod (množství vneseného tepla do svaru vzrůstá v pořadí: obal bazický, rutilový, kyselý). Při svařování v poloze svislé jsou obecně příčná smrštění menší až o 40 % než při svařování v poloze vodorovné [4]. Počet housenek a vrstev svaru nemá na velikost příčného smrštění větší vliv. Při svařování pod tavidlem je příčné smrštění menší než při svařování ručním obalenou elektrodou. U plamenového svařování je příčné smrštění obzvláště nepříznivé.



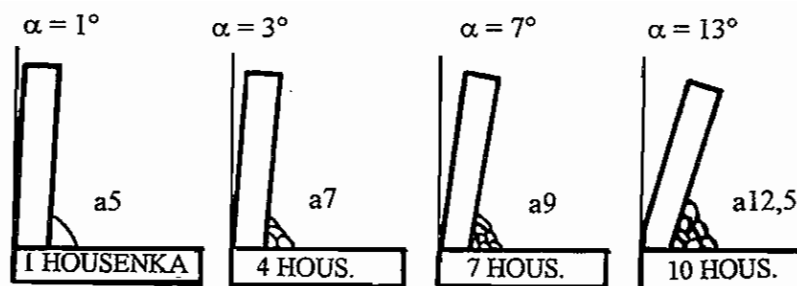
Obr. 2.7 Vliv průřezu svaru na velikost příčného smrštění

Opatření ke snižování příčných deformací:

- Věnovat pozornost stehování. Správně provedené stehy zaručují minimální příčné smrštění.
- Volit co nejmenší úhel zkosení β .
- Svařovat přerušovaně, zejména při svařování kořenové housenky. Svařovat vratným krokem.
- Mnohdy je účinné zvětšit svařovací rychlost.
- Prokování svarových vrstev snižuje velikost příčného smrštění.
- Tlustostěnné upnuté díly svařovat bazickými elektrodami.
- Nikdy nesvařovat svařovacím proudem vyšším, nežli je předepsáno.
- Automatizované způsoby svařování mají vzhledem k vyšší rychlosti svařování menší příčné smrštění.
- Při svařování velkých plechů vždy svařovat nejdříve svary příčné, potom svary podélné.
- Přivařování výztužných žeber provádět až jako poslední svářečské operace.

Deformace úhlové

Úhlové deformace jsou nejnejpříjemnějšími deformacemi při svařování. Jsou zvláštním případem příčného smrštění, které je u jednostranných svarů nerovnoměrně rozloženo po tloušťce svaru. Např. u tupého V svaru je v oblasti krycí vrstvy větší objem svarového kovu a tudíž větší příčné smrštění, než v oblasti vrstvy kořenové. K deformacím úhlovým proto dochází zejména u tupých svarů V a u koutových svarů. Úhlové deformace narůstají s rostoucí svařovanou tloušťkou. Čím je větší počet vrstev svaru, tím je při stejné tloušťce plechu větší úhlová deformace. U jednostranných koutových svarů jsou úhlové deformace nejpatrnější, viz obr. 2.8.



Obr. 2.8 Vliv velikosti koutového svaru na úhlové smrštění

Velikost úhlové deformace u tupých svarů přímo závisí na úhlu rozevření svarových ploch α . U koutových svarů tato deformace závisí na poměru výšky svaru k tloušťce plechu.

Opatření ke snižování úhlových deformací:

- Volit svary I, U a svary oboustranné symetrické.
- Svařovat většími průměry elektrod, snižovat počet vrstev, svařovat střídavě z obou stran.
- Přednost dávat automatizovaným postupům svařování.
- Sestavení desek nebo vyhnutí plechu před svařením do opačného úhlu, než v jakém se předpokládá úhlová deformace.
- Prokování svarových vrstev.
- Vybrusění svaru ze strany kořene a podložení svaru housenkou.

Při svařování je průběh deformací obecně velmi složitý. Před elektrodou se materiál kontinuálně prodlužuje, za elektrodou dochází k jeho smršťování. U každého konkrétního svarku budou jisté konkrétní napěťové a deformační poměry.

V praxi se postupuje tak, že se u dobře svařitelných a plastických materiálů zpravidla omezí deformace pevným upnutím např. v přípravku, tj. zachová se pokud možno tvar svarku za cenu většího vnitřního pnutí. To se potom sniží např. žiháním. U materiálů obtížně svařitelných (náchylných k zakalení v TOO) nebo málo plastických se naopak umožní deformace, aby se zabránilo vzniku vnitřních pnutí a tudíž trhlin. Deformace se potom může vyřešit např. většími přídávky na obrábění nebo rovnáním.

2.5 Možnosti zmenšování vnitřních pnutí a deformací

Možnosti ke zmenšování velikosti vnitřních pnutí a deformací jsou ve všech etapách vzniku svařované konstrukce, tj. v **etapě předvýrobní** (konstruktér, technolog), v **etapě výrobní** (svářeč) a v **etapě po svaření** (rovnání, mechanické zpracování svarků, žihání ke snížení pnutí). Ve svářečské praxi je nutno současně využít všech nabízených možností a minimalizovat vnitřní pnutí a deformace.

i u vícevrstvých svarů v případech, kdy se nebude provádět žihání ke snížení pnutí. Oblast svarové housenky nebo vrstvy housenek je při něm plasticky deformována. Tím dochází ke snižování tahových pnutí nebo ke vzniku tlakových vnitřních pnutí. Před prokováním se musí odstranit struska a nerovnosti přebroušením povrchu. Prokováním přechodu svarového kovu do základního materiálu se zde vytvoří plasticky deformovaná vrstva a tlakové vnitřní pnutí zvýší únavovou pevnost svarového spoje. Pracovní teplota při prokování má odpovídat teplotě předehřevu nebo teplotě mezihousenkové (interpass teplota). Při teplotě „modrého žáru“, tj. 200 až 400 °C se prokování neprovádí (nízká plasticita oceli). Při prokování krycí vrstvy svaru může dojít k jejímu nežádoucímu zpevnění, případně až ke vzniku povrchových trhlin ve svaru. Prokování svarů vyžaduje zkušenost. Prokování je někdy úspěšně nahrazováno válečkováním nebo kuličkováním.

- **Rovnění** po svaření se provádí buď za studena mechanickým místním zatěžováním nad mez kluzu materiálu např. pomocí lisů nebo místním ohřevem plamenem.

Mechanické rovnání je obvykle pracné a může se při něm poškodit povrch. Dojde při něm k místním změnám tvaru, tj. k plastickým deformacím ve svarku a ke změně stavu vnitřního pnutí. Napěťové špičky se sníží, vnitřní pnutí se přerozdělí a vyrovná v celém objemu svarku. Při mechanickém rovnání je nutno zabránit vzniku trhlin, vrypů a vrubů v místě rovnání.

Rovnění plamenem se provádí rychlým místním ohřevem kyslíko-acetylenovým plamenem na teplotu pro konstrukční oceli 550 až 700 °C (tmavočervená barva), pro hliníkové slitiny 350 až 400 °C. Při ohřevu dojde k místnímu napěchování materiálu a k jeho zkrácení při ochlazování. Vzniklá tahová pnutí způsobí požadované vyrovnání deformovaného místa. Ochlazování se provádí např. proudem stlačeného vzduchu nebo vodní sprchou. Ohřev se provádí tepelným bodem (plechy, roury), tepelnou čarou (zmenšení úhlových deformací koutových svarů), tepelným klínem (nosníky z I profilů), nebo tepelným oválem (roury po přivaření hrdla). Jako hořáky pro rovnání plamenem se používají hořáky s jedním či více plameny. Rovnění plamenem je rychlé, avšak vyžaduje velké zkušenosti a manuální zručnost.

- **Snižování vnitřních pnutí mechanickým způsobem** a stabilizace rozměrů svarků se používá u uhlíkových a mikrolegovaných ocelí s dostatečnou houževnatostí. V omezené míře se provádí pomocí zatěžování ohybem, tahem nebo přetlakem (potrubí, nádoby) těsně nad mez kluzu. V poslední době se někdy provádí vibrační zpracování svarků. Při vibračním zpracování se pomocí vibračního zařízení (přenosný vibrátor, hlučnost i přes 110 dB) ve svarku vybudí kmitání až 200 Hz. Za určitou krátkou dobu kmitání se dosáhne rezonance mezi kmitočtem vibrátoru a svarku. Po výdrži 0,5 až 5 minut (podle materiálu, hmotnosti svarku a použité frekvence kmitů) se zvýší frekvence vibrátoru a provede se další vibrování svarku. Je nutno použít alespoň tři rezonanční frekvence. Přetvárná síla kmitání vyvolá v místech napěťových špiček místní plastickou deformaci. Dojde k přerozdělení vnitřních pnutí ve svarku a jejich celkovému snížení a k dosažení rozměrové stability svarku. Vibrování bylo úspěšně použito pro svarky z ocelí uhlíkových, nízkolegovaných i vysocelegovaných. Nemůže ale nahradit tepelné zpracování v těch případech, kdy se tepelné zpracování předepisuje i z jiných důvodů, než je dosažení rozměrové stability svarku.
- **Žihání ke snížení pnutí** svarků z konstrukčních ocelí se provádí při teplotě 550 až 650 °C, podle druhu oceli. Při teplotě žihání se vnitřní pnutí uvolňuje plastickou

deformací. Jistá hladina pnutí ve svarku ale zůstává i po správně provedeném žihání ke snížení pnutí (termín žihání k odstranění pnutí proto není přesný). Deformace vzniklé svařováním se žiháním ke snížení pnutí neodstraní, spíše naopak. Mohou vzniknout nové deformace, není-li při žihání a při ochlazování zajištěno rovnoměrné rozložení teploty v celém svarku. To platí zejména při žihání členitých svařených konstrukcí. Žihání je časově i energeticky náročné, má se volit proto pouze v technicky zdůvodněných případech. Předpisy pro žihání svarků ocelí třídy 11, 12 jsou uvedeny v normě [6], pro oceli třídy 13 a 15 v normě [7]. Žihání ke snížení vnitřního pnutí se nejčastěji provádí v peci, ale lze ho provést i místně (např. svary potrubí, montážní svary nádob pro chemii a energetiku) pomocí např. topných pasů. Šířka b ohřátého pásma na každou stranu od osy svaru má přitom být [1]:

$$b = 2\sqrt{R \cdot h} \quad (mm) \quad (2.1)$$

R ... střední poloměr např. potrubí (mm)

h ... tloušťka stěny (mm)

Účelem žihání ke snížení pnutí je snížit hladinu vnitřního pnutí ve svarku, zvýšit rozměrovou stabilitu svarku při jeho opracování, snížit obsah vodíku ve svarovém spoji a zlepšit plastické vlastnosti ve svarovém kovu a v TOO.

2.6 Vliv vnitřních pnutí na chování konstrukce v provozu

Vnitřní pnutí vzniklé při svařování má za následek nejen vznik rozměrových a tvarových změn svarků nebo vznik trhlin ve svarovém kovu či v TOO. Má vliv i na funkční způsobilost a bezpečnost provozu a životnost zejména tlustostěnných konstrukcí nebo konstrukcí vyrobených z materiálů o vyšší pevnosti a s nízkými plastickými vlastnostmi.

Obecně platí, že chování svařované konstrukce při daném provozním zatížení je ovlivněno hlavně chemickým složením základního materiálu a svarového kovu, mikrostrukturou svarového spoje a vnitřním pnutím. To může měnit svou velikost i rozložení ve svarku vlivem vnějšího zatížení nebo teploty. Vnitřní pnutí se při provozu konstrukce připočítávají k napětí od vnějšího zatížení. Jejich vliv bude záviset na způsobu namáhání konstrukce a na způsobu porušování materiálu.

Při **statickém namáhání** vnitřní pnutí nesnižuje pevnost svařené konstrukce. Pouze odčerpává deformační schopnost materiálu.

Při **dynamickém namáhání** vnitřní pnutí výrazně snižuje mez únavy svarových spojů a to zejména u ocelí o vyšší pevnosti.

U materiálů, které jsou v **houževnatém stavu** a mají dostatečnou deformační schopnost vnitřní pnutí při zatěžování relaxují a neovlivní jejich případné porušení houževnatým lomem.

U materiálů, které jsou v **křehkém stavu** tahové vnitřní pnutí obecně snižuje odolnost proti porušení křehkým lomem. Tahové vnitřní pnutí výrazně usnadní vznik trhlin zejména v kořeni vrubu. Křehké porušení svařované konstrukce obecně nastane tehdy, když dojde ke koncentraci napětí a k poklesu teploty.

Při únavovém namáhání v oblasti **nízkokmitové únavy** vnitřní pnutí rychle relaxuje a neprojeví se na únavové pevnosti. Při únavovém namáhání v oblasti **vysokokmitové únavy** tahové vnitřní pnutí únavovou pevnost mírně snižuje, tlakové vnitřní pnutí ji mírně zvyšuje.

Praskání **korozí pod napětím** je výrazně urychlováno působením tahových vnitřních pnutí.

Literatura

HRIVŇÁK, J. aj.: Přednášky v kurzu svářečských technologií. VÚZ Bratislava, 1985.

KOVAŘÍK, R.: Přednášky předmětu Teorie svařování. ZČU v Plzni, 1998.

KÖNIG, R.: Přednášky předmětu Schweißtechnik. Strojní fakulta Fachhochschule Regensburg, 1993.

NEUMANN, A.: Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure. Teil I: Grundlagen, Tragfähigkeit. DVS Verlag Düsseldorf, 1996.

ČSN 05 0000. Zváranie. Zváranie kovov. Základní pojmy, 1978.

ČSN 42 0284. Předpisy pro zpracování uhlíkových ocelí třídy 11, 12 a ocelí na odlitky třídy 26, užívaných pro stavbu parních kotlů, parovodů a tlakových nádob, 1970.

ČSN 42 0285. Předpisy pro zpracování legovaných ocelí třídy 13 a 15 a ocelí na odlitky třídy 27, 1970.

3. ÚVOD DO LOMOVÉ MECHANIKY A ÚNAVA MATERIÁLU

Obecně používaným kritériem pro hodnocení konstrukčních ocelí při statickém namáhání je diagram zkoušky tahem a z něho vyplývající mechanické charakteristiky R_e , R_m , A , Z . Svařované konstrukce je nutno hodnotit i z hlediska jejich křehkého porušení. To se provádí buď přístupem přechodové (tranzitní) teploty nebo přístupem lomové mechaniky. Přístup podle přechodové teploty vyžaduje, aby se konstrukce vyrobila z takových materiálů, jejichž přechodová teplota z houževnatého do křehkého porušení leží níže, než je nejnižší pracovní teplota konstrukce. Tento přístup je jednodušší, nevyžaduje přesnou analýzu napětí ani důslednou defektoskopickou kontrolu. Přístup podle lomové mechaniky požaduje zabránit iniciaci a šíření trhliny. Vyžaduje přesný výpočet napětí a úplnou nedestruktivní kontrolu, která umožní zjistit nepřípustné vady. V normě ČSN 73 1401 [1] jsou použity oba uvedené přístupy.

3.1 Vliv vad na chování materiálu

Lomová mechanika je spojovacím článkem mezi mechanikou pevných těles a naukou o materiálu. Na rozdíl od klasické pevnosti konstrukčních dílů, kde se materiál při výpočtu uvažuje jako homogenní, bez vad a napěťových špiček, lomová mechanika vychází z předpokladů, že je v konstrukci přítomna vada typu trhliny a popisuje chování této vady při zatěžování konstrukce v provozních podmínkách.

Lomová mechanika proto poskytuje důležité informace pro zajištění bezpečnosti provozu a spolehlivosti konstrukce a zařízení. Lomová mechanika se jako nová vědní disciplína začala rozvíjet po roce 1950. Je zaměřena na vypracování zákonitostí vzniku a šíření nestabilních lomů v konstrukcích, které obsahují vady typu trhlín.

Základním principem lomové mechaniky je vzájemné posuzování napětí, která působí na trhlínu při zatížení konstrukce a posuzování schopnosti materiálu odolávat vzniku a šíření trhliny. Úkolem lomové mechaniky mj. je dát odpověď na otázku, jaká je největší přípustná délka trhliny při určitém zatížení nebo naopak jaké napětí je možno v konstrukci připustit při známé délce trhliny, jak rychle narůstá délka trhliny při daném zatížení, nebo jaká nejnižší provozní teplota je ještě přípustná. Lomová mechanika zjišťuje pomocí zkoušek [2 až 7] kritické hodnoty materiálových parametrů, při kterých se trhlina stává nestabilní a dojde k náhlému lomu.

Výskyt křehkých lomů je možný zejména u tuhých celosvařovaných konstrukcí. K řadě katastrofálních křehkých lomů došlo v roce 1938 u ocelových konstrukcí, svařených elektrickým obloukem. První křehký lom byl zjištěn na dálničním mostu Rüdersdorf u Berlína, následoval lom pouze rok starého silničního mostu u města Hasselt v Belgii. Další křehké lomy byly na svařených potrubích pro vodárny a také na tlakových nádobách. V průběhu 2. světové války došlo k náhlému rozlomení křehkým lomem u 145 amerických nákladních 10 000t lodí třídy Liberty [8]. U dalších 700 lodí Liberty z celkového vyrobeného počtu 2500 rovněž došlo k velmi vážným poruchám, které byly způsobeny lomem. V roce 1951 se rozlomil celosvařený most v Quebecu. Lom ve všech uvedených případech nastal u houževnatých ocelí s potřebnými mechanickými vlastnostmi při napětích nižších než byla

přípustná výpočtová hodnota. Provedené rozsáhlé výzkumy ukázaly, že příčinou křehkých lomů byly vady v materiálech nebo ostré konstrukční vruby, ve kterých došlo ke vzniku trojosé napjatosti a k místní koncentraci napětí. Vzhled lomů vykazoval křehký charakter a velmi malou plastickou deformaci pouze v mikroobjemech. Ke vzniku křehkého lomu přispěly nízké teploty (např. k rozlomení tankové lodě Schenectady na dvě části při kotvení v přístavu došlo při teplotě vzduchu -3°C a vody $4,5^{\circ}\text{C}$ [9]). Další příčinou vzniku těchto lomů bylo zvýšení přechodové teploty materiálu v okolí svaru v důsledku ohřevu při svařování.

Vhodnou aplikací poznatků lomové mechaniky, zabráněním vzniku míst s velkou koncentrací napětí, optimálním konstrukčním řešením a vhodnou technologií svařování lze v současné době vzniku křehkého lomu předejít. Obecně platí, že křehký lom může nastat i u nesvařované konstrukce.

Podobně jako u lomu křehkého může dojít při napětí nižším než je statická pevnost materiálu k lomu únavovému. Jeho příčinou jsou vady, např. jemné trhlinky, které se mohou vytvořit na povrchu a šířit dovnitř průřezu součásti namáhané kmitavým nebo opakujícím se zatěžováním. V případě svarového spoje je nebezpečí únavového lomu větší než u součásti, která má v celém objemu stejné vlastnosti materiálu. Svar vnáší do konstrukce vnitřní pnutí a je místem možných vad povrchových i vnitřních, které mohou být místem iniciace únavové trhlinky. Rovněž u lomu únavového obvykle není ani u houževnatých materiálů zjistitelná makroplastická deformace. Normovanými zkouškami [10 až 13] se zjišťují základní únavové charakteristiky kovů při vysokokmitové (vysokocyklové) a při nízkokmitové (nízkocyklové) únavě.

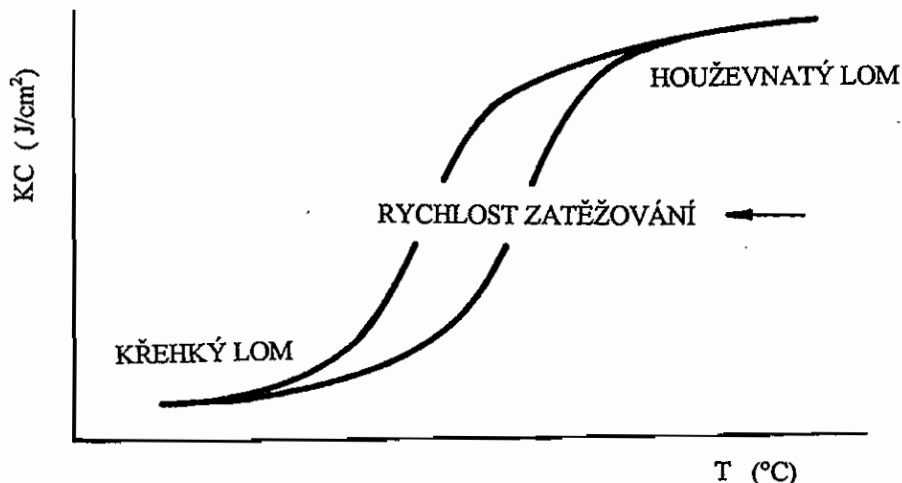
3.2 Zkoušky odolnosti proti lomům

Houževnatost lze obecně definovat jako schopnost absorbovat energii. V zatíženém tělese dochází k absorpci energie jak v etapě, která předchází porušení, tak i v průběhu lomu. Houževnatost úzce souvisí především se schopností materiálu plasticky se deformovat. Klesá-li schopnost plastické deformace (např. snížením teploty), snižuje se houževnatost materiálu. Ta je dána i typem jeho krystalové mřížky. Houževnatější jsou kovy s mřížkou kubickou plošně středěnou (Ni, Cu, Al, austenitická Cr-Ni ocel) než kovy s mřížkou kubickou prostorově středěnou (feriticko-perlitická ocel).

Houževnatost materiálu rozhoduje do značné míry i o charakteru lomu. Při nízké houževnatosti materiálu dojde ke křehkému lomu, který je doprovázen relativně malou plastickou deformací a postačuje k němu relativně malé množství energie. V případě vysoké houževnatosti materiálu dojde k houževnatému lomu, který je doprovázen plastickou deformací velkého rozsahu a vyžaduje relativně velké množství energie. Pravděpodobnost vzniku křehkého lomu v konstrukci roste s klesající teplotou a s rostoucí rychlostí jejího zatěžování, viz. obr. 3.1. Ke vzniku křehkého lomu přispívá i vliv korozního prostředí.

Zkoušky odolnosti materiálů proti vzniku a šíření lomu dávají podklady pro výběr materiálů s ohledem na snížení nebezpečí provozních poruch a údaje pro zjišťování vad a jejich opravy. Zkoušky by měly být levné a snadno proveditelné, avšak umožňující jednoznačně použít výsledky při návrhu konstrukce. Ten by měl být dostatečně bezpečný, ale bez zbytečných rezerv, aby konstrukce byla hospodárně výrobitelná. Prozatím nebyla navržena ideální lomová zkouška, která by univerzálně vyhověla. Příčinou je to, že

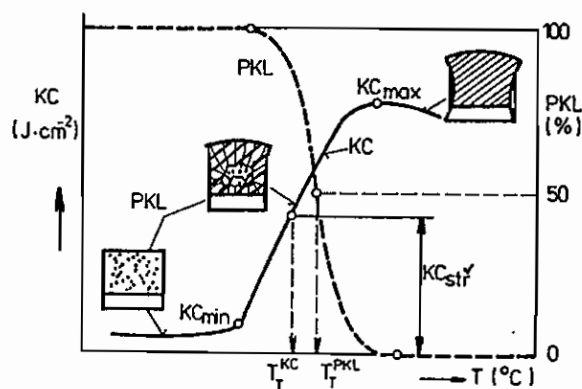
v technické praxi dochází k různým variacím lomů v závislosti na materiálech a konstrukčním řešení. Vývoj ve zkoušení a teorii lomů je podle [8 – 9, 14 - 16] uveden v tabulce 3.1.



Obr. 3.1 Vliv teploty a rychlosti zatěžování na vrubovou houževnatost feriticko-perlitické oceli

Tabulka 3.1 Vývoj ve zkoušení a teorii lomů

Rok	Zkoušky
1900	Zavedení Charpyho zkoušky , zjišťování tranzitní teploty (TT) přechodu od houževnatého ke křehkému lomu. Charpyho zkouška je zkouška rázem v ohybu [15, 16]. Při ní lze zjišťovat velikost spotřebované nárazové práce K (J) do lomu, vzhled lomu (podíl houževnatého a křehkého lomu), rozšíření zkušební tyče po lomu a vypočítat velikost vrubové houževnatosti KC ($J \cdot cm^{-2}$). Vynesením závislosti těchto hodnot na teplotě se získají přechodové křivky (viz obr. 3.2), z nichž se stanovuje tranzitní teplota TT přechodu z houževnatého do křehkého lomu. Pro definování TT se používá různých kritérií, např. TT = 50 % horní úrovně křivky, TT odpovídá hodnotě $34 J \cdot cm^{-2}$, TT = 50 % podílu křehkého lomu na lomové ploše vzorku.



Obr. 3.2 Závislost vrubové houževnatosti na teplotě

Charpyho zkouška má pro hodnocení průběhu lomu v konstrukci zřejmé technické nedostatky [14]. Nerespektuje konstrukční tloušťku materiálu, nelze rozdělit spotřebovanou nárazovou práci na podíly pro deformování a pro šíření trhliny

(to umožňuje instrumentovaná zkouška vrubové houževnatosti, kdy se zaznamenává průběh křivky síla – průhyb), vrub V u zkušební tyče je příliš tupý při srovnání s ostrou únavovou trhlinou v konstrukci. Tranzitní teplota je funkcí více proměnných. Určují ji především rozměr vzorku, tloušťka konstrukce, ostrost kořene trhliny a rychlost zatěžování.

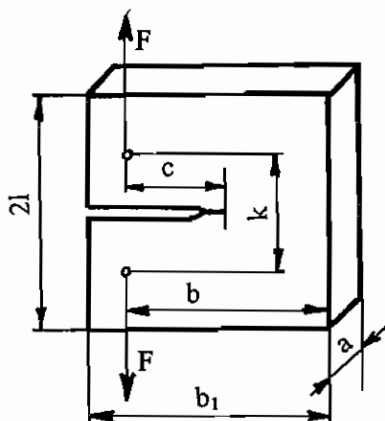
- 1920 Griffith vypracoval pro dokonale křehké materiály teoretické základy lineárně-elastické lomové mechaniky, tj. pro lineárně elastický stav napjatosti v okolí čela trhliny. Základní veličinou je **hnací síla trhliny G** ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$) neboli rychlost uvolňování deformační energie. Trhlina je stabilní, když G je menší než odpor tělesa vůči šíření trhliny.
- 1945-50 Lomy lodí Liberty. Křehký lom označen za hlavní problém u svařovaných konstrukcí.
- 1950-55 Intenzivní vývoj zkušebních metod, které by pro ocelové konstrukce vyhověly lépe než Charpyho zkouška. Tloušťky zkušebních těles, napětové stavy a velikost vad odpovídají poměrům na skutečných konstrukcích.
- **Pelliniho zkouška, zkouška DWT (Drop-Weight Test).** Zjišťuje se tranzitní teplota konstrukčních svařitelných ocelí, nad níž je ocel schopna zabránit vzniku křehkého lomu z malých vad. Ve střední části vzorku je navařena křehká housenka, ve které je upraven ostrý vrub (iniciátor trhliny). K rozlomení zkušebního tělesa se používá padostroj s měnitelnou hmotností beranu. Dále se zjišťuje teplota NDT (Nil Ductility Transition), tj. **teplota nulové houževnatosti oceli**. Pod teplotou NDT nastane úplný lom zkušebního tělesa, nad teplotou NDT pouze plastické prohnutí tělesa. Podle našich norem [3, 6] se stanovuje přechodová teplota t_{50} ($^{\circ}\text{C}$), což je teplota odpovídající 50 % podílu houževnatého lomu zkušebního tělesa nebo teplota nulové houževnatosti t_{NDT} , což je nejvyšší teplota, při které se zkušební těleso zlomí.
 - **Zkouška DT (Dynamic tear).** Stanovuje odolnost oceli proti šíření trhlín při rázu v ohybu velkých těles. K iniciaci trhliny slouží úzká křehká oblast, zhotovená na zkušebním tělese např. natavením titanu pomocí elektronového paprsku. Podle naší normy [2] se zjišťuje nárazová práce E_{DT} (J).
 - **Robertsonova zkouška** pro určení teploty zastavení trhliny TZT. Zjišťuje se schopnost oceli zastavit šířící se křehkou trhlínu. Velké tlustostěnné zkušební těleso je přivařeno k upínacím hlavicím trhacího stroje. Iniciátorem trhliny je otvor se zářezem. Ve zkušebním tělese je gradient teploty (jedna strana tělesa se ochlazuje, druhá ohřívá). Na těleso zatížené tahem se působí v místě vrubu rázem. Teplota v místě, kde se postupující trhlina zastaví, je označována jako TZT.
 - Zkouška ESSO, zkouška Niblink (autoři Nibbering a van den Blink), zkouška Van-der-Veen, zkouška DTP (Double-Tensin-Test) aj.
- 1958 Irwin a Williams definují **součinitel intenzity napětí K** ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) jako klíčový parametr pro analýzu napětí trhliny. Mezi hnací silou trhliny G a součinitelem

intenzity napětí K platí vztah

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (3.1)$$

E ... modul pružnosti v tahu (MPa)

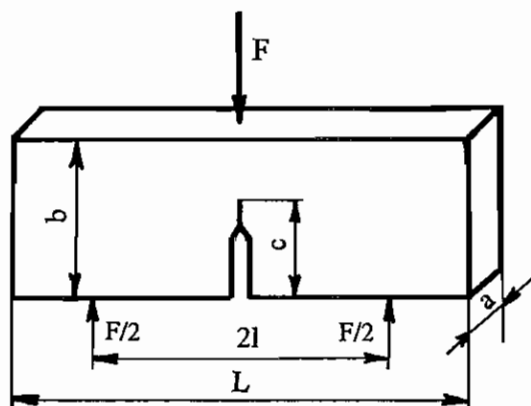
1960-70 **Zkouška lomové houževnatosti K_{IC}** při rovinné deformaci. U nás normována [4] později. Spočívá v postupném zatěžování zkušební tyče (obr. 3.4) třibodovým statickým ohybem nebo zkušebního tělesa (obr. 3.3) excentrickým tahem (kombinace tahového a ohybového napětí) při dané teplotě do lomu.



Obr. 3.3 Zkušební těleso pro zjišťování lomové houževnatosti K_{IC}

Lomová houževnatost K_{IC} je kritickou hodnotou součinitele intenzity napětí K_I v okamžiku nestabilního šíření trhliny.

- **Welsova zkouška** svarů s umělou vadou rovnoběžnou s podélnou osu svaru širokých desek, **Orowanova zkouška**, **Soeteho zkouška** (umělá vada kolmá na podélnou osu svaru). Jsou to tahové zkoušky na tělesech velkých rozměrů. Jsou vhodné pro ověření konceptů lomové mechaniky na svarových spojích. Napětový stav při nich odpovídá napětovému stavu ve skutečné konstrukci.
- **Zkouška COD** (Crack Opening Displacement) otevření trhliny, **zkouška CTOD** (Crack Tip Opening Displacement) otevření čela trhliny. Vycházejí z předpokladu, že u houževnatého materiálu lom není řízen kritickým součinitelem intenzity napětí na čele trhliny, ale že rozběh trhliny nastane v okamžiku, kdy otevření v kořeni trhliny dosáhne hodnoty δ_c . Kritické otevření v kořeni trhliny se zjišťuje při statickém postupném zatěžování zkušebního tělesa (obr. 3.4).



Obr. 3.4 Zkušební tyč pro zjišťování lomové houževnatosti K_{IC} a pro zjišťování kritického rozevření v kořeni trhliny δ_c

- 1968 Rice a Eshelby definují **J-integrál**. Bylo zjištěno, že Griffithovo kritérium stability trhliny, vyjádřené pomocí hnací síly G , nelze použít v případě, že v deformovaném tělese dojde na čele trhliny ke vzniku plastické deformace většího rozsahu. J-integrál je zobecněním hnací síly G pro případy, kdy dochází k zplastizování na čele trhliny. J-integrál charakterizuje pole napjatosti a deformace v okolí trhliny.
- 1970-90 Rozvoj použití **metody konečných prvků MKP** a **metody konečných diferencí MKD** pro určování napjatosti v tělesech s trhlínami a pro výpočet hodnot K_I , δ , J_I – integrálu pro daný tvar tělesa, velikost trhliny a způsob namáhání.
- 1985-92 Evropská a mezinárodní standardizace zkoušení J integrálu a CTOD. Definice T-napětí jako nového dokonalejšího parametru k charakterizování stavu napětí v kořeni trhliny. Snahy o normalizaci zkoušek v oboru lomové mechaniky [17].

3.3 Základní přístupy lomové mechaniky

Mechanika lomu se podle řešení podmínek nestabilního šíření trhlín a podle definování materiálových konstant, které charakterizují odolnost materiálů proti šíření trhlín dělí na dva základní přístupy. Těmi jsou:

- **Lineární lomová mechanika.** Předpokládá, že se materiál v okolí trhliny deformuje pouze ve velmi malé mikrooblasti. Rozměr této plastické mikrooblasti je podstatně menší než délka trhliny a než rozměr tělesa ve směru jejího šíření.
- **Elasticko-plastická lomová mechanika.** Uvažuje makroplastickou deformaci v okolí trhliny při vzniku a zejména při šíření lomu.

Lineární lomová mechanika (někdy též lineárně-elastická lomová mechanika či LELM) byla navržena před 80 lety Griffithem pro dokonale křehký materiál typu skla. Posuzuje stabilitu eliptické trhliny v nekonečně velkém tělese zatíženém tahovým napětím.

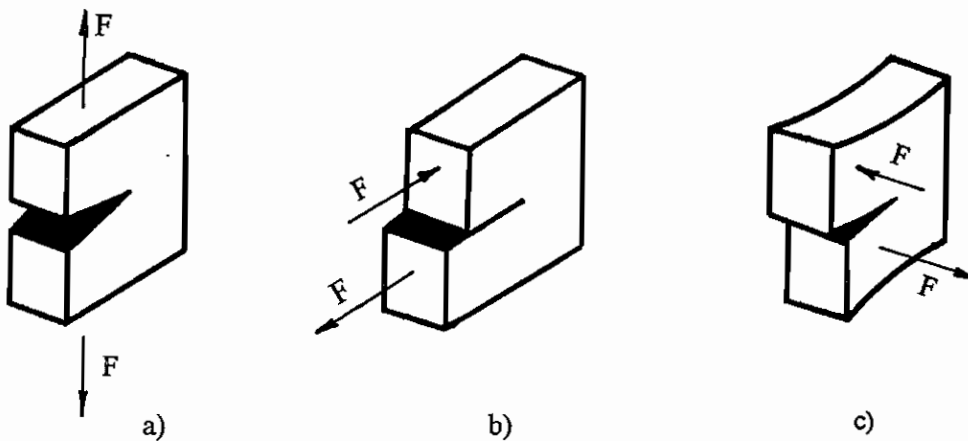
Předpokládá, že v celém průběhu od zatížení tělesa až do jeho lomu platí lineární vztah mezi napětím a deformací. Ze vztahů, které Griffith odvodil pro napětí v kořeni trhliny vyplývá, že se trhlina nemůže v tuhé látce rychle rozšířit, dokud práce nutná k vytvoření nových povrchů lomové plochy není vyvážena elastickou deformační energií uvolňovanou při růstu trhliny. Rozvoj LELM umožnily práce Irwina (zkoušel hliníkové slitiny a plasty) a Orowana (zkoušel oceli). Zjistili, že lokální (místní) napětí v blízkosti trhliny je v libovolném bodě úměrné velikosti působícího napětí a druhé odmocniny délky trhliny. Pro tento součinn byl zaveden pojem **součinitel intenzity napětí K**. Pro desku s nekonečnou šířkou a napětím působícím kolmo na směr šíření trhliny platí vztah:

$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad \left(\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \right) \quad (3.2)$$

σ ... napětí (MPa)
 a ... poloviční délka trhliny (m)

Na rozdíl od klasické mechaniky nepracuje lomová mechanika s napětím, ale se součinitelem intenzity napětí, neurčuje pevnost, ale lomovou houževnatost. Součinitel intenzity napětí jednoznačně charakterizuje lokální koncentraci napětí na čele trhliny. S rostoucí koncentrací napětí roste snaha trhliny šířit se materiálem, roste hnací síla trhliny G , definovaná jako rychlost uvolňování elastické energie tělesa s trhlinou. Proti hnací síle G působí rostoucí odpor materiálu proti šíření trhliny. Nestabilita trhliny, při níž dochází k náhlému nekontrolovatelnému šíření trhliny nastane v okamžiku, kdy součinitel intenzity napětí K dosáhne své kritické hodnoty K_c .

Pro tělesa libovolných rozměrů a libovolné tvary vad hodnota K závisí na velikosti poloviční délky trhliny a na rozměru tělesa ve směru šíření trhliny. Lomová mechanika uvažuje tři základní možnosti porušování, tj. rozevírání trhliny (viz obr. 3.5), označené jako mód I, II, III.



Obr. 3.5 Základní možnosti porušování materiálu lomem
 a) I–tahový mód; b) II–rovinný smykový mód;
 c) III–antirovinný smykový mód

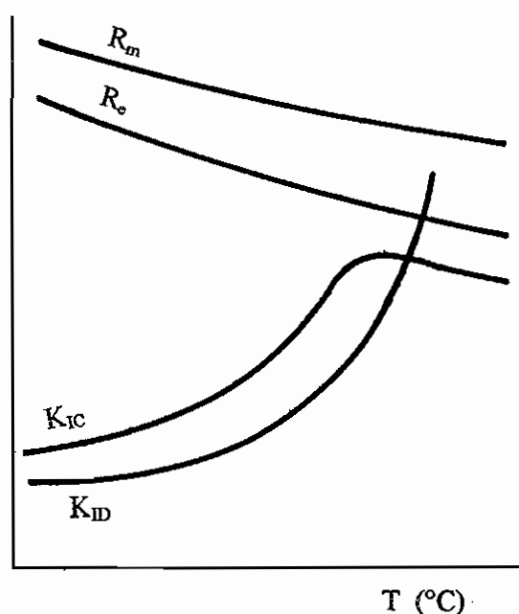
Převládajícím a proto nejvíce prostudovaným je tahový mód I, při kterém vnější síla působí kolmo na rovinu lomu. Při něm mohou v závislosti na tloušťce tělesa nastat v kořeni trhliny dva případy napjatosti. 1) U velmi tenké desky nebo na povrchu tlusté desky bude rovinná (dvouosá) napjatost. 2) Uvnitř tlusté desky (ideálně při nekonečně velké tloušťce) je **stav rovinné deformace**. Při ní je deformace (přetvoření) ve směru tloušťky zanedbatelná, jde vlastně o zvláštní druh trojosé napjatosti.

Velikost K_c je do dosažení stavu rovinné deformace závislá na tloušťce tělesa, ve stavu rovinné deformace už na tloušťce tělesa nezávisí. **Lomová houževnatost K_{IC} při rovinné deformaci** je kritickou hodnotou součinitele intenzity napětí K_I v okamžiku nestabilního šíření trhliny. Zjišťuje se normovanou zkouškou, u nás je to podle normy [4]. Velikost lomové houževnatosti K_{IC} závisí zejména na materiálu tělesa (chemické složení, struktura, tepelné zpracování), teplotě (viz obr. 3.6), rychlosti deformace a na agresivitě prostředí. Nezávisí na rozměru zkušebního tělesa (v podmínkách dostatečně tlustých těles, tj. při rovinné deformaci).

Všeobecně platí, že hodnota K_{IC} při vzrůstu pevnosti materiálu klesá. Z obr. 3.6 vyplývá, že s klesající teplotou lomová houževnatost (a tedy i odolnost proti křehkému porušení) klesá. Mez kluzu naopak s klesající teplotou obvykle roste. Proto u tělesa bez trhliny odolnost proti statickému porušení s klesající teplotou roste, ale u tělesa s trhlinou klesá. Na to je nutno brát zřetel při návrhu svařované konstrukce.

Zkouška lomové houževnatosti K_{IC} při rovinné deformaci probíhá při postupném kvazistatickém zatěžování stanovenou rychlostí [4]. Zjišťuje se i lomová houževnatost při rázovém, dynamickém zatěžování K_{ID} . Její hodnoty jsou nižší než hodnoty K_{IC} . Lomová houževnatost se výrazně snižuje vlivem koroze, zjišťuje se při korozi pod napětím K_{ISCC} .

Má-li být konstrukce bezpečná proti náhlému křehkému porušení, musí být K_{IC} větší, než je součinitel intenzity napětí v kritickém místě konstrukce K_{max} . Pomocí lomové mechaniky je možno rozhodnout, které vady je nutno opravit a které ponechat bez opravy a sledovat rychlost jejich stabilního růstu při provozu či při periodických defektoskopických kontrolách.



Obr. 3.6 Závislost lomové houževnatosti a pevnostních charakteristik oceli na teplotě

Při hodnocení K_{IC} musí být zajištěn předpoklad, že rozsah plastické deformace v okolí trhliny je velmi malý a až do okamžiku lomu je zde čistě elastická napjatost. To je uspokojivě splněno např. u ocelí vyšších pevností po zušlechtnění nebo u vytvrzených Al slitin. U konstrukčních houževnatých ocelí je uvedený předpoklad splněn jen při nízkých teplotách a nebo při velkých tloušťkách desek. Potom K_{IC} nezávisí na geometrii a je jedinou charakteristikou houževnatosti materiálu. V ostatních případech a u jiných materiálů nelze použít koncept LELM.

Elasticko-plastická lomová mechanika (EPLM) platí pro běžné nízkouhlíkové a nízkolegované oceli o nízké a střední pevnosti, u kterých vzniká na čele trhliny před dosažením okamžiku nestability rozsáhlá plastická oblast. Pro vyjádření podmínky nestability trhliny je proto nutno použít jiné parametry než byly použity u LELM. Dvěma základními parametry jsou:

- Kritické otevření trhliny COD a
- Riceho J-integrál

Parametr **kritické otevření trhliny COD** uvažuje, že k nestabilnímu křehkému lomu dojde v okamžiku, kdy na rozhraní mezi elasticky a plasticky deformovanou oblastí před čelem trhliny dojde ke kritickému otevření trhliny δ_c . Hodnota δ_c vyjadřuje odolnost ocelí nízké a střední pevnosti proti vzniku nestabilního lomu. Zjišťování δ_c se provádí podle norem, u nás je to norma [5]. Na rozdíl od K_{IC} není δ_c materiálovou konstantou, závisí na rozměrech tělesa. S rostoucí teplotou δ_c stoupá, ale po dosažení jisté teploty se dále nemění. Zkouška COD se používá zejména pro svary [14], vyhovuje dobře pro štěpné lomy.

Parametr **Riceho J-integrál** je založen na energetické bilanci v okolí šířící se trhliny. Představuje velikost úbytku deformační energie tělesa při rozevření trhliny. Je to parametr dobře použitelný pro tvárný lom. Udává hnací sílu, která působí na trhlinu a na plastickou oblast. J-integrál je definován jako uzavřený integrál po křivce, která obklopuje čelo trhliny. Trhlina je stabilní, pokud hodnota J-integrálu je menší než je kritická hodnota J_{IC} . Měření hodnoty J_{IC} se provádí na zkušebních tyčích namáhaných tříbodovým ohybem nebo na zkušebních tělesech namáhaných excentrickým tahem. Existuje vazba mezi J_{IC} a K_{IC} . Měření J_{IC} se používá u vysoce houževnatých materiálů, je výhodnější než měření δ_c .

Materiálové charakteristiky K_{IC} a J_{IC} , δ_c jsou závislé na teplotě. Jejich stanovení vyžaduje experimentálně náročný postup a zkoušky pro jejich zjištění jsou proto finančně nákladné. Je trvalá snaha nahradit tyto zkoušky levnějšími zkouškami a odvodit charakteristiky lomové houževnatosti např. ze zjištěných hodnot vrubové houževnatosti. Mezi lomovou houževnatostí K_{IC} a vrubovou houževnatostí KCV však není dobrá souvislost. Při zkoušce K_{IC} je zatěžování statické, zkušební těleso má větší rozměry a je opatřené hlubokým vrubem, ukončeným únavovou trhlinou. Při zkoušce KCV je zatížení rázové, zkušební těleso je malé a má ve srovnání s trhlinou mělký tupý vrub. Při zkoušce K_{IC} odpovídá tloušťka zkušebního tělesa tloušťce konstrukce lépe, než při zkoušce KCV, kdy je nutno zkušební tyče odebírat z více míst po tloušťce. Těleso při K_{IC} je namáháno quasistaticky, při KCV dynamicky. Pro vzájemnou souvislost mezi hodnotami K_{IC} je uváděno více vztahů. Pro oceli tlakových nádob jaderných reaktorů se např. v USA používá vztah [8]:

$$K_{IC} = 462 \sqrt{KCV} \quad (3.3)$$

Svarový spoj odolný proti křehkému porušení musí mít potřebnou lomovou houževnatost v TOO i ve svarovém kovu, vady ve spoji musí být menší než je přípustný největší rozměr trhliny a musí v něm být co nejmenší vnitřní pnutí. Základní materiál musí mít navíc co nejnižší teplotu zastavení trhliny.

3.4 Únava materiálu

Únava materiálu je postupné hromadění poškození materiálu vlivem zatěžování kmitavého charakteru, které vede ke změnám vlastností, ke vzniku a růstu trhlin a k porušení materiálu. Únavový lom je i u plastických materiálů charakterizován třemi oblastmi. První oblast je oblast počátku únavového lomu. Obvykle je na obvodu součásti, kde je největší koncentrace napětí při kmitavém zatěžování, nebo v místě materiálových vad. Povrch lomu je v tomto tzv. ohnisku porušení matný. Druhá oblast lomu odpovídá postupnému růstu únavových trhlin. Nazývá se oblast dynamického lomu. Má povrch omačkaný, sametově lesklý, jemný, lasturový. Třetí oblast se nazývá dolom. Je to oblast náhlého dolomení, má vzhled hrubě krystalický, stříbřitě lesklý. Probíhá transkrystalicky. Únavový lom nevykazuje zřetelné makroskopické trvalé deformace.

Mezi základní příčiny vzniku únavového lomu patří:

- Provozní podmínky nevhodné pro danou součást, např. přetěžování, výskyt rezonance, koroze, prudké změny teploty.
- Nesprávné konstrukční řešení součásti, např. ostré osazení, náhlé změny průřezů, vruby.
- Nevhodná jakost materiálu, póry nebo nekovové vměsky, textura, vnitřní pnutí.
- Nesprávné provedení povrchu, např. ponechání stop obrábění, povrchové rýhy.

V mnoha případech se vyskytuje několik příčin najednou.

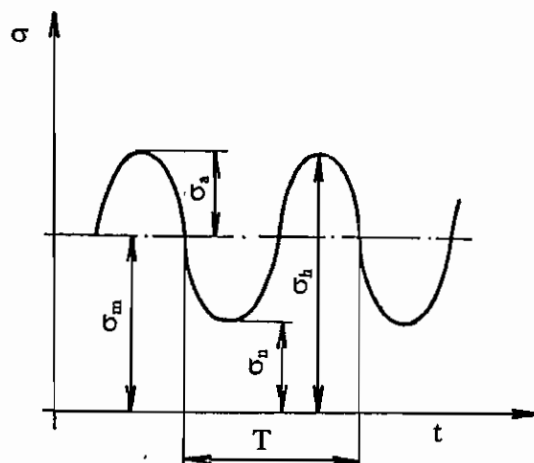
Únavový proces má obecně tři fáze. Nejprve dochází v celém objemu součásti ke změně vlastností a substruktury materiálu (hromadění mřížkových poruch, zvyšování hustoty dislokací v lokálních objemech, zvýšení mikrotvrdosti a meze kluzu, změna elektrických vlastností). V další fázi dochází k tvorbě skluzových pásů v jednotlivých zrnech materiálu a k tvorbě mikrotrhlin v povrchovém reliéfu. V konečné fázi únavového procesu dojde k šíření trhlin za hranice zrn, ke zmenšování nosného průřezu a nakonec k náhlému lomu.

• Kmitavé zatížení

Kmitavá zatížení, kterými jsou konstrukce při provozu namáhány, mají obvykle složitý časový průběh. V obecném pojetí kmitavé procesy u většiny konstrukcí obsahují složku **systematickou (deterministickou)**, tj. určující a složku **náhodnou (stochastickou)**. Kmitavý proces deterministický může být periodický (obr. 3.7) nebo neperiodický. Náhodný proces nezávislý na čase se nazývá proces stacionární (v praxi nejčastější), u procesu nestacionárního se jeho některá charakteristika mění s časem.

Náhodné zatěžování nemůže být popsáno žádným přesným matematickým výrazem, ale pouze jeho statistickými charakteristikami. Statisticky zpracovaný soubor kmitů náhodného průběhu (nejlépe odměřený přímo v provozu) se nazývá **zatěžovací spektrum kmitů**. To slouží jako vstupní údaj pro přípravu laboratorních zkoušek životnosti, které simulují provozní namáhání. Postup kumulace poškození při kmitavém namáhání je popisován více hypotézami. Nejstarší a nejjednodušší je hypotéza podle Palmagrena-

Minera. Ta předpokládá rovnoměrný lineární nárůst poškození s každým kmitem dané amplitudy.



Obr. 3.7 Kmit napětí

U kmitu napětí se rozlišují [10]:

σ_h ... horní napětí kmitu

σ_n ... dolní napětí kmitu

σ_m ... střední napětí kmitu (algebraická střední hodnota horního a dolního napětí kmitu)

σ_a ... amplituda (výkmit) napětí (polovina algebraického rozdílu horního a dolního napětí kmitu)



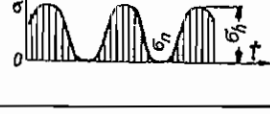


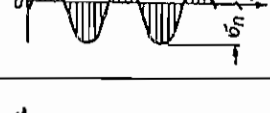

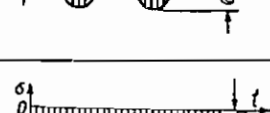
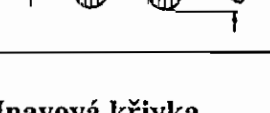
T ... perioda (doba) kmitu

f ... kmitočet (frekvence). Je to počet kmitů za jednotku času, $f = 1/T$.

r_σ ... součinitel nesouměrnosti kmitu napětí, $r_\sigma = \sigma_n/\sigma_h$. Má hodnotu $-\infty \leq r_\sigma \leq +\infty$.

Typy kmitů podle nesouměrnosti jsou uvedeny v tabulce 3.2.

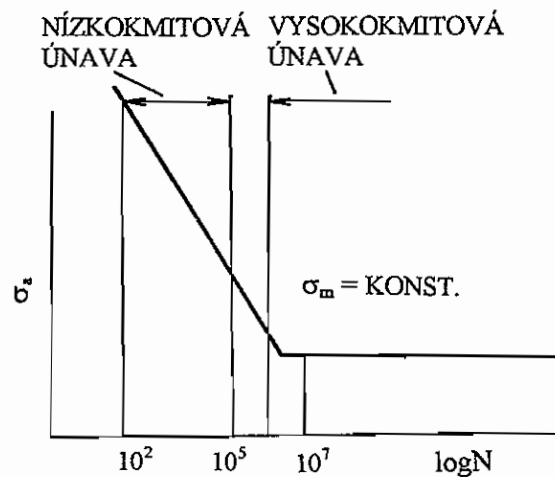
Tab. 3.2 Typy kmitů podle nesouměrnosti

	Diagram závislosti σ - čas	Napětí	σ_h, σ_n	σ_m	σ_a	r_σ
1		neměnné v tahu	$\sigma_h = \sigma_n > 0$	$\sigma_h = \sigma_n$	0	+1
2		pulsující v tahu	$\sigma_h > 0$ $\sigma_n > 0$	> 0	$\neq 0$	$0 < r < +1$
3		míjivé v tahu	$\sigma_h > 0$ $\sigma_n = 0$	$\frac{1}{2}\sigma_h$	$\frac{1}{2}\sigma_h$	0
4		nesouměrné	$\sigma_h > 0$ $\sigma_n < 0$ $\sigma_h > \sigma_n $	> 0	$\neq 0$	$-1 < r < 0$
5		souměrné	$\sigma_h = -\sigma_n > 0$ $\sigma_n < 0$	0	$\sigma_h = \sigma_n $	-1
6		nesouměrné	$\sigma_h > 0$ $\sigma_n < 0$ $\sigma_h < \sigma_n $	< 0	$\neq 0$	$-\infty < r < -1$
7		míjivé v tlaku	$\sigma_h = 0$ $\sigma_n < 0$	$\frac{1}{2}\sigma_n$	$\frac{1}{2} \sigma_n $	$-\infty$
8		pulsující v tlaku	$\sigma_h < 0$ $\sigma_n < 0$	< 0	$\neq 0$	$+1 < r < +\infty$
9		neměnné v tlaku	$\sigma_h = \sigma_n < 0$	$\sigma_h = \sigma_n$	0	+1

• Únavová křivka

Při zkouškách únavy je výsledkem **únavová životnost**. Je definována počtem kmitů do lomu nebo jiného mezního únavového porušení (vznik viditelné trhliny určité délky, určitá rychlost růstu únavové trhliny aj.). Křivka proložená naměřenými hodnotami únavové životnosti u série stejných zkušebních tyčí se nazývá únavová křivka. Únavové křivky proložené body naměřenými při zkouškách se stálým středním napětím kmitu nebo při stálém součiniteli nesouměrnosti r se nazývají **Wöhlerovými křivkami** (A. Wöhler 1870). Označují se také jako křivky σ -N nebo S-N (stress-number of cycles curve). Z praktických důvodů

se Wöhlerova křivka nekreslí v rovnoměrných stupnicích (σ - N), ale ve stupnicích semilogaritmických (σ - $\log N$) – viz obr. 3.8 nebo logaritmických ($\log \sigma$ - $\log N$).



Obr. 3.8 Únavová křivka

V první části diagramu asi do $N = 10^2$ zůstává napětí téměř konstantní a je srovnatelné s mezí pevnosti materiálu. Je to tzv. **oblast statické pevnosti**. Ve střední části napětí klesá s počtem cyklů. Tuto oblast označujeme jako **časovanou pevnost**. Je rozhodující v případech záměrně omezené životnosti stroje z důvodu bezpečnosti (např. letecké motory). Časovaná pevnost je kritériem i u materiálů, které nemají mez únavy při dosažení počtu cyklů $N = 10^8$ až 10^9 . V těchto případech se určuje **časovaná mez únavy** jako hodnota kmitavého napětí, které odpovídá předepsané životnosti N kmitů. Při dosažení charakteristického počtu cyklů (u ocelí $N \cong 10^7$) se křivka lomí a napětí zůstává při dalším zvyšování cyklů v celé oblasti **dlouhodobé pevnosti** konstantní. Toto mezní napětí se označuje jako **mez únavy σ_c** .

Při kmitavém zatěžování s amplitudou nižší než je mez únavy nehrozí nebezpečí únavového lomu (pokud se ale nevyskytne výrobní vada nebo vada materiálu). **Únavová pevnost** je schopnost materiálu konstrukce odolávat únavě. Je to pouze nadřazený pojem pro pevnostní únavové charakteristiky. Mez únavy není charakteristickou vlastností všech materiálů. U ocelí uhlíkových i legovaných je za normální teploty vyjádřena mezním počtem cyklů $N \cong 10^7$, klesá u nich ale vlivem vysokých teplot nebo při korozi. U slitin hliníku vykazuje Wöhlerova křivka mírný pokles až do $N = 10^9$, u plastických hmot klesá stále.

Zkušenosti ukazují, že malý počet kmitů relativně vysokého přetížení nebo větší počet kmitů malého přetížení nemá vliv na mez únavy. Přípustný počet cyklů daného přetížení je možno určit zkouškou. Hranici mezi oblastí přípustného a nepřípustného přetížení tvoří tzv. **Frenchova čára**. Čím je strmější, tj. bližší Wöhlerově čáře, tím vyšší je přípustné přetížení a tím menší je tedy citlivost materiálu na přetížení. U jemnozrnných materiálů s větší houževnatostí je Frenchova čára strmější než u materiálů hrubozrnných.

3.5 Zkoušky únavy

Zkoušky únavy se provádějí podle norem [11 až 13]. Ke zkouškám se používají obvykle zkušební tyče kruhové a ploché hladké nebo kruhové a ploché vrubované. Někdy se zkoušky únavy provádějí i na modelech, strojních částech nebo konstrukčních celcích,

např. na celém podvozku trolejbusu. Při zkouškách únavy se jako druh namáhání volí tah, tlak, tah-tlak, ohyb plochý, ohyb za rotace, krut nebo kombinace více druhů namáhání. Způsob namáhání je pulzující, míjivý nebo střídavý. Zkouší se obvykle za normální teploty. Lze zkoušet také při vyšších nebo nižších teplotách, kdy se teplota měří termočlánky, upevněnými přímo na zkušební tyči. Prostředí při únavové zkoušce je obvykle normální, chemicky neagresivní. Provádí-li se zkoušky v korozním prostředí, jedná se o zkoušky **únavy za koroze**. Koroze probíhá současně se zatěžováním a má značně nepříznivý vliv. Korodované částičky vyplňují únavovou trhlinu a působí jako klín, který zrychluje šíření trhliny. Zkoušku únavy za koroze je nutno odlišit od zkoušky únavy již předem korodovaných zkušebních těles. U nich nastává porucha obvykle v části korodované, která působí jako vruby. Mez únavy je nižší než u stejných zkušebních tyčí bez koroze.

Nízkokmitová únava je při životnosti do 10^5 kmitů při opakovaném namáhání nad mezí kluzu. Je to únava, kdy dochází k výrazným opakovaným plastickým deformacím v makroobjemu materiálu. Období nukleace únavové trhliny je krátké, o životnosti součásti rozhoduje rychlost šíření trhliny. Mezi trvalou deformací ε_p a počtem kmitů do porušení N_F platí **Manson-Coffinův vztah**:

$$\varepsilon_p \cdot N_F^\alpha = C \quad (3.4)$$

ε_p ... amplituda poměrné plastické deformace
 C, α .. materiálové konstanty

Zvláštním případem nízkokmitové únavy je **tepelná únava**. Při ní vzniká plastická deformace následkem častých změn teplot materiálu.

Vysokokmitová únava je při životnosti více než 10^5 kmitů při opakovaném namáhání vždy pod mezí kluzu. Vzniká v podmínkách převážně elastických opakovaných mikroplastických deformací. Pro životnost součásti je rozhodující dlouhý časový úsek, potřebný ke vzniku únavové mikrotrhliny. Závěrečný lom nastane po dosažení **únavové lomové houževnatosti** K_{ac} .

Zkouška vysokokmitové únavy se provádí při kmitočtu 10 – 200 Hz ($600 - 12000$ kmitů. min^{-1}). Časový průběh amplitudy zatížení má téměř vždy sinusový charakter. Výsledkem zkoušek skupiny stejných zkušebních tyčí, ale zkoušených při různých hladinách zatížení, je únavová (Wöhlerova) křivka a hodnota meze únavy σ_C . Při zkoušce se stanoví počet kmitů do zlomení tyče nebo je kritériem ukončení zkoušky vznik viditelné trhliny. Pro stanovení šikmé větve Wöhlerovy křivky se používá nejméně osm zkušebních tyčí, pro celou křivku nejméně deset tyčí. Namáhání první tyče se volí tak, aby došlo k lomu. U dalších tyčí se napětí postupně snižuje a měří se počet kmitů do lomu.

Zkouška nízkokmitové únavy se provádí při kmitočtu obvykle do 3 Hz. Časový průběh deformace bývá sinusový, trojúhelníkový nebo lichoběžníkový. Většinou se zkouší tah-tlak. Výsledky se vyhodnocují při životnosti $10^2 - 10^5$ kmitů. Z výsledků se stanovuje závislost mezi hodnotami amplitud poměrné celkové, plastické, případně elastické deformace a mezi počtem kmitů do ukončení zkoušky. Pro stanovení křivek nízkokmitové únavy se používá nejméně osm zkušebních tyčí.

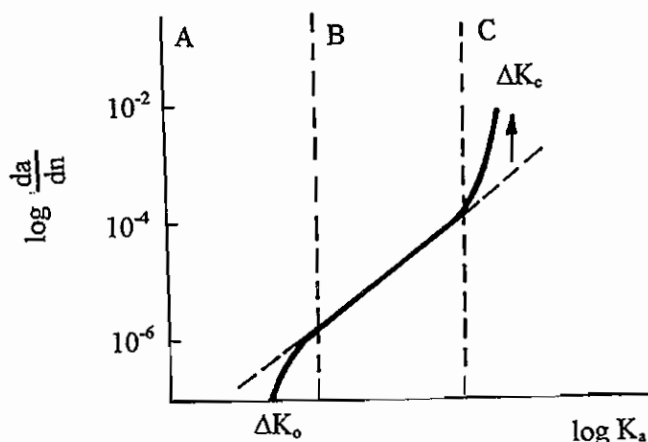
3.6 Únavová lomová houževnatost

Kmitavé (cyklické) zatěžování způsobí, že velikost napětí a tím i plastická odolnost v kořeni trhliny se opakovaně mění a vytváří složité poměry v kořeni trhliny. Podle přístupu lomové mechaniky lze růst únavové trhliny charakterizovat poměrem da/dn , tj. přírůstkem délky trhliny k přírůstku počtu kmitů, resp. za jeden zatěžovací kmit. Charakteristická materiálová veličina je zde **amplituda součinitele intenzity napětí** K_a . K_a je analogie ke K_I při zatěžování tahem, závisí na podmínkách zatěžování a na geometrii tělesa. Platí vztah:

$$K_a = \frac{\Delta K}{2} = K_{\max} - K_{\min} \quad (3.5)$$

ΔK ... rozkmit součinitele intenzity napětí
 K_{\max}, K_{\min} ... součinitelé intenzity napětí odpovídající hornímu a dolnímu napětí kmitu při zatěžování

Rychlost šíření únavové trhliny výrazně závisí na amplitudě součinu intenzity napětí, viz. obr. 3.9.



Obr. 3.9 Rychlost šíření trhliny při kmitavém zatěžování

Únavová trhlina se začíná šířit měřitelnou rychlostí v okamžiku, kdy K_a dosáhne prahové hodnoty K_{apz} . K_{apz} je materiálová konstanta. Značný vliv na ni má vnitřní pnutí v tělese. V oblasti A je trhlina zcela zastavena. V oblasti B probíhá stabilní šíření únavové trhliny. Tato lineární část křivky se vyjadřuje Paris-Erdoganovým zákonem:

$$\frac{da}{dn} = A \cdot K_a^\beta \quad (3.6)$$

A, β ... materiálové charakteristiky

V oblasti C se zvyšuje rychlost šíření trhliny a blíží se ke kritické hodnotě K_{ac} . Po jejím překročení se trhlina nekontrolovatelně rychle rozběhne a dojde k lomu. K_{ac} se označuje jako **únavová lomová houževnatost**. Je to hodnota součinitele intenzity napětí, při kterém pro dané horní napětí kmitu a danou délku trhliny přejde únavové šíření v nestabilní šíření.

Literatura

- ČSN 73 1401. Navrhování ocelových konstrukcí, 1998.
- ČSN 42 0340. Zkoušení kovů. Zkouška rázem v ohybu velkých těles, 1982.
- ČSN 42 0346. Zkoušení kovů. Stanovení přechodové teploty konstrukčních ocelí zkouškou rázem v ohybu velkých těles původní tloušťky, 1979.
- ČSN 42 0347. Zkoušení kovů. Lomová houževnatost kovů při statickém zatížení, 1991.
- ČSN 42 0348. Zkoušení kovů. Stanovení kritického rozevření v kořeni trhliny při statickém namáhání.
- ČSN 42 0349. Zkoušení kovů. Stanovení teploty nulové houževnatosti konstrukčních ocelí, 1990.
- ČSN 42 0350. Zkoušení kovů. Stanovení teploty křehkosti konstrukčních ocelí zkouškou rázem v ohybu, 1988.
- POHLE, C.: Zerstörende Werkstoffprüfung in der Schweißtechnik. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1990.
- KUNZ, J.: Aplikovaná mechanika kontinua II. Základy lomové mechaniky. [Skripta]. Ediční středisko ČVUT, Praha, 1991.
- ČSN 42 0362. Zkoušení kovů. Zkoušky únavy kovů. Základní pojmy a značky, 1987.
- ČSN 42 0363. Zkoušení kovů. Zkoušky únavy kovů. Metodika zkoušení, 1987.
- ČSN ISO 1352. Ocel. Zkoušení únavy napětím v krutu, 1994.
- ČSN 42 0368. Zkoušení kovů. Zkoušky únavy kovů. Statistické vyhodnocování výsledků zkoušek únavy kovů, 1973.
- SUMPER, J. D. G.: Fracture Avoidance in Weld Steel Structures. UKCOSI R233, Defence Research Agency Scotland, Glasgow, 1993.
- ČSN EN 10045-1. Kovové materiály. Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho, část 1: Zkušební metody, 1998.
- ČSN EN 875. Destruktivní zkoušky svarových spojů. Zkoušky rázem v ohybu. Umístění zkušebních tyčí, 1998.
- MAN, J. aj.: Současný stav normalizace zkoušek lomově-mechanických charakteristik. Zváranie 42 (1993), s. 241-248.

4. ZÁKLADY VÝPOČTU SVAROVÝCH SPOJŮ

Při výpočtu namáhání se svar uvažuje jako součást průřezu. Předpokládá se, že je ve svarech stejný průběh namáhání jako v okolním materiálu. Neuvažuje se převýšení povrchu a kořene svaru, ani jeho případné podložení. S ohledem na možné nepravidelnosti a vady se u svarových spojů uvažuje větší bezpečnost, než pro základní materiál. Znamená to, že se u svarového spoje připouští nižší dovolené napětí než u základního materiálu.

4.1 Účinný průřez svaru

Výpočet velikosti svaru je založen na předpokladu, že jeho účinný průřez (nosný průřez svaru) je dostatečně veliký k přenášení normálových a smykových napětí od extrémních zatížení při jejich nejnepříznivější kombinaci. Ve výpočtu se uvažují pouze svary, které mají takovou polohu a jakost provedení, že se mohou podílet na přenášení zatížení. Je-li svar umístěn šikmo ke směru působící síly, uvažuje se ve výpočtu s příslušnou účinnou složkou síly (viz příklad 1). Výpočtová délka svaru je obvykle daná geometrickým tvarem a rozměrem svařovaných součástí. Jestliže se ve svaru předpokládají počáteční a koncové krátery, je výpočtová délka svaru zmenšena u tupého svaru o hodnotu $2s$, u koutového svaru o hodnotu $1,5s$ oproti geometrické délce svaru. Pro stanovení účinného průřezu svaru se určuje u tupého svaru tloušťka svaru a u koutového svaru výška svaru.

Výpočtovou tloušťkou tupého svaru je minimální vzdálenost mezi horním povrchem svařené součásti a spodní stranou závaru. Svařují-li se dvě součásti o různé tloušťce, je nutno pro účinný průřez uvažovat menší svařovanou tloušťku. Účinný průřez tupého svaru A_w je dán vztahem:

$$A_w = s \cdot l \quad (\text{mm}^2) \quad (4.1)$$

s ... výpočtová tloušťka svaru (mm)

l ... výpočtová délka svaru (mm)

index w ... používá se všeobecně pro svar (angl. weld)

U koutového svaru se jako výpočtová výška svaru uvažuje délka výšky největšího rovnoramenného trojúhelníku vepsaného do průřezu svaru. Pro výpočet napětí se zjednodušeně předpokládá, že účinný průřez svaru neleží pod úhlem 45° , ale je sklopený do roviny připojení, tzn. že je kolmý nebo rovnoběžný se směrem zatížení. Účinný průřez koutového svaru A_w se vypočte podle vztahu:

$$A_w = a \cdot l \quad (\text{mm}^2) \quad (4.2)$$

a ... výpočtová výška svaru (mm)

l ... výpočtová délka svaru (mm)

4.2 Napětí ve svarech

- Při zatížení svaru o účinném průřezu A_w vnější normálovou silou F kolmou na průřez A_w vznikne v tomto průřezu **normálové napětí** σ o velikosti:

$$\sigma = \frac{F}{A_w} \quad (MPa) \quad (4.3)$$

F ... vnější síla (N)
A ... účinný průřez svaru (mm²)

Výpočet normálového napětí je proveden v příkladě 2.

- Působí-li síla F rovnoběžně s plochou průřezu vznikne v průřezu A_w **smykové napětí** τ o velikosti:

$$\tau = \frac{F}{A_w} \quad (MPa) \quad (4.4)$$

Výpočet smykového napětí je proveden v příkladě 3.

- Ve svarovém spoji může obecně nastat složitější napjatost, která je tvořena např. složkou normálového napětí σ a složkou smykového napětí τ. V tomto případě se ve výpočtu pracuje se **srovnávacím napětím** σ_v, stanoveným podle některé pevnostní hypotézy. Srovnávací napětí tedy nahrazuje složitější stav napětí. Výpočet srovnávacího napětí je v příkladě 8.
- Napětí v průřezu ohýbaného nosníku závisí na ohybovém momentu, který působí v uvažovaném průřezu, na kvadratickém momentu tohoto průřezu a na vzdálenosti průřezu od neutrální osy. Největší napětí jsou na okraji průřezu, kde je **max. napětí v ohybu** o velikosti:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_o}{J} \cdot y_{\max} = \frac{M_o}{W_o} \quad (MPa) \quad (4.5)$$

M_o... ohybový moment (N.mm)
J ... kvadratický moment průřezu (mm⁴)
y_{max} .. vzdálenost vyšetřovaného místa od neutrální osy (mm)

Ze vztahu 4.5 vyplývá, že:

$$W_o = \frac{J}{y_{\max}} \quad (mm^3) \quad (4.6)$$

W_o .. průřezový modul v ohybu

- V případě, že je svar namáhán kroutícím momentem M_k, zjišťuje se obdobně **max. napětí v krutu** τ_{max}.

Poznámka:

Každý průřez ohýbaného nosníku přenáší ohybový moment M_o a posouvající sílu F_t (viz kapitola Základy nauky o pružnosti a pevnosti). Je-li nosník štíhlý, nemá posouvající síla F_t prakticky vliv na napjatost a deformaci nosníku, proto se uvažuje zatížení pouze ohybovým momentem M_o. Smykové napětí τ způsobené posouvající silou F_t je zanedbatelné

malé ve srovnání s ohybovým napětí σ . V případě úzkého nosníku (např. I profilu), je-li výška průřezu alespoň dvakrát větší než jeho šířka, se však smykové napětí τ výpočtem kontroluje (pomocí Žuravského vztahu).

4.3 Kvadratický moment průřezu

Při namáhání tahem, tlakem nebo jednoduchým smykem závisí deformace konstrukce a její únosnost pouze na velikosti zatížení a na velikosti průřezu. Při namáhání ohybem a krutem však není rozhodující velikost průřezu, ale tzv. kvadratický moment průřezu J (mm^4) (dříve moment setrvačnosti průřezu, někdy též plošný moment 2. stupně). Ten se vždy určuje k jisté ose průřezu a podle toho se označuje např. J_x , J_y , J_z . Osa, která prochází těžištěm se nazývá centrální osa a příslušný kvadratický moment průřezu je centrální kvadratický moment průřezu. Kvadratický moment roste s druhou mocninou vzdálenosti částí plochy od osy. Průhyb nosníku bude proto tím menší, čím je větší kvadratický moment jeho průřezu, tedy čím je více plochy nosníku ve velké vzdálenosti od neutrální osy. Proto se v praxi používají nosníky profilu I. Kvadratický moment celku je roven součtu kvadratických momentů jeho částí. Pro výpočet kvadratického momentu průřezu k jiné ose rovnoběžné s jeho centrální osou platí tzv. Steinerova věta: Kvadratický moment průřezu k libovolné ose je dán součtem kvadratického momentu průřezu k centrální ose a součinu velikosti průřezu a druhé mocniny vzdálenosti obou os (viz příklad 5).

Při výpočtu kvadratického momentu koutových svarů J_w se výška svarů a sklopí do roviny připojení a počítá se kvadratický moment takto vzniklého obrazce (viz příklad 7). Plocha svaru se uvažuje soustředěna do tzv. kořenového bodu (viz příklad 6).

Kvadratické momenty základních geometrických obrazců k vzájemně kolmým osám x , y , které procházejí jejich těžištěm jsou:

Čtverec o straně a

$$J_x = J_y = \frac{a^4}{12} \quad (4.7)$$

Obdélník o šířce b , výšce h (b je rovnoběžná s osou x , h je rovnoběžná s osou y)

$$J_x = \frac{1}{12} b h^3 \quad (4.8)$$

$$J_y = \frac{1}{12} b^3 h$$

Kruh o průměru d

$$J_x = J_y = \frac{\pi d^4}{64} \quad (4.9)$$

4.4 Průřezový modul v ohybu a krutu

Průřezový modul (dříve moment odporu) v ohybu W_o a průřezový modul v krutu W_k se odvozují z kvadratického momentu příslušného průřezu. V kapitole Základy nauky

o pružnosti a pevnosti bylo uvedeno, že největší napětí v ohýbaném nosníku je v jeho okrajových vláknech. Pro tato vlákna platí

$$\sigma_{\max} = \frac{M_o}{J} \cdot e \quad (4.10)$$

e ... vzdálenost okrajového vlákna od neutrální osy (mm)

J ... kvadratický moment průřezu k neutrální ose (mm⁴)

Výraz (4.10) je možno psát ve tvaru

$$\sigma_{\max} = \frac{M_o}{W_o} \quad (4.11)$$

kde W_o označuje **průřezový modul v ohybu**

$$W_o = \frac{J}{e} \quad (\text{mm}^3) \quad (4.12)$$

Průřezové moduly v ohybu základních geometrických obrazců k vzájemně kolmým osám x , y , které procházejí jejich těžištěm jsou:

Čtverec o straně a

$$W_{ox} = W_{oy} = \frac{a^3}{6} \quad (4.13)$$

Obdélník o šířce b , výšce h (b je rovnoběžná s osou x , h je rovnoběžná s osou y)

$$W_{ox} = \frac{1}{6} b h^2 \quad (4.14)$$

$$W_{oy} = \frac{1}{6} b^2 h \quad (4.15)$$

Kruh o průměru d

$$W_{ox} = W_{oy} = \frac{\pi d^3}{32} \quad (4.16)$$

V případě namáhání krutem se obdobně definuje **průřezový modul v krutu W_k** (mm³). Pro kruh platí

$$W_k = \frac{\pi d^3}{16} \quad (4.17)$$

Na rozdíl od kvadratického momentu průřezu není průřezový modul celkového průřezu roven součtu průřezových modulů jeho částí. To znamená, že při řešení průřezového

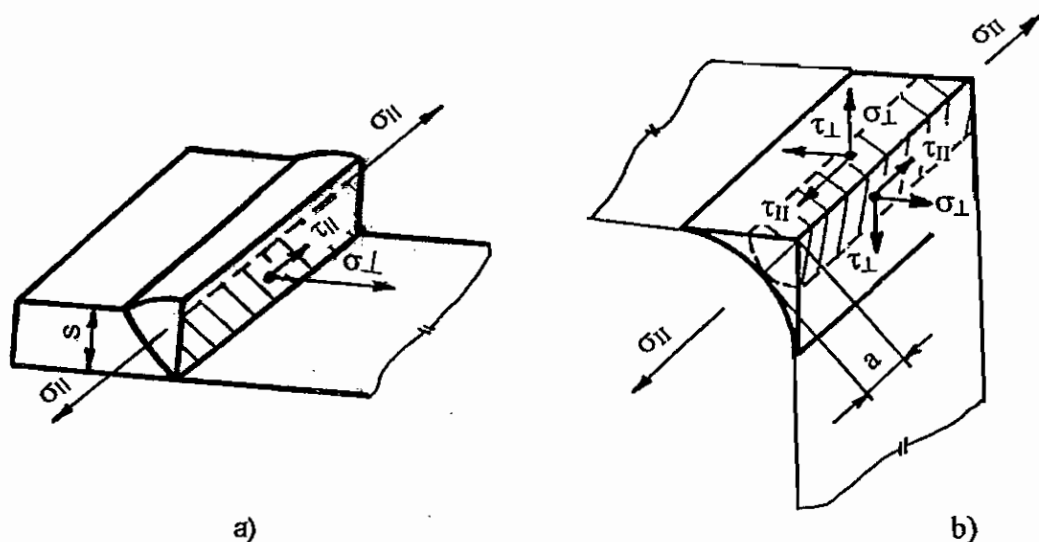
modulu u obecného obrazce se musí nejprve vypočítat kvadratický moment průřezu a teprve tento dělit vzdáleností okrajového vlákna (viz příklad 8).

Průřezový modul W_{ow} , W_{kw} koutového svaru se vypočte z kvadratického momentu průřezu svaru J_w .

4.5 Výpočet jmenovitých napětí ve svarovém spoji

Stanovení jmenovitých napětí ve svaru má zásadní význam pro návrh svarového spoje. Provést přesný výpočet jmenovitého napětí ve svarovém spoji je však problematické, protože i u jednoduchých svarů je velmi obtížné analyzovat skutečný průběh napětí ve svaru. Pomocí dohodnutých vzorců [1, 2, 3] z pružnosti a pevnosti se vypočítá průměrné jmenovité napětí v určeném průřezu svarového spoje, vyvolané všemi působícími silami a momenty. Tento postup znamená určité zjednodušení, protože se z důvodu složitosti výpočtu neuvažují např. špičky napětí ani případná vnitřní pnutí ani velké vruby v okolí svaru. Je však zohledněn vliv malých vrubů a to nižší hodnotou dovoleného napětí. Kromě výpočtu jmenovitých napětí se u svarů kontroluje, zda vypočtené jmenovité napětí ve svaru σ , τ nebo σ_v (srovnávací) nepřekročí přípustné dovolené napětí, resp. mezní namáhání svaru. Příklady výpočtu jmenovitých napětí ve svarových spojích jsou uvedeny v kapitole Příklady výpočtu svarových spojů.

Ve svarovém spoji mohou působit normálová a smyková napětí v různém směru a s různou orientací. Napětí v tupém svaru jsou znázorněna na obr. 4.1a, v koutovém svaru na obr. 4.1b.

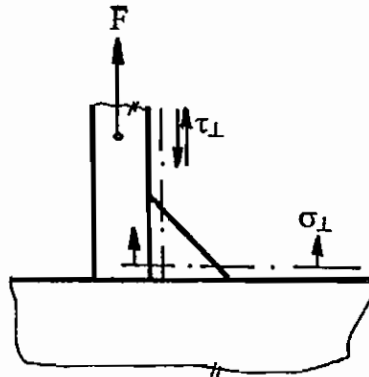


Obr. 4.1 Druhy napětí ve svarovém spoji
a) tupém; b) koutovém

Rozlišují se obecně tyto druhy napětí:

- σ_{\perp} ... normálové napětí kolmé na podélnou osu svaru,
- σ_{\parallel} ... normálové napětí rovnoběžné s podélnou osou svaru,
- τ_{\perp} ... smykové napětí kolmé na podélnou osu svaru,
- τ_{\parallel} ... smykové napětí rovnoběžné s podélnou osou svaru,

V případě tupého svaru nečiní určení druhu napětí potíže. U koutového svaru je průběh zatížení komplikovaný a pro určení druhu napětí platí dohodnutá pravidla. Např. podle [4] se jedná o normálové napětí tehdy, vytvoří-li se při odtržení svaru rozevřený lom. Když se naopak plochy svaru při lomu po sobě posunují, jde o smykové napětí (obr. 4.2).



Obr. 4.2 Normálové a smykové napětí u koutového svaru

4.6 Výpočet únosnosti průřezů svarů

V současné době se výpočet únosnosti svarových spojů provádí buď starší metodou pomocí tzv. **dovoleného napětí** σ_D , τ_D (porovnává se jmenovité napětí v nejnepříznivěji namáhaném místě s maximálně přípustným, tj. dovoleným napětím) nebo novější a přesnější metodou tzv. **mezních stavů únosnosti** (jmenovité napětí se porovnává s návrhovou únosností, resp. s mezním svarovým napětím, používají se dílčí součinitel spolehlivosti zatížení γ_F a dílčí součinitel spolehlivosti materiálu γ_M).

- **Metoda dovoleného napětí** je použita např. při výpočtu svarových spojů strojních konstrukcí podle normy ČSN [1]. Základní podmínkou pevnosti je, aby jmenovité napětí v určitém průřezu svarového spoje, vypočítané podle elementárních vzorců pružnosti a pevnosti, nepřesáhlo dovolené napětí v uvažovaném průřezu svaru. Pro statické namáhání svaru musí být splněna podmínka:

$$\sigma \leq \sigma_{DSV} \quad (4.18)$$

$$\tau \leq \tau_{DSV} \quad (4.19)$$

- σ ... normálové napětí (MPa)
- σ_{DSV} .. dovolené napětí svaru v tahu (MPa)
- τ ... smykové napětí (MPa)
- τ_{DSV} .. dovolené napětí svaru ve smyku (MPa)

V případě složitější napjatosti v průřezu svaru musí být splněna i podmínka, že srovnávací napětí je menší než dovolené napětí.

Dovolené napětí tupých a koutových svarů **staticky namáhaných** se stanoví vynásobením dovoleného napětí základního materiálu σ_D příslušným převodním součinitelem α svarového spoje. Podle druhu svaru a druhu namáhání norma [1] stanovuje hodnotu α v rozmezí 0,65 až 1,0. Platí proto vztahy:

$$\sigma_{DSV} = \alpha \cdot \sigma_D = \alpha \cdot \frac{R_e}{n} \quad (\text{MPa}) \quad (4.20)$$

$$\tau_{DSV} = \alpha \cdot \tau_D = \alpha \cdot \frac{R_e}{n} \quad (\text{MPa}) \quad (4.21)$$

R_e ... mez kluzu základního materiálu (MPa)

n ... součinitel bezpečnosti, u statického zatížení svarového spoje se zpravidla volí $n = 1,5$ [1].

Při výpočtu dovoleného napětí **dynamicky namáhaných** svarových spojů se vychází z meze únavy, která se určí pomocí Smithových diagramů [1]. Součinitel bezpečnosti se u dynamického zatížení volí $n = 1,5$ až 3 [1].

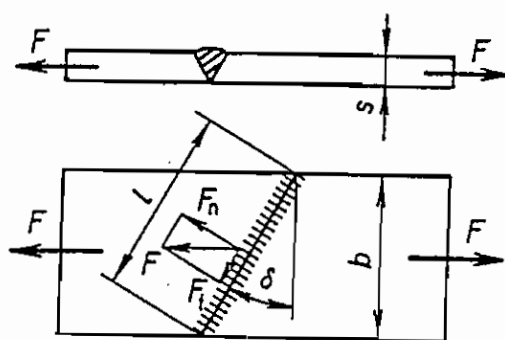
- Výpočet podle **metody mezních stavů** únosnosti je použit např. při navrhování ocelových konstrukcí podle normy [2] nebo podle normy DIN [3]. Principiální rozdíl mezi koncepcí dovoleného napětí a koncepcí mezních svarových napětí je v tom, že u koncepcie mezních svarových napětí jsou přípustná napětí vyšší, svary však musí přenášet zatížení, zvýšená o dílčí součinitele bezpečnosti. Výhodou je, že součinitele bezpečnosti je možno jednotlivě stanovit pro jednotlivá dílčí zatížení.

4.7 Příklady výpočtů jednoduchých svarů

Byly zvoleny jednoduché příklady výpočtu při statickém zatížení. V příkladech, kde se kontroluje svar, byla použita pouze metoda dovoleného napětí. Je ukázán výpočet jmenovitého napětí ve svarových spojích při zatížení tahem, smykem, ohybem, krutem. Kvadratické momenty průřezů a průřezové moduly v ohybu jsou počítány u nosníku I profilu a u koutových svarů. Pro zjednodušení se někdy dosazuje v centimetrech. Příklady byly vybrány z [5].

Příklad 1.

Vypočtete napětí působící ve svaru podle obr. 4.3.



Obr. 4.3 Šikmý tupý svar desek

Řešení:

Síla F se rozloží na složku F_n působící kolmo ke směru svaru a na složku F_t působící ve směru svaru. Potom platí:

$$F_n = F \cdot \cos \delta$$

$$F_t = F \cdot \sin \delta$$

- Normálové napětí ve svaru od složky F_n bude podle vztahu (4.3):

$$\sigma = \frac{F_n}{A_w} = \frac{F_n}{s \cdot l} = \frac{F \cdot \cos \delta}{s \cdot \frac{b}{\cos \delta}} = \frac{F \cdot \cos^2 \delta}{s \cdot b}$$

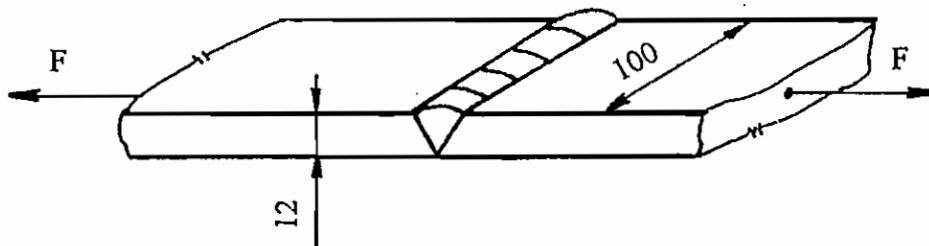
- Smykové napětí ve svaru od složky F_t bude podle vztahu (4.4):

$$\tau = \frac{F_t}{A_w} = \frac{F_t}{s \cdot l} = \frac{F \cdot \sin \delta}{s \cdot \frac{b}{\cos \delta}} = \frac{F \cdot \sin 2 \delta}{2 s \cdot b}$$

- s ... výpočtová tloušťka svaru
- l ... výpočtová délka svaru
- b ... šířka svařovaného plechu

Příklad 2.

Vypočtete jakou maximální statickou sílu může přenášet tupý svarový spoj podle obr. 4.4. Jedná se o součást strojní konstrukce, výpočtová délka svaru je shodná s geometrickou délkou, svar byl proveden pomocí náběhové a výběhové desky. Materiál spoje je ocel o mezi kluzu $R_e = 270$ MPa, převodní součinitel svarového spoje $\alpha_{\perp} = 0,85$, součinitel bezpečnosti $n = 1,5$.



Obr. 4.4 Tupý svar pásů

Řešení:

Účinný průřez svaru je podle vztahu (4.1).

$$A_w = s \cdot l = 12 \cdot 100 = 1200 \text{ mm}^2$$

Ze vztahu pro normálové napětí (4.3) vyplývá:

$$F = \sigma \cdot A_w$$

Dovolené napětí podle vztahu (4.20):

$$\sigma_{DSV} = \alpha \cdot \frac{R_e}{n} = 0,85 \cdot \frac{270}{1,5} = 153 \text{ MPa}$$

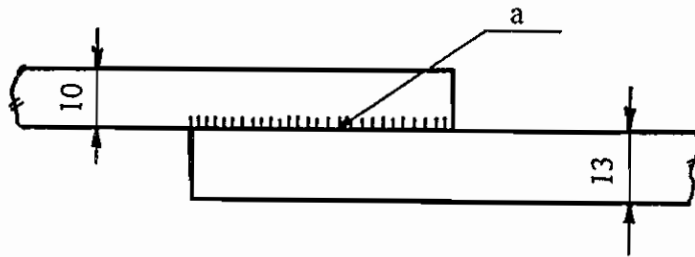
Pro zjištění max. síly se za σ dosadí σ_{DSV} , potom:

$$F_{\max} = \sigma_{DSV} \cdot A_w = 153 \cdot 1200 = 183600 \text{ N}$$

Svarový spoj může přenášet max. sílu 183,6 kN.

Příklad 3.

Vypočítejte potřebnou délku dvou bočních koutových svarů táhla ocelové konstrukce podle obr. 4.5. Výšku koutových svarů navrhnete podle zásad správného konstruování. Dovolené smykové napětí je $\tau_{DSV} = 100 \text{ MPa}$, působící statická síla $F = 200 \text{ kN}$. Vliv počátečních a koncových kráterů neuvažujte.



Obr. 4.5 Spoj táhla konstrukce

Řešení:

Ve svarech bude působit smykové napětí rovnoběžné se svarem. Podle vztahu (4.4) platí:

$$\tau = \frac{F}{A_w}, \text{ tudíž } A_w = \frac{F}{\tau}$$

Smykové napětí τ může být nejvýše rovno dovolenému napětí, proto:

$$A_w \geq \frac{F}{\tau_{DSV}} \geq \frac{200\,000}{100} \geq 2000 \text{ mm}^2$$

Podle [3] pro výšku koutového svaru platí zásada: $a_{\max} \leq 0,7 \cdot s_{\min}$, $a_{\min} \geq \sqrt{s_{\max}} - 0,5$

$$\begin{aligned} \text{Proto} \quad a_{\max} &\leq 0,7 \cdot s_{\min} \leq 0,7 \cdot 10 \leq 7 \text{ mm} \\ a_{\min} &\geq \sqrt{s_{\max}} - 0,5 \geq \sqrt{13} - 0,5 \geq 3,1 \text{ mm} \end{aligned}$$

Volíme $a = 5 \text{ mm}$.

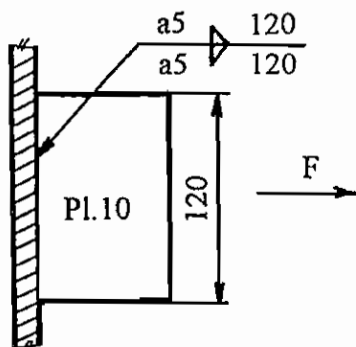
Ze vztahu (4.2) pro celkovou délku obou svarů plyne:

$$l = \frac{A_w}{a}, \text{ tudíž } l_{\min} \geq \frac{A_w}{a} \geq \frac{2000}{5} \geq 400 \text{ mm}$$

Při zvolené výšce koutového svaru a musí být délka každého svaru nejméně 200 mm.

Příklad 4.

Posud'te svarový spoj podle obr. 4.6. Síla $F = 150 \text{ kN}$, materiál ocel S 235, dovolené napětí 210 MPa, $a = 5 \text{ mm}$. Koncové a počáteční krátery svarů neuvažujte.



Obr. 4.6 Připojení žebra ke stěně

Řešení:

- Účinný průřez svaru podle vztahu (4.2):

$$A_w = a \cdot l = 2 \text{ (dva svary)} \cdot 5 \cdot 120 = 1200 \text{ mm}^2$$

- Síla F způsobí ve svarech napětí (podle vztahu 4.3):

$$\sigma_{\perp} = \frac{F}{A_w} = \frac{150000}{1200} = 125 \text{ MPa}$$

- Posouzení únosnosti svarového spoje podle podmínky (4.18):

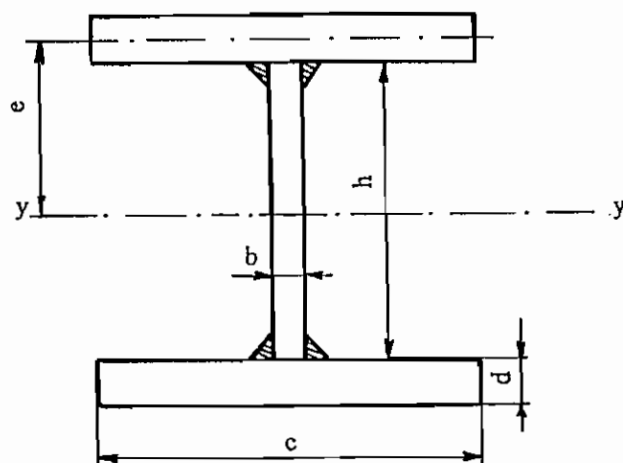
$$\sigma_{\perp} \leq \sigma_{DSV}$$

$$120 \text{ MPa} < 210 \text{ MPa}$$

Svarový spoj vyhovuje.

Příklad 5.

Vypočtete kvadratický moment průřezu svařeného nosníku podle obr. 4.7. Průřez krčních svarů neuvažujte. Pásnice mají rozměr 240 x 20 mm, stojina 350 x 10 mm.



Obr. 4.7 Nosník I profilu

Řešení:

Kvadratický moment průřezu celého nosníku J_y bude dán součtem kvadratických momentů průřezů obou pásnic J_{yp} a průřezu stojiny J_{ys} .

- Stojina:
$$J_{ys} = \frac{1}{12} b h^3 = \frac{1}{12} \cdot 1 \cdot 35^3 = 3573 \text{ cm}^4$$

- Pásnice pomocí Steinerovy věty:

$$J_{yp} = \frac{1}{12} c d^3 + c \cdot d \cdot e^2 = \frac{1}{12} \cdot 24 \cdot 2^3 + 24 \cdot 2 \cdot 18,5^2 = 16444 \text{ cm}^4$$

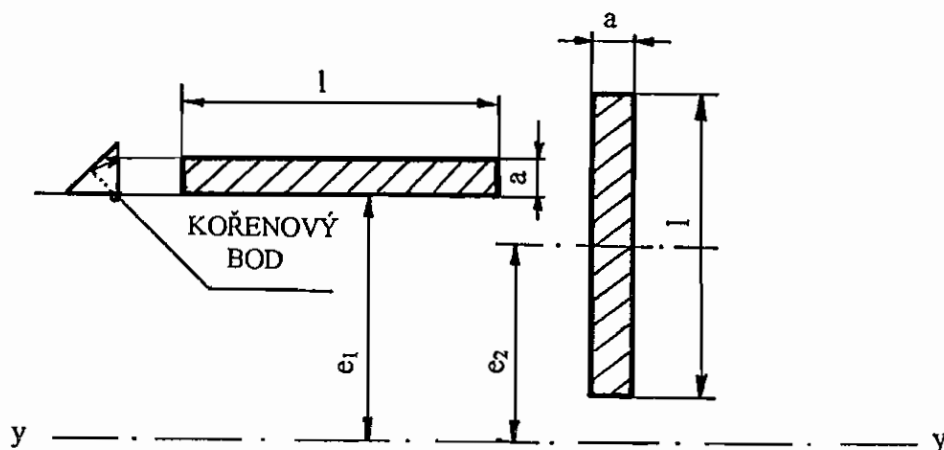
- Kvadratický moment průřezu nosníku:

$$J_y = J_{ys} + 2 \cdot J_{yp} = 3573 + 2 \cdot 16444 = 36461 \text{ cm}^4$$

Kvadratický moment průřezu svařeného nosníku je $36\,461 \text{ cm}^4$.

Příklad 6.

Vypočtěte kvadratické momenty průřezu koutových svarů podle obr. 4.8. Výpočtová délka svaru je l , výpočtová výška svaru je a .



Obr. 4.8

Koutový svar o rozměru a

a) Svar rovnoběžný;

b) svar kolmý k těžištní ose $y-y$ svarku

Řešení:

Nosný průřez svarů je sklopen do roviny připojení. K výpočtu použijeme Steinerovu větu.

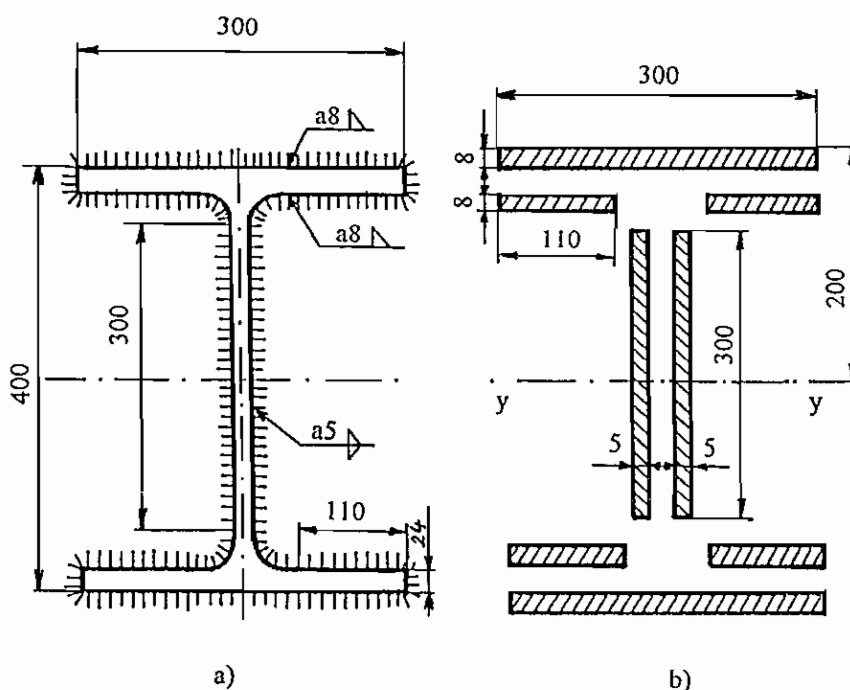
- Pro svar rovnoběžný $J_{w\parallel} = a \cdot l \cdot e_1^2$

Rovnoběžný svar nemá vlastní centrální kvadratický moment, plocha svaru je soustředěna do kořenového bodu.

- Pro svar kolmý $J_{w\perp} = \frac{1}{12} a \cdot l^3 + a \cdot l \cdot e_2^2$

Příklad 7.

Vypočtete celkový kvadratický moment průřezu koutových svarů nosníku přivařeného podle obr. 4.9. Svary v rádiusech a na obou stranách pásnic neuvažujte.



Obr. 4.9 Nosník I profilu přivařený koutovými svary ke konstrukci
a) umístění svarů; b) účinné plochy svarů

Řešení:

Výsledný kvadratický moment účinného průřezu všech koutových svarů bude dán součtem kvadratických momentů průřezů svarů na stojině a kvadratických momentů průřezů svarů na obou pásnicích.

- Kvadratický moment průřezu dvou svarů stojiny je:

$$J_{ws} = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 0,5 \cdot 30^3 = 2250 \text{ cm}^4$$

- Kvadratický moment průřezu dvou vnějších svarů na pásnicích pomocí Steinerovy věty:

$$J_{wp2} = 2 \cdot 0,8 \cdot 30 \cdot 20^2 = 19200 \text{ cm}^4$$

Svary nemají vlastní centrální kvadratický moment (viz příklad 6).

- Kvadratický moment průřezu čtyř vnitřních svarů na pásnicích pomocí Steinerovy věty:

$$J_{wp4} = 4 \cdot 0,8 \cdot 11 \cdot 17,6^2 = 10904 \text{ cm}^4$$

Svary nemají vlastní centrální kvadratický moment (viz příklad 6).

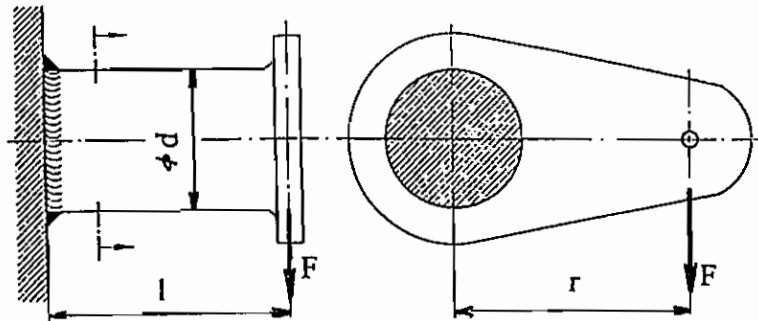
- Výsledný kvadratický moment všech koutových svarů:

$$J_w = J_{ws} + J_{wp2} + J_{wp4} = 2250 + 19200 + 10904 = 32354 \text{ cm}^4$$

Kvadratický moment průřezu koutových svarů nosníku je 32354 cm^4 .

Příklad 8.

Proveďte kontrolu napětí v koutovém svaru připojení ramene podle obr. 4.10. Síla $F = 40 \text{ kN}$, výpočtová výška svaru $a = 10 \text{ mm}$, dovolené napětí ve svaru stanovené technickým předpisem je 65 MPa , $\varnothing d = 120 \text{ mm}$, $l = 200 \text{ mm}$, $r = 100 \text{ mm}$.



Obr. 4.10 Připojení ramene ke stěně konstrukce

Řešení:

- Účinný průřez svaru je mezikružší:

$$A_w = \frac{\pi (d+2a)^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (12+2)^2}{4} - \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = 40,8 \text{ cm}^2$$

- Smykové napětí ve svaru od síly F :

$$\tau_1 = \frac{F}{A_w} = \frac{40000}{4080} = 9,8 \text{ MPa}$$

- Normálové napětí ve svaru od ohybového momentu:

$$M_o = \text{síla} \cdot \text{rameno}$$

$$M_o = F \cdot l = 40 \cdot 200 = 8000 \text{ kNmm}$$

Podle vztahu (4.12):

$$W_{ow} = \frac{J_w}{\frac{d+2a}{2}} = \frac{\frac{\pi}{64} [(d+2a)^4 - d^4]}{\frac{d+2a}{2}} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(14^4 - 12^4)}{14} = 124 \text{ cm}^3$$

Podle vztahu (4.11):

$$\sigma = \frac{M_o}{W_{ow}} = \frac{8000000}{124000} = 64,5 \text{ MPa}$$

- Smykové napětí ve svaru od kroutícího momentu:

$$M_k = \text{síla} \cdot \text{rameno}$$

$$M_k = F \cdot r = 40 \cdot 100 = 4000 \text{ kNmm}$$

Z porovnání vztahů (4.17) a (4.16) plyne:

$$W_{kw} = 2W_{ow} = 2 \cdot 124 = 248 \text{ cm}^3$$

$$\tau_2 = \frac{M_k}{W_{kw}} = \frac{4000000}{248000} = 16,2 \text{ MPa}$$

- Srovnávací napětí:

$$\sigma_v = \sqrt{\tau_1^2 + \sigma^2 + \tau_2^2} = \sqrt{9,8^2 + 64,5^2 + 16,2^2} = 67,2 \text{ MPa}$$

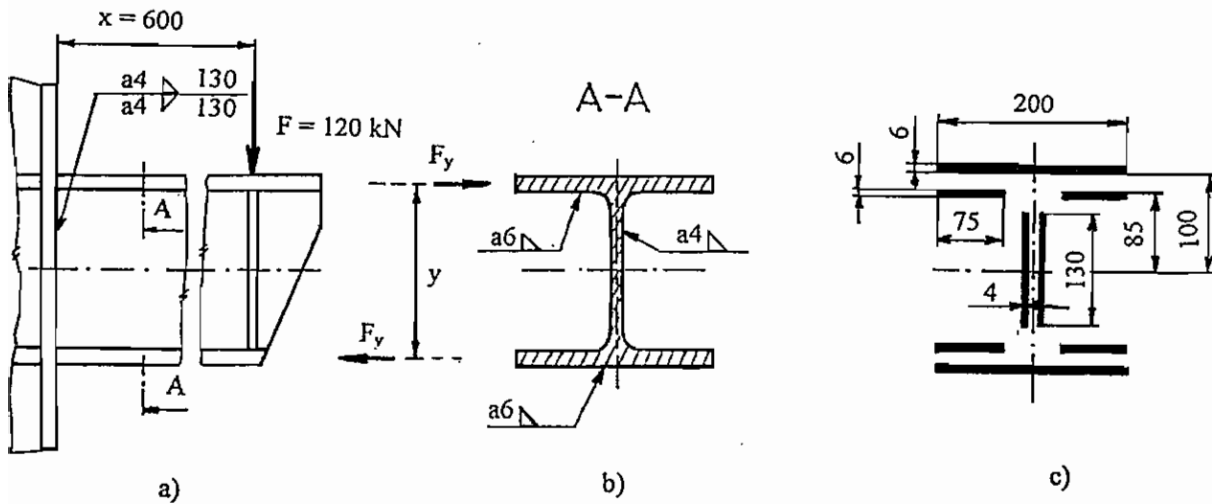
$$\sigma_v < \sigma_{DSV}$$

$$67,2 \text{ MPa} < 70 \text{ MPa} \dots \text{ vyhovuje}$$

Koutový svar je pro dané zatížení vyhovující.

Příklad 9.

Konzola vyrobená z profilu I 200 mm je přivařena koutovými svary k ocelovému sloupu. Je zatížena osamělou statickou silou $F = 120 \text{ kN}$. Materiál konzoly je konstrukční ocel, dovolené napětí $\sigma_{DSV} = 190 \text{ MPa}$, $\tau_{DSV} = 135 \text{ MPa}$. Vypočtete napětí působící ve svarech konzoly a tato porovnejte s dovolenými napětími.



Obr. 4.11 Svarové spoje konzoly

Řešení:

Sílu F přemístíme do těžiště účinného průřezu svarových ploch (obr. 4.11c). Zde působí:

- Příčná síla $F = 120 \text{ kN}$
- Ohybový moment $M_o = F \cdot x = 120 \cdot 600 = 72\,000 \text{ kN} \cdot \text{mm}$

Tento moment je možno nahradit silovou dvojicí F_y působící v kořenech jednotlivých svarů. Rameno silové dvojice je $y = 185 \text{ mm}$ (viz obr. 4.11c). Platí tedy:

$$M_o = F_y \cdot y$$

$$F_y = \frac{M_o}{y} = \frac{72\,000}{185} = 389,19 \text{ kN}$$

- Příčná síla je přenášena svary stojiny nosníku. Silou F je proto namáhána svarová plocha A_{ws} o rozměru (obr. 4.11c):

$$A_{ws} = 2(130 \cdot 4) = 1040 \text{ mm}^2$$

Smykové napětí ve svarech stojiny bude:

$$\tau_{\parallel} = \frac{F}{A_{ws}} = \frac{120\,000}{1040} = 115,4 \text{ MPa} \langle \tau_{DSV} \dots \text{vyhovuje} \rangle$$

- Ohybový moment je přenášen svary horního pásu nosníku. Silou F_y je proto namáhána svarová plocha horního pásu A_{wp} o rozměru (obr. 4.11c).

$$A_{wp} = (200 \cdot 6) + 2(75 \cdot 6) = 2100 \text{ mm}^2$$

Normálové napětí ve svarech horního pásu bude o velikosti:

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_y}{A_{wp}} = \frac{389190}{2100} = 185,3 \text{ MPa} \langle \sigma_{DSV} \dots \text{vyhovuje} \rangle$$

Ve svarech konzoly působí smykové napětí τ_{\parallel} o velikosti 115,4 MPa a normálové napětí σ_{\perp} o velikosti 185,3 MPa. Obě napětí jsou menší než dovolená napětí.

Poznámka: Provedený výpočet je zjednodušený. Při přesnějším výpočtu by bylo nutno počítat kvadratický moment a průřezový modul účinných svarů dle obr. 4.11c a zjistit výsledné srovnávací napětí. To potom porovnat s napětím dovoleným.

Literatura

ČSN 05 0120. Výpočet svarových spojů strojních konstrukcí, 1971.

ČSN 73 1401. Navrhování ocelových konstrukcí, 1998.

DIN 18 800. Teil 1. Stahlbauten, 1990.

NEUMANN, A.: Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure, Teil 4. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.

KOVAŘÍK, R.: Přednášky předmětu Svařované konstrukce. ZČU v Plzni, 1999.

5. PRINCIPY NÁVRHU SVAŘOVANÝCH KONSTRUKCÍ

Návrh svařované konstrukce musí především zabezpečit spolehlivost, bezpečnost a životnost jejího provozu. Spolehlivost znamená splňovat požadovanou funkci svařované konstrukce při plném zachování provozních parametrů. Bezpečnost znamená, že nesmí dojít při provozu svařované konstrukce k mezním stavům únosnosti (např. porušení lomem) a k mezním stavům použitelnosti (např. nedovolené zvětšení průhybu nosníku) po celou dobu její životnosti. Životnost znamená, že svařovaná konstrukce musí plnit požadovanou funkci až do doby určené např. technickými podmínkami.

Zajišťování uvedených tří základních charakteristik provozu začíná již ve fázi dimenzování a provádění návrhu svařované konstrukce. Praxe ukazuje, že kvalita výrobních podkladů, tj. i konstrukčních výkresů je určována kvalitou spolupráce mezi konstruktérem, materiálovým specialistou a svařovacím technologem. Dnes se přijímá koncepce, že nelze vyrobit svařovanou konstrukci bez vad. V návaznosti na normy [1 – 4, 28] se řeší otázka přípustné velikosti vady podle místa jejího výskytu v konstrukci a podmínek zatěžování. Vychází se přitom z principu vhodnosti konstrukce pro daný účel.

Při návrhu svařované konstrukce je vždy nutno řešit dvě protichůdná kritéria:

- **Maximální plnění funkce** s dostatečnou spolehlivostí, bezpečností a životností provozu. Toto kritérium vyžaduje volit co možno největší nosné průřezy a materiály s nejvyššími mechanickými vlastnostmi.
- **Vysoká hospodárnost výroby.** Toto kritérium vyžaduje naopak volit co nejmenší nosné průřezy (úspora hmotnosti) a pokud možno levné materiály (tj. ale s horšími mechanickými vlastnostmi).

Základem úspěšného návrhu svařované konstrukce je správně stanovit druh a velikost jejího zatížení, zvolit vhodné konstrukční materiály, správně zvolit druh, velikost, množství a umístění svarů a výpočtem prokázat, že provozní namáhání svarových spojů nepřekročí únosnost použitých materiálů.

5.1 Činitele ovlivňující návrh svařované konstrukce

Každá svařovaná konstrukce je navržena pro určitý účel. Musí např. přenášet vnější síly (nosná konstrukce), uskladňovat tekuté látky (nádrže), dopravovat plyny a kapaliny (potrubí), dopravovat osoby a náklady (kolejová a silniční vozidla). Provozní podmínky a požadavky na konstrukce přitom budou velmi rozmanité. Zcela jinak se proto bude postupovat při návrhu např. svařovaného zábradlí podle výrobní skupiny C [5] a jinak při návrhu svařované tlakové nádoby jaderného reaktoru nebo svařovaného tělesa parních turbín. Zábradlí je namáháno staticky, tlaková nádoba a těleso turbíny dynamicky. Jako materiál zábradlí vyhoví uhlíková ocel, u materiálu tlakových nádob jaderných reaktorů je požadována odolnost proti radiačnímu poškození (vyhoví např. oceli SA 508 Cl3, SA 533, 15Ch2NMFA), u materiálů parních turbín se požadují dlouhodobé pevnostní vlastnosti za teploty, tj. R_T , R_{mT} (vyhoví např. CrMoWV ocel Škoda T56). Při návrhu svařované konstrukce je nutno vzít v úvahu zejména tyto činitele:

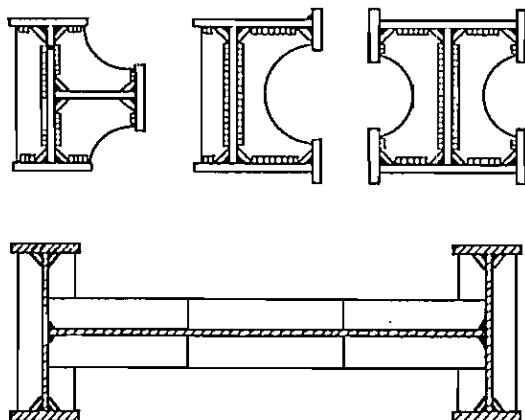
- **Požadavky na funkci**, tj. úloha jakou má konstrukce plnit.
- **Požadavky norem**, předpisů a technických podmínek na výrobek. Např. norma [6] pro tlakové nádoby.
- **Provozní podmínky**, zejména druh zatížení (statické, dynamické, rázem), druh namáhání (tahem, tlakem, smykem, ohybem, krutem, kombinované), teplota (zvýšená, snižená, kryogenní), míra nebezpečí lomu únavového nebo křehkého, korozní prostředí, eroze, abraze.
- **Požadavky na jakost** svařované konstrukce, tj. např. výrobní skupina A, B, C podle [5], požadavky vyšší, standardní nebo základní podle [1], nebo stupeň jakosti D (nízký), C (střední), B (vysoký) podle [2].
- **Požadavky na bezpečnost provozu**, závažnost následků případné havárie.
- **Materiál** a jeho mechanické a další vlastnosti. Chemické složení, způsob výroby a odlévání oceli (zejména čistota a stupeň uklidnění oceli), způsob tváření polotovary (např. s ohledem na vznik lamelárních trhlin), svařitelnost (ukazatel celistvosti a ukazatel mechanických vlastností).
- **Způsob výroby**. Nutno vzít v úvahu nejen svařování, ale všechny výrobní a kontrolní operace se svařováním související. Tepelné zpracování před a po svaření, příprava svarových úkosů, metoda svařování (vnitřní pnutí a deformace), technologie svařování (možnost mechanizace a automatizace, hloubka závaru, vnesené teplo do svaru).
- **Estetická hlediska** s ohledem na umístění svařované konstrukce (např. venkovní, uvnitř budov; stacionární, pohyblivá).
- **Hutní polotovary**, jejich dodávaný sortiment.
- **Přídavné svařovací materiály**, jejich dodávaný sortiment.
- **Svařovna** výrobního závodu, její vybavení svařovacími stroji a přípravky, technické a personální možnosti.
- **Počet vyráběných kusů**, velikost série, opakovatelnost výroby.
- **Dodací lhůta**.
- **Ekonomická hlediska**, hospodárnost výroby.

5.2 Základní konstrukční typy

Svařované konstrukce se z hlediska konstrukčního prostorového řešení obvykle rozdělují na konstrukce deskové, skříňové, komůrkové, skořepinové, příhradové a nádoby. Časté jsou i vzájemné kombinace uvedených typů. Při volbě celkového uspořádání konstrukce a při provádění návrhu skupin, podskupin i detailů je nutno dbát na výhodný postup výroby a dobrou přístupnost pro provádění i kontrolu svarů.

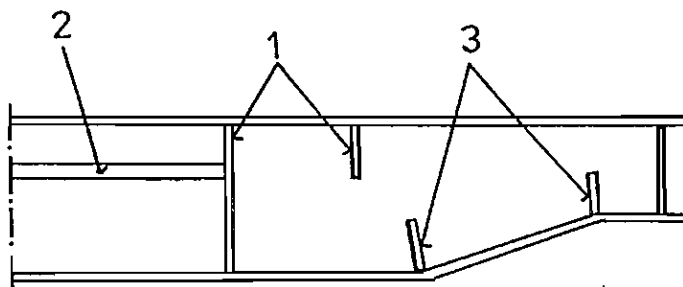
• Konstrukce desková

Konstrukce deskové (neboli plnostěnné) jsou výrobně jednoduché a levné. S výhodou se svařují metodou MAG nebo pod tavidlem. Deskové, skříňové a příhradové konstrukce se používají nejčastěji. Základem nosné části deskových konstrukcí jsou plechy, pásy a válcované nebo svařované profily průřezu nejčastěji I, ale také U, L, H. Výjimečně se použije profil uzavřený. Tloušťka stěn je relativně velká. V případě místního působení sil se používají příčné nebo podélné výztuhy. Obecně platí, že deskové konstrukce nejsou určeny k přenášení kroutícího momentu. Příklady deskové konstrukce jsou na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Deskové konstrukce nosníků

Mezi deskové konstrukce patří i nosník I profilu, viz příklad na obr. 5.2.

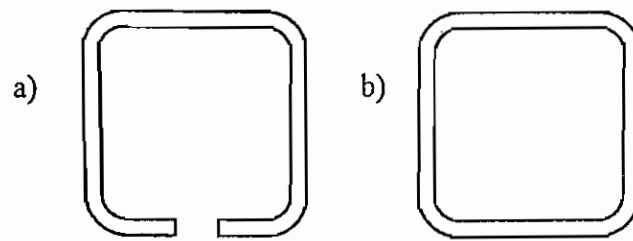


Obr. 5.2 Plnostěnný nosník s výztuhami
1-příčná; 2-podélná; 3-ke zvýšení únosnosti ve vřpěru

Deskových a skříňových konstrukcí se s výhodou používá při náhradě odlitků svařovanými konstrukcemi. Vzhledem k menší tloušťce stěn u svařků než u odlitků se dosáhne až 30 % úspory materiálu [7].

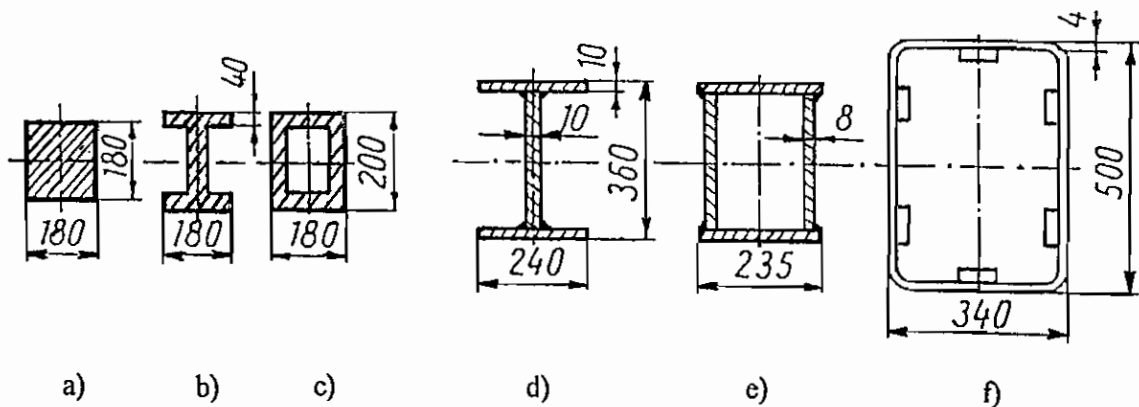
- **Konstrukce skříňová**

Konstrukce skříňové (neboli rámové) se navrhují jako uzavřené z válcovaných pásů, plechů a z válcovaných nebo lisovaných profilů. Jsou určeny zejména pro přenášení kroučícího momentu nebo pro kombinaci namáhání ohyb-kрут. Důvodem pro toto použití je velká únosnost v křutu a tuhost uzavřeného průřezu. Např. uzavřený průřez na obr. 5.3 má pětsetkrát větší únosnost v křutu při srovnání se stejným, ale otevřeným průřezem [12].



Obr. 5.3 Únosnost nosníku v krutu
a) otevřený průřez; b) uzavřený průřez

Porovnání únosnosti, tuhosti a hmotnosti průřezů s různými kvadratickými momenty a moduly odporu v ohybu a krutu (obr. 5.4) je podle [12] uvedeno v tabulce 5.1.



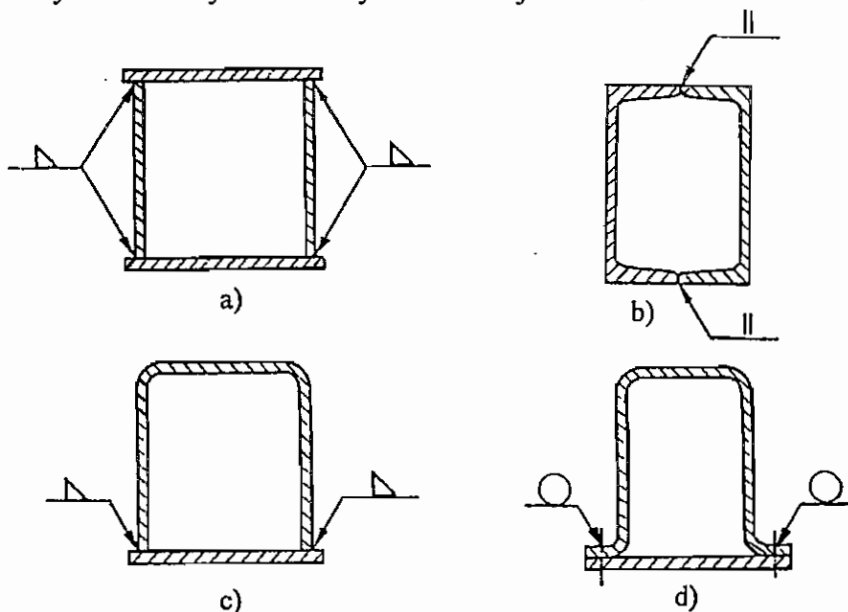
Obr. 5.4 Porovnání charakteristik nosníků různého průřezu

Tabulka 5.1 Vzájemné porovnání hodnot průřezů stejné únosnosti v ohybu (%).

Průřez podle obr. 5.4	a	b	c	d	e	f
Hmotnost	100	75	65	40	40	20
Únosnost	v ohybu	100	100	100	100	100
	v krutu	100	20	110	25	140
Tuhost	v ohybu	100	100	110	200	270
	v krutu	100	25	110	25	190

Z tabulky 5.1 jednoznačně vyplývají přednosti uzavřených profilů při namáhání krutem.

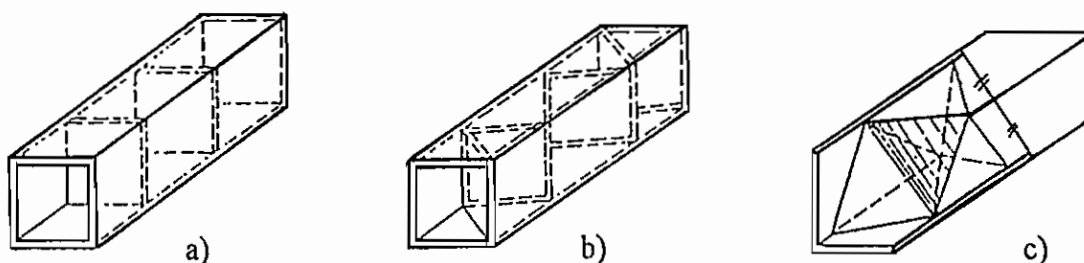
Skříňové konstrukce se často svařují mechanizovanou nebo automatizovanou metodou MAG a svařováním pod tavidlem. Příkladem celosvařovaných skříňových konstrukcí jsou hlavní rámy podvozků elektrických lokomotiv, vagonů a tramvají. Různé možnosti provedení dutých uzavřených skříňových nosníků jsou na obr. 5.5.



Obr. 5.5 Průřezy svařených skříňových nosníků
 a) běžné provedení; b) svařené válcované U profily;
 c) svařený vylisovaný U profil; d) odporově svařený U profil

• Konstrukce komůrková

Komůrková (neboli buňková) konstrukce se používá v případech požadavku na velkou prostorovou tuhost a menší hmotnost svařované konstrukce. Komůrková konstrukce má za základ konstrukci skříňovou, která je pomocí přivařených výztuh a žeber rozdělena na samostatné uzavřené buňky s velkou stabilitou tvaru při zatížení. Při návrhu lze využít menších tloušťek plechů a profilů, což se může projevit ve 30 % až 50 % úspoře na hmotnosti vzhledem ke konstrukci deskové [11], ale v nárůstu pracnosti z důvodu výztuh. Používají se polotovary ohýbané za studena nebo lisované. Jednotlivé buňky mohou mít různé tvary, viz. obr. 5.6.

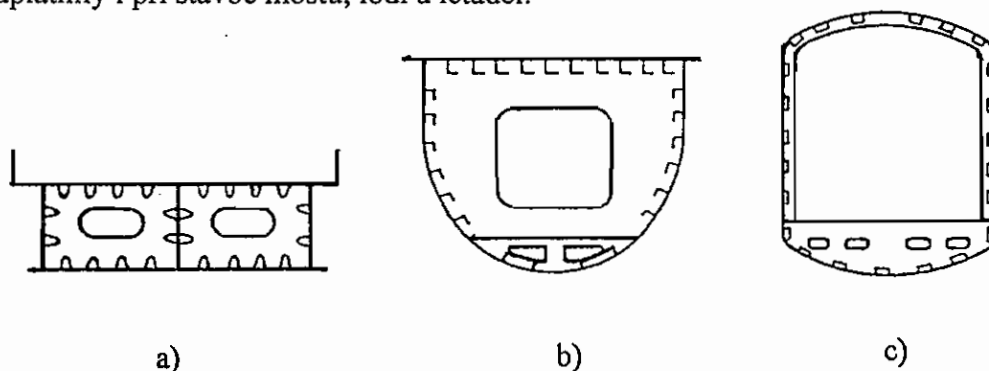


Obr. 5.6 Tvar komůrkové konstrukce
 a) kvádry; b) trojúhelníky; c) čtyřstěny

Tuhost komůrkové konstrukce lze zvýšit použitím tvarových lisovaných výztuh (např. tvaru vln), její hmotnost lze snížit provedením otvorů ve výztuhách. Komůrkové konstrukce se používají např. u loží obráběcích strojů, stojanů lisů a válcovacích stolic nebo u těles velkých převodových skříní.

• Konstrukce skořepinová

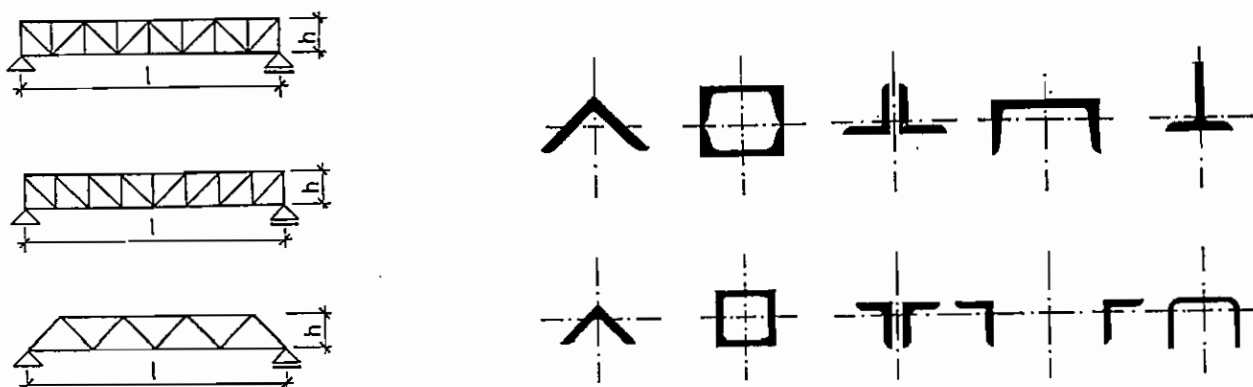
Konstrukce skořepinová (dříve skořápková) je prostorově tuhá a velmi lehká konstrukce. Základem je rám typu skříňové konstrukce s přivařenými bočnicemi skříňových profilů. Krycí plechy celé skořepinové konstrukce jsou tenké, zesílené přivařenými podélnými a příčnými ohýbanými nebo lisovanými výztuhami. Tloušťka výztuh se volí 0,8 až 1,0 tloušťky vyztužovaného plechu. Tím je zaručena tuhost a je zabráněno vyboulení plechů. Skořepinovou konstrukci tvoří nosná kostra a plechový obal, který je rovněž nosným prvkem. Skořepinové konstrukce pro kolejová a silniční vozidla jsou v poslední době prováděny z hliníkových slitin, přičemž se využívá velmi rozmanitý sortiment dodávaných polotovarů. Polotovary z Al-slitin jsou vyráběny za studena protlačováním nebo hranováním. Příklad skořepinové konstrukce je na obr. 5.7. Skořepinové konstrukce se uplatnily i při stavbě mostů, lodí a letadel.



Obr. 5.7 Schéma skořepinové konstrukce
a) most; b) loď; c) vagón

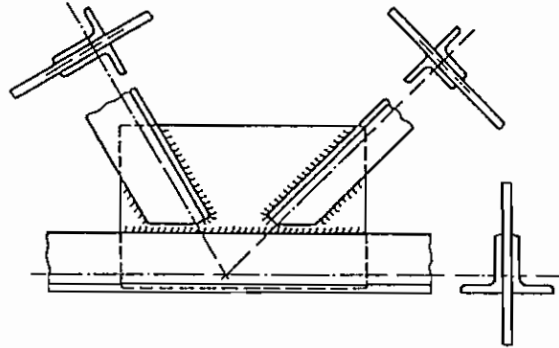
• Konstrukce příhradová

Konstrukce příhradové jsou sestavené z prutů (obr. 5.8). Prut je tvořen jedním nebo dvěma profily. Používají se při stavbě jeřábů, hal, mostů, střech apod. Jsou svařeny z válcovaných profilů L, T, U, I nebo trubek. Trubky mají vysokou stabilitu při namáhání vzpěrem ve všech směrech, ale jsou o cca 50 % dražší než U profil.



Obr. 5.8 a) Příhradové konstrukce
a) geometrické tvary; b) průřezy prutů

Pruty jsou vzájemně přivařeny přímo k sobě nebo pomocí styčnicku (obr. 5.9). Těžištní osy všech prutů musí v místě spojení procházet jedním bodem.



Obr. 5.9 Uzel příhradové konstrukce se styčnickem

Příhradová konstrukce je dostatečně tuhá pro namáhání ohybem. Předpokládá se, že pruty přenášejí pouze osové síly. Obecně platí, že pruty horního pásu jsou přitom namáhány tlakem, pruty dolního pásu tahem. Výplňové pruty (neboli mezipásové pruty) svislé (svislice) jsou namáhány tlakem, výplňové pruty úhlopříčné (diagonály) jsou namáhány tahem. Styčnick je místem koncentrace napětí, je mu nutno věnovat konstrukční pozornost zejména při dynamickém namáhání, tzn. např. zachovat plynulost silového toku v místě spojení. Styčnick má mít co nejjednodušší tvar a má být co nejmenší. Uzavřenou a úhlopříčně vyztuženou příhradovou konstrukci je možno použít i při namáhání krutem. Větší příhradové konstrukce se rozdělí na podskupiny, které se svaří v závodě a do celku se spojí až na staveništi.

5.3 Principy a zásady návrhu svařované konstrukce

Svařovaná konstrukce má být navržena tak, aby byla s přijatelně malou pravděpodobností poruchy schopna užívání po celou dobu životnosti a odolávala spolehlivě všem zatížením. Správně navržená svařovaná konstrukce má malou hmotnost a je vyrobitelná hospodárně.

Při návrhu svařované konstrukce by se mělo postupovat tak, že se na podkladě parametrů rozhodujících pro funkci konstrukce provede v první fázi výpočet hlavních uzlů a svarů konstrukce. Je přitom nutno správně stanovit její zatížení, zvolit vhodné konstrukční materiály a prokázat, že provozní namáhání svarových spojů nepřekročí pevnostní možnosti zvoleného materiálu. Ve druhé fázi se zpracuje konstrukční dokumentace s detailním návrhem tvarů a rozměrů.

Návrh se provádí na základě zkušeností při respektování obecně platných zásad správného konstruování a zejména požadavků norem, předpisů nebo směrnic, např. [7 až 10, 24 až 27]. Obecně platné zásady návrhu jsou přenosné pro převážnou část svařovaných konstrukcí, přesto však je nutno řešit každou svařovanou konstrukci zcela individuálně. Při návrhu je nutno dbát na zvláštnosti svařování, jeho přednosti i nevýhody.

Pracovní kroky při návrhu svařované konstrukce

- Vyjasnění úlohy a analýza požadavků na funkci a na zajištění jakosti konstrukce při respektování podmínek jejího provozu (např. teplota, koroze, otěr).
- Analýza typu zatížení (např. převážně statické, dynamické) a druhu namáhání (např. tah, tlak, ohyb, krut nebo jejich vzájemná kombinace).
- Vypracování variant konceptu návrhu s cílem rovnoměrného namáhání všech svarů. Vycházet pokud možno z již osvědčeného řešení.
- Návrh konstrukčních materiálů, resp. jejich pevnostních skupin.
- Provedení výpočtu svarů podle požadované výpočtové koncepce [7, 8] nebo podle zásad pružnosti a pevnosti.
- Vypracování konstrukčního návrhu a jeho posouzení svářečským inženýrem nebo svářečským technologem.

Principy návrhu svařované konstrukce

Při navrhování svarových konstrukcí je nutno:

Z hlediska zatěžování:

- dbát na rovnoměrný a plynulý průběh siločar ve svarovém spoji,
- vyhnout se změnám tuhosti a koncentracím napětí v místě spoje.

Z hlediska náchylnosti na vznik křehkého a únavového lomu:

- vyhnout se víceosému stavu napjatosti od vnějšího zatížení a vnitřních pnutí,
- navrhnout minimální nutnou velikost svarů a aplikovat nejmenší množství vneseného tepla na jednotku délky svaru,
- vyhnout se křížení a hromadění svarových spojů.

Z hlediska smrštění, deformací a vnitřních pnutí:

- navrhnout symetrické umístění svarů vzhledem k těžištní ose svarku,
- zohlednit konstrukční a technologické opatření minimalizující vznik vnitřních pnutí a deformací,
- vypracovat plán postupu svařování, podskupiny vyrovnat před svařením do celků.

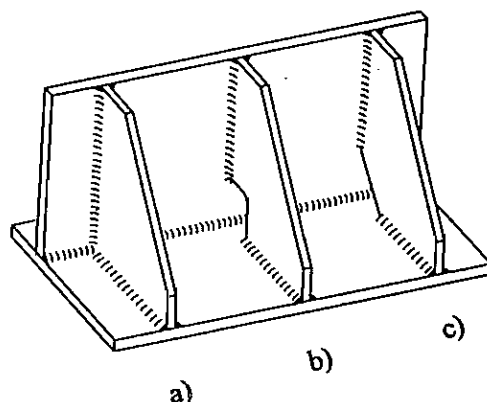
Z hlediska výroby:

- dbát na zvláštnosti zvolené metody svařování,
- omezit montážní svary,
- upřednostnit polohu vodorovnou shora,
- zvolit takový postup svařování, při kterém se mohou jednotlivé spoje svařovat a kontrolovat v průběhu celé výroby,
- využít přípravky a pomůcky, které jsou k dispozici.

Zásady návrhu svařované konstrukce:

- Svařovanou konstrukci navrhnout vždy tak bezpečně, jak je nutno, a tak hospodárně, jak je možno.
- Respektovat normy, směrnice a předpisy platné pro návrh a výrobu svařované konstrukce.
- Vycházet z namáhání konstrukce a na jeho základě volit vhodný materiál, a to jak po stránce pevnosti, tak i svařitelnosti.
- Volit co nejméně svarů. Nejlepší svařovaná konstrukce je ta, na které se co nejméně svařuje.
- Příkladový materiál volit pokud možno stejného složení jako je základní materiál.

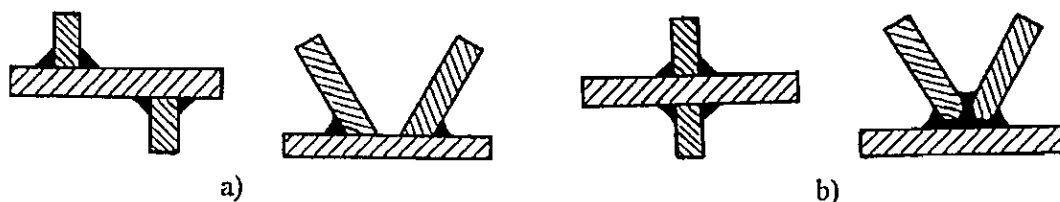
- Zajistit, aby ve svařované konstrukci po jejím vyrobení zůstalo minimální vnitřní pnutí, pokud možno bez místních napěťových špiček. U dynamicky namáhané konstrukce minimalizovat vrubové účinky. Provádět svary průběžné, věnovat pozornost koncům svarů.



Obr. 5.10 Připojení výztuh

- pro dynamické namáhání do tloušťky plechu 15 mm;
- pro dynamické namáhání při tloušťce větší než 15 mm;
- velký vrubový účinek v případě, že svar nebyl proveden po celém obvodu výztuhy, pouze pro statické namáhání

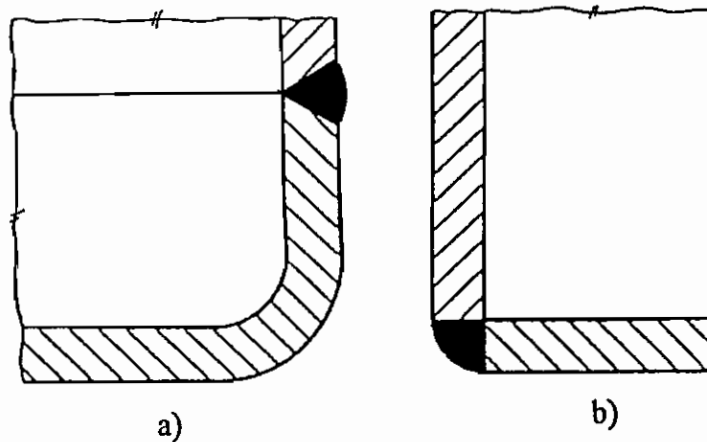
- Všechny nosné svary dimenzovat na základě výpočtu, resp. velikost svarů kontrolovat výpočtem. Kromě zatížení od sil a momentů vzít při návrhu do úvahy i další požadavky, jako např. odolnost proti oxidaci, těsnost svarů, korozivzdornost.
- Volit co nejmenší rozměry svarů, nenavrhovat je větší, než je podle výpočtu nutno.
- Volit způsob svařování, který do svarového spoje vnáší co nejméně tepla. Zkracovat čas potřebný ke svařování.
- Vyhybat se hromadění a křížení svarů. Vysoký lokální účinek tepla v místě spoje tří rovin může mít za následek vznik tříosého stavu napjatosti.



Obr. 5.11 Svařené uzly

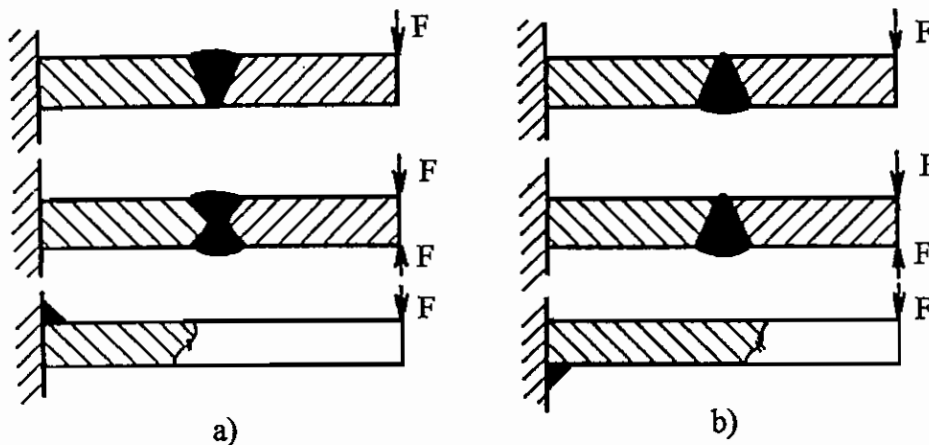
- správné řešení;
- nesprávné řešení

- Nosné svary umístit pokud možno do nejméně namáhaných míst.



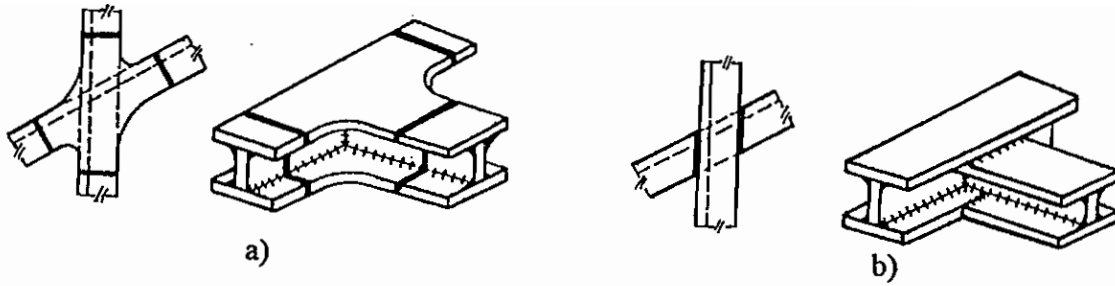
Obr. 5.12 Přivařené dno tlakové nádoby
a) správné řešení; b) nesprávné řešení

- Přednostně volit souměrné svary. U svarů oboustranných je příznivější průběh silového toku než u svarů jednostranných.
- Svary umístit do těžištní osy dílů nebo symetricky co nejbližší k této ose. Svary nedávat do míst již zeslabených konstrukčním vrubem, zabránit kumulaci vrubů.
- Kořen svarů nemá ležet v místech vysoce namáhaných, zejména ne v oblasti tahového napětí.



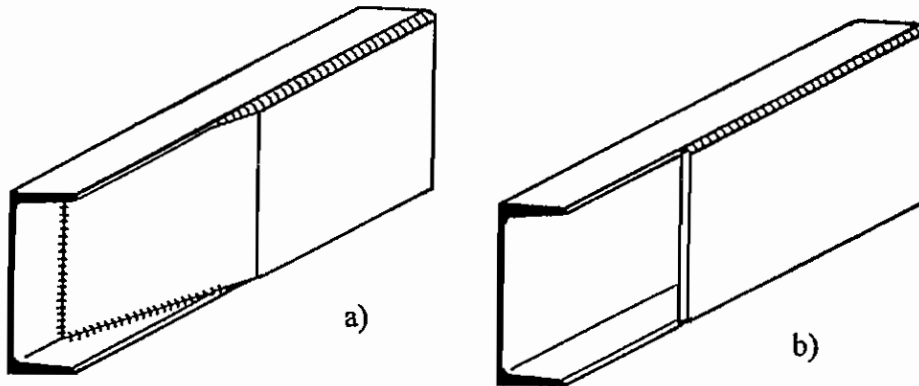
Obr. 5.13 Umístění svarů při různém zatížení
a) správné řešení; b) nesprávné řešení

- Pořadí svarů volit takové, aby se svařované dílce mohly při svařování volně prodlužovat a smršťovat. Velké svarky rozdělovat do konstrukčních podskupin. Podskupiny v případě potřeby vyrovnat. Pořadí svarů vyznačit na výkrese.
- Zabránit skokovým změnám průřezu, volit pozvolné přechody různých tloušťek. U dynamicky namáhaných konstrukcí zajistit rovnoměrný průběh silového toku.



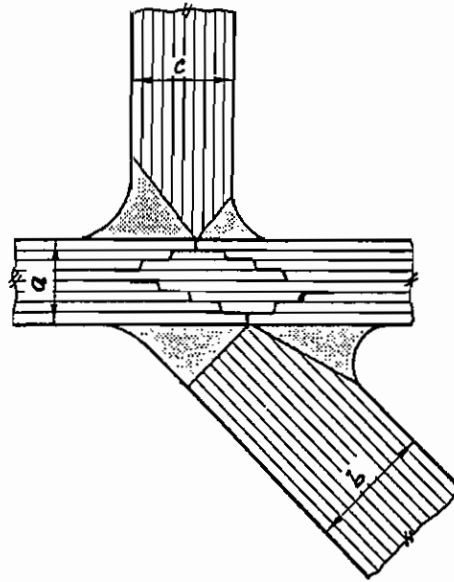
Obr. 5.14 Svařené uzly konstrukce namáhané
a) dynamicky; b) staticky

- Náhlý přechod tuhosti mezi uzavřeným a otevřeným průřezem má za následek lokální koncentraci napětí a nebezpečí lomu při dynamickém namáhání. Při návrhu svařované konstrukce je požadavek na těleso nejen stejné pevnosti, ale i stejné tuhosti.



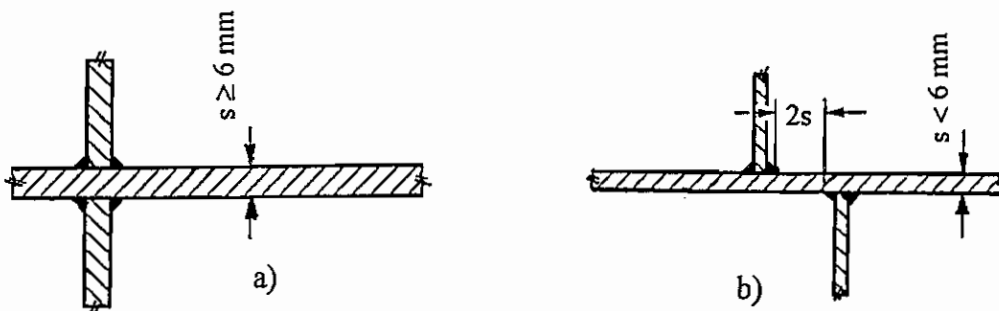
Obr. 5.15 Změna tuhosti průřezu
a) správné řešení; b) nesprávné řešení

- Vyhýbat se příliš tuhým konstrukčním detailům, které neumožní ani malé deformace, vyhýbat se velkým spojitém tloušťkám.
- Zabránit tahovému namáhání ve směru tloušťky válcovaných plechů s ohledem na možný výskyt lamelárních trhlin. Tahovou napjatost mohou způsobit např. velké koutové svary na povrchu plechu.



Obr. 5.16 Výskyt lamelárních trhlin v místě připojení průřezu

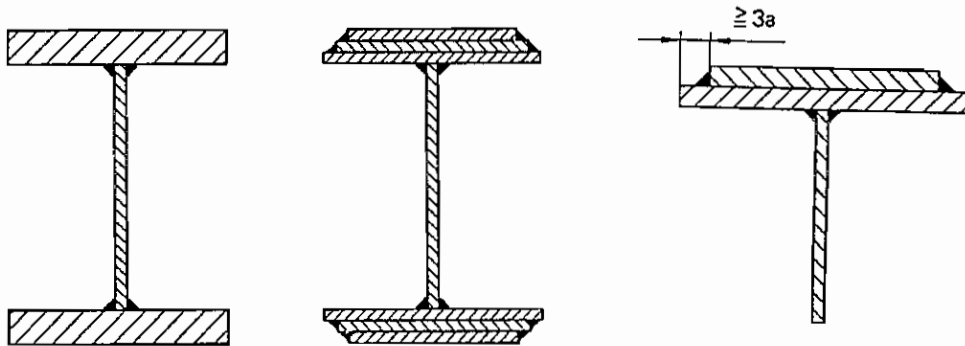
- Nesvařovat v místech ohýbaných za studena. Velkou deformací vznikají ve vnějších povrchových vláknech vysoká tahová napětí a je zde nebezpečí vzniku trhlin.
- Při svařování válcovaných profilů z neuklidněné oceli věnovat pozornost místům se zvýšenou segregací C, S, P (místa u vnitřních zaoblení). Teplem při svařování se oblast segregací nataví a je zde nebezpečí vzniku pórů a trhlin.
- Pokud to dovolí provozní zatížení a prostředí, svařovat tenké plechy přerušovanými svary.
- Z obou stran plechu lze přímo proti sobě přivařit výztuhy v případě, že je tloušťka plechu větší než 6 mm. Při menší tloušťce je nutno výztuhy proti sobě posunout o vzdálenost nejméně dvou tloušťek plechu, aby se zabránilo soustředování svarů do jednoho místa.



Obr. 5.17 Přivaření výztuh k plechu
a) tloušťka plechu větší než 6 mm; b) tloušťka menší než 6 mm

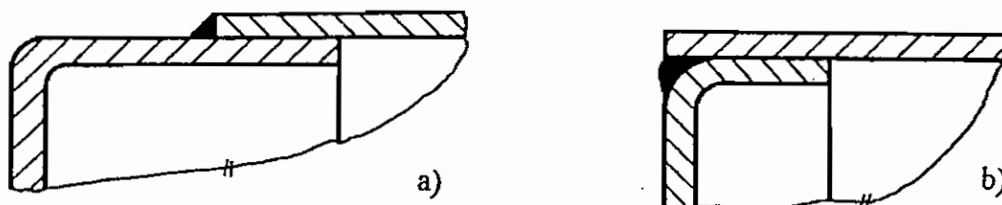
- Přivařená výztuha k nosníku s průřezem U nesmí zabraňovat deformaci příruby při namáhání nosníku.
- Konstrukce svařovaného nosníku s průřezem I je hospodárná, je-li výška nosníku rovna 1/10 až 1/15 vzdálenosti podpor nosníku. Krční svary nosníku nejsou zpravidla větší než je polovina tloušťky stojiny, jejich přerušováním lze zmenšit deformaci nosníku

při svařování. Tloušťka pásnic nemá být větší než 50 mm, v případě požadavku na větší tloušťku se pásnice svařují z několika tenčích pásů.



Obr. 5.18 Tvary pásnic svařovaných nosníků

- Vyhýbat se takovým konstrukčním uzlům, které zachycují vodu, umožňují srážení vodních par a jsou příčinou koroze.
- Dbát na dobrou přístupnost svarů pro svářeče a kontrolu nejen ve výrobním závodě, ale i při provozních prohlídkách.



Obr. 5.19 Připojení dna nádrže
a) vhodnější řešení; b) nesprávné řešení

- Volit optimální sled kladení housenek (např. střídavě vratný krok má za následek minimální deformaci, ale velká vnitřní pnutí).
- Navrhnout vhodné svařovací přípravky.
- Omezovat počet montážních svarů. Jejich jakost mohou nepříznivě ovlivnit povětrnostní podmínky a nepříznivá poloha při svařování.
- Přihlížet k možnosti mechanizace a automatizace svařování. Přednostně navrhovat svary podélné nebo kruhové, nepřerušované.
- Volit vhodný rozsah kontroly svařované konstrukce. Volba vyššího stupně jakosti přináší výrazné zvýšení výrobních nákladů.
- Zvažovat nutnost předpisu žíhání ke snížení pnutí. Každá tepelná operace zvyšuje výrobní náklady na svařovanou konstrukci a prodlužuje výrobní cyklus.

5.4 Návrh svařované konstrukce pro mechanizovanou, automatizovanou a robotizovanou výrobu

Cílem návrhu je umožnit hospodárnou výrobu většího počtu stejných konstrukcí s požadovanou použitelností a únosností. Návrh pro mechanizované, automatizované a robotizované svařování (M, A, R) má za cíl zvyšovat kvalitu svarů a snižovat náklady na svařování. Obecně platí, že lze automatizovat nebo robotizovat většinu svarů, jde však o návratnost investic.

Návrh pro M, A, R klade vyšší požadavky na způsob uvažování při provádění návrhu. Musí se vzít v úvahu potřebná jednoduchost a jednoznačnost konstrukce, použitá technologie a vysoký výkon svařování při M, A, R. Charakteristickým znakem je integrování více operací a jejich spojování se svařováním.

Kritéria pro M, A, R:

- Zvýšení produktivity práce. Jde přitom buď o snížení vedlejších časů (např. manipulačních časů za pomoci manipulátoru) nebo o snížení hlavních časů, tj. intenzifikace svařování (zvýšení odtaveného množství přídavného materiálu).
- Zvýšení kvality svarových spojů (např. pravidelná kresba a hladkost povrchu svaru, stejné rozměry svarů a stejný závar při opakování výroby).
- Požadovaný počet svarek v sérii. Podle něho se navrhne stupeň automatizace. Velikost nákladu na svarek se s rostoucí velikostí série snižuje geometrickou řadou.

Při návrhu svařované konstrukce uvažovat jako vhodné metody svařování MIG, MAG, WIG, pod tavidlem a bodové svařování. U odporového svařování lze při A, R vzhledem ke zvýšené kvalitě svarů snížit potřebný počet bodů spoje. Maximální rozměry navrhovaného svarku jsou dané tvarem a rozměrem pracovního prostoru M, A, R a svařovacích polohovadel či přípravků.

Svařovanou konstrukci je nutno navrhnout tak, aby procesu svařování nebránil nevhodný tvar svarů, umístění a průběh svarů, nevhodně zvolené základní a přídavné materiály nebo nesprávné svařovací parametry. Zvýšení produktivity obloukového M, A, R je možné zejména zrychlením manipulačních pohybů. Zvýšení rychlosti svařování je vázáno na ostatní svařovací parametry. M, A, R vyžadují důkladnou přípravu procesu svařování a zvýšení přesnosti výroby dílců a jejich svarových úkosů. Podobně jako pro ruční svařování platí i pro M, A, R pravidlo, že správná příprava dílců znamená z 80% zaručení kvality svarů.

Pro M, A, R je nutno zajistit:

- Opakovanou přesnost dílců před svařením (např. u výlisků dochází k postupné změně rozměrů vlivem opotřebení razníků, provádět proto korekci nastaveného programu svařování. Při termickém řezání dílců ovlivňuje jejich rozměry případná změna šířky prořezu. Ideální dílec pro M, A, R je obrobek z CNC frézky).
- Přesnost sestavení polotovaru. Na ni má největší vliv konstrukce sestavovacího přípravku, stehovacího přípravku a svařovacího přípravku. Dodržení opakované polohy svaru je základním předpokladem pro jeho kvalitní provedení podle předepsaného stupně B, C, D [2, 3].

Pro M, A, R jsou nejméně náročné koutové svary o velikosti 3 a více mm, provedené jako jednovrstvové v pozici PA podle ČSN ISO 6947. Náročnější jsou menší koutové svary, tupé svary a vícevrstvé svary.

Při návrhu svařované konstrukce pro M, A, R respektovat následující požadavky:

Z hlediska zjednodušení:

- Dílce pro svařování sestavovat ze shora.
- Svařovat „z vnějšku“.
- Přednost koutovým svarům před svary tupými.
- Přednost jednovrstvovým svarům před svary vícevrstvovými.
- Přednost průběžným tenkým svarům před tlustými svary přerušovanými.
- Přednost přímým a kruhovým svarům před svary oválnými a šikmými.
- Přednost jednostranným svarům před svary oboustrannými.
- Přednost dlouhým tenkým svarům před tlustými krátkými svary.
- Přednost poloze svařování PA před polohami ostatními.

Z hlediska souvisejících výrobních operací:

- Přednost dílům tvářeným před svařovanými.
- Přednost vyztužování plechů tvářením před vyztužováním přivařenými výztuhami.
- Přednost vystřiženým nebo lisovaným dílům před díly termicky řezanými.
- Přednost tvářeným plechovým dílům před přivařenými (např. osy, narážky, vedení).

Z hlediska manipulace se svarky:

- Menší hmotnost
- Dobrá skladovatelnost
- Vhodnost ukládání dílů a svarků na sebe
- Jednoznačný tvar pro ukládání
- Symetrie nebo výrazná nesymetrie svarku

5.5 Tolerance a mezní odchylky svarků

Dodržení předepsaného tvaru a rozměrů svarků a svařovaných konstrukcí je nutné především z hlediska jejich funkce. Dalším hlediskem může být např. bezproblémová montáž nebo důvody estetické. Přidavky na obrábění svarků zohledňují velikost jejich deformací při svařování. Příliš malé a z provozních důvodů ani nepotřebné tolerance znamenají vysoké zvýšení pracnosti při svařování a nárůst výrobních nákladů. Naopak příliš velké tolerance zvyšují náklady na opracování.

Základní tolerance pro svařované konstrukce stanovuje norma [18]. Mezní odchylky svarků a přidavky na jejich opracování jsou uvedeny v normě [19].

• Tolerance délek a úhlů

Norma [18] specifikuje základní tolerance délek a úhlů, tvaru a polohy svařovaných konstrukcí ve čtyřech tolerančních třídách A, B, C, D, které jsou odvozeny z obvyklé přesnosti dosahované při výrobě. Uvedená norma platí pro svarky, svařované sestavy, svařované konstrukce atd. Příklady velikosti tolerance délek jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Tolerance délek (mm) podle [18]

Třída tolerance	Jmenovitý rozměr l (mm)			
	2 až 30	nad 30 do 120	nad 120 do 400	nad 400 do 1000
A		± 1	± 1	± 2
B	± 1	± 2	± 2	± 3
C		± 3	± 4	± 6
D		± 4	± 7	± 9

Příklady velikosti tolerance úhlů jsou v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2 Tolerance úhlů $\Delta \alpha$ podle [18]

Třída tolerance	Jmenovitý rozměr l (mm)	
	do 400	nad 400 do 1000
A	± 20'	± 15'
B	± 45'	± 30'
C	± 1°	± 45'
D	± 1°30'	± 1°15'

- **Tolerance přímosti, rovinnosti a rovnoběžnosti**

Tyto tolerance jsou normou [18] specifikovány ve čtyřech třídách tolerance E, F, G, H. Jejich velikost závisí na jmenovitém rozměru l a je v rozsahu od 0,5 mm (třída tolerance E, jmenovitý rozměr do 120 mm) až do 40 mm (třída tolerance H, jmenovitý rozměr nad 20000 mm).

Zvolená třída tolerance se označuje na výkrese, např.: Třída tolerance ČSN EN ISO 13920-A, třída tolerance ČSN EN ISO 13920-AE.

Podle normy [19] se podle tvaru a složitosti svarku volí tři stupně přesnosti svarků 1, 2, 3. Stupeň přesnosti se udává na výkrese v technických požadavcích, případně v popisovém poli, např. přesnost 1-ČSN 05 0235. Stupeň přesnosti 2 se na výkrese neuvádí. Pro rozměry přesnější, než udává stupeň 1 nebo méně přesné než udává stupeň 3, je nutno odchylky uvést zvlášť na výkrese u příslušného jmenovitého rozměru. Tabulka v normě [19] udává mezní odchylky tolerance rozměrů pro stupeň přesnosti 1, 2, 3.

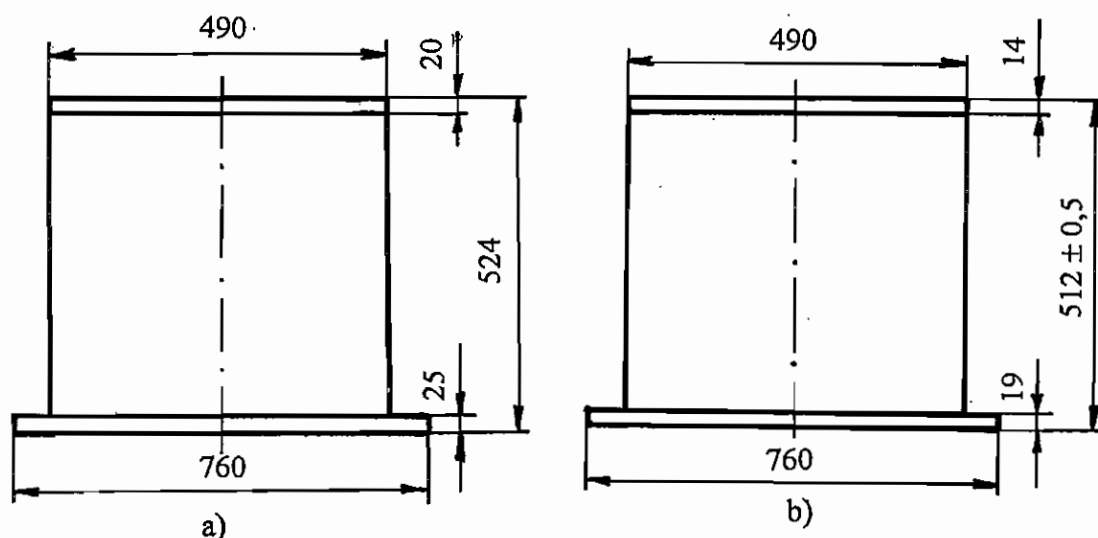
- **Přídavek na obrábění svarku**

Přídavek se podle normy [19] určí z tabulky podle základního rozměru z a směrodatného rozměru s. Příklady velikosti přídavku na obrábění jsou uvedeny v tabulce 5.3.

Tabulka 5.3 Jmenovitý přídavek p (mm) na plochu pro obrábění podle [19]

z (mm)	s (mm)		
	do 100	100 až 500	500 až 1000
do 80	3	4	4
80 až 315	4	4	5
315 až 800	4	5	6
800 až 1200	5	6	7

Např. pro svarek podle obr. 5.20 je základní rozměr $z = 512$ mm, směrodatný rozměr $s = 760$ mm. Přídavek na plochu je podle tab. 5.3 roven 6 mm, pro obě opracované plochy $2p$ je 12 mm.



Obr. 5.20 Rozměry svarku
a) po svaření; b) po obrobení

5.6 Návrh svaru a svarových ploch

Svarový spoj je nerozebíratelné spojení zhotovené svařováním. Svar je část svarového spoje, vytvořená v důsledku chladnutí a krystalizace roztaveného kovu (při tavném svařování), nebo v důsledku plastické deformace (při tlakovém svařování).

Svary je možno rozdělit podle více hledisek. V technické praxi se používá následující dělení svarů:

Podle účelu svaru:

- Nosné svary – přenášejí síly při zatížení svarků.
- Spojovací svary – pouze trvale spojují dílce.
- Stehy – zajišťují vzájemnou polohu a tvar dílců v průběhu svařování.
- Návary – vrstva svarového kovu vytvořená navařováním na základní materiál.
- Těsnící svary – svar nejen spojuje dílce, ale nepropouští kapalná nebo plynná média.

Podle umístění svaru vzhledem k hlavní ose konstrukce:

- Podélné – souběžně s hlavní osou.
- Příčné – leží v rovině kolmé na hlavní osu.
- Šikmé – leží v rovině svírající s hlavní osou jiný úhel než 90° .
- Obvodové – příčné svary u souměrných těles válcového tvaru.

Podle podélného průběhu svaru:

- Průběžné – vytvořené bez přerušování po celé délce spoje.
- Přerušované – přerušované po celé délce spoje (n = počet svarů, l = délka svaru, e = mezera mezi sousedními svary). Přerušovaný svar z obou stran dílce může být buď dvoustranný přerušovaný nebo střídavě přerušovaný.

Podle vzájemné polohy spojovaných dílců:

- Tupý – vznikne svařením dvou dílců navzájem k sobě ustavených čelními povrchy.
- Rohový – vznikne svařením dvou dílců umístěných pod úhlem, svar je v místě spojení jejich okrajů. Jde o variantu koutového svaru.
- Koutový – vznikne svařením dvou dílců umístěných buď pod úhlem (čelo jednoho dílce se přivařuje k bočnímu povrchu druhého dílce – spoj T, nebo umístěných souběžně (dílců se částečně překrývají – přeplátovaný spoj).
- Lemový – vznikne v důsledku roztavení lemových okrajů plechů, obvykle bez použití přídavných materiálů.
- Děrový – vyplňuje otvor (okrouhlý nebo žlábek) vyrobený v jednom ze svařovaných dílců.
- Bodový – svařené dílce se spojují jednotlivými svarovými ččkami při odporovém svařování.

Podle místa, kde se svařuje:

- Dílenský – svařuje se v dílně výrobního závodu.
- Montážní – vyhotovený při montáži konstrukce.
- Oprávérenský – v případě renovace nebo opravy již provozované konstrukce.

Podle postupu svařování:

- Jednovrstvový svar – je vytvořen jednou svarovou vrstvou. Vrstva je tvořena jednou nebo více svarovými housenkami vedle sebe.
- Vícevrstvý svar – skládá se z několika vrstev nad sebou.
- Kořenová vrstva – je to první svarová vrstva v kořeni svaru.
- Krycí vrstva – je to poslední svarová vrstva tvořící povrch svaru.
- Podložený svar – podložení je buď zhotovení svarové housenky ze strany kořene svaru nebo pomocí podložky (přivařené nebo odnímatelné).

Podle sledu housenek:

- Svar provedený jedním sledem.
- Svar provedený střídavě.
- Svar provedený vratným krokem.
- Svar provedený střídavě vratným krokem.
- Svar provedený kaskádovitě.

Svarové plochy mají za úkol v první řadě umožnit dokonalé metalurgické spojení mezi svarovým kovem, resp. přídavným a základním materiálem. Musí také umožnit dobrý přístup ke kořeni svaru, vystupování strusky ze svarového kovu na povrch housenek a bezchybné provedení svaru. Musí být navrženy tak, aby byla co nejmenší spotřeba přídavného materiálu a co nejmenší deformace a vnitřní pnutí ve svarovém spoji. Nedostatečná příprava svarových úkosů je častou příčinou vad ve svařované konstrukci.

Tvar a rozměry svarových ploch jsou ovlivňovány těmito faktory:

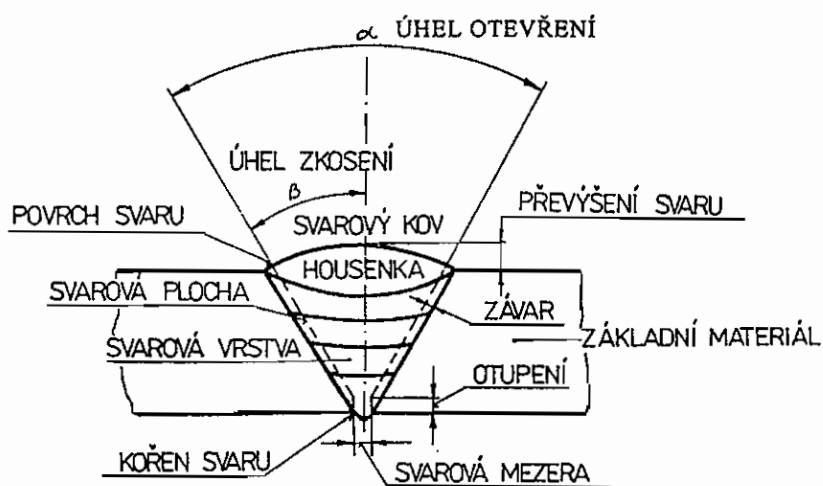
- Svařovaný materiál (různá tepelná roztažnost, tepelná vodivost a teplota tavení např. oceli, mědi, slitin hliníku).
- Tloušťka svařovaných dílů (různá přístupnost ke kořeni svaru).
- Metoda svařování (jiné úhly rozevření jsou pro svařování ruční plamenové a pro svařování MAG při stejné tloušťce svařovaného ocelového plechu).
- Druh spoje (tupý, přeplátovaný).

- Konstrukční řešení svařovaných dílů a místní přístupnost pro svařování. Tvar a velikost svařované konstrukce.
- Technologie a poloha svařování, možnost předehřevu dílu a kontroly svaru.
- Provozní podmínky svarového spoje, druh a velikost zatížení (statické, dynamické).
- Stupeň jakosti svarového spoje podle [2, 3].
- Výrobní možnosti. Svarové plochy je možno připravit tepelnými způsoby (řezání kyslíko-acetylenovým plamenem, řezání plazmou) nebo mechanickými způsoby (stříhání, broušení, soustružení, hoblování, frézování, řezání).

Obecně platí, že použití jednotlivých tvarů svarových ploch se řídí podle konstrukčních, technologických a výrobních podmínek. Příprava svarových ploch se provádí podle normy [20] pro všechny druhy ocelí, pro plně provařené tupé spoje a pro metody svařování 3, 111, 131, 135 a 141. Pro metodu 12 se svarové plochy připravují podle normy [21]. Konce potrubí se pro svařování upravují podle normy [22].

Tvary a rozměry svarových ploch jsou podle norem [20, 21] tolerovány. Pro úhel otevření α a úhel zkosení β je předepsán rozsah úhlu, např. pro tloušťku materiálu $3 \text{ mm} \leq t \leq 10 \text{ mm}$ je předepsáno pro V svar: $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$, pro poloviční V svar: $35^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$. Pro svarovou mezeru b je předepsán dovolený rozsah velikosti, např. pro tloušťku materiálu $3 \text{ mm} \leq t \leq 10 \text{ mm}$ je předepsáno pro V svar: $b \leq 4 \text{ mm}$, pro poloviční V svar: $2 \text{ mm} \leq b \leq 4 \text{ mm}$. Pro otupení c je předepsán dovolený rozsah velikosti, např. pro tloušťku materiálu $3 \text{ mm} \leq t \leq 10 \text{ mm}$ je předepsáno pro V svar: $c \leq 2 \text{ mm}$, pro poloviční V svar: $1 \text{ mm} \leq c \leq 2 \text{ mm}$. Svislé a podélné hrany musí být zbaveny otřepů a mohou být sraženy (až 2 mm).

Tupé svary je možno provést bez zešikmení hran, tj. jako I svary nebo s úpravou hran, tj. plně nebo poloviční svary V, X, U, Y, W. Pro zajištění dobrého provaření kořene a zejména tam, kde není možno provést vydrážkování a podložení kořene, se svařované dílce sestaví s příslušnou svarovou mezerou. Normy [20, 21] stanovují úhel otevření α , resp. úhel zkosení β , velikost otupení a velikost mezery.



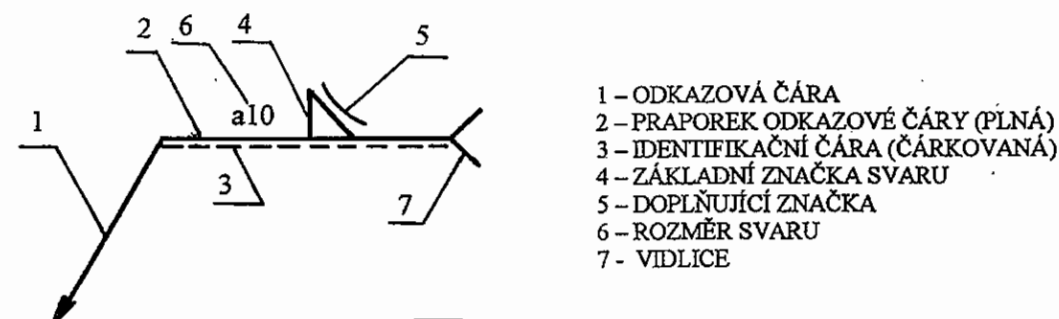
Obr. 5.21 Názvosloví tupého svaru

Za předpokladu, že je svar dobře přístupný z obou stran se mají navrhovat symetrické oboustranné svary. Ušetří se přídavný materiál (např. oboustranný V svar má dvakrát menší průřez než svar V jednostranný při stejné tloušťce svařovaného plechu), čas a energie a zmenší se deformace a vnitřní pnutí. Tupé svary jsou relativně náročné na přípravu svarových ploch.

5.7 Označování svarů na výkresech

Označení svarových nebo pájených spojů musí poskytovat všechny potřebné údaje o spoji, aby nebylo nutno uvádět na výkrese doplňující poznámky. Označování spojů na výkresech se provádí podle normy [23]. Označení zahrnuje základní značku, která může být podle potřeby doplněna údajem o rozměru svaru a doplňující značkou. Údaje o přípravě svarových ploch se uvádějí pokud možno v pracovním postupu, výjimečně na výkresech v blízkosti označení spoje.

Značky svarů se umísťují buď na praporek odkazové čáry nebo na identifikační čáru. Názvosloví pro označování je uvedeno na obr. 5.22.



Obr. 5.22 Označování svarů

Pokud je to nutné, napíše se do vidlice na konci praporku odkazové čáry další údaje a to v pořadí:

- metoda svařování (např. podle ISO 4063),
- stupeň jakosti (např. podle ISO 5817 a ISO 10042),
- poloha svařování (např. podle ISO 6947),
- přídavné materiály (např. podle ISO 544, ISO 2560 a ISO 3581),

Jednotlivé údaje se od sebe oddělí lomítkem.

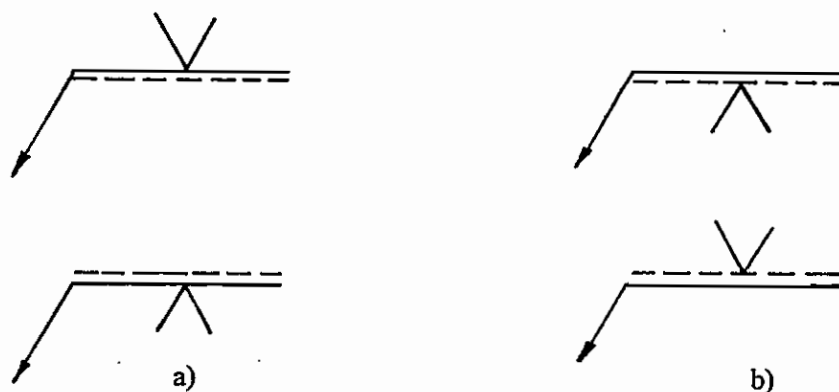
Svar, který má být zhotoven po celém obvodu se označí kružnicí a montážní svar praporkem. Tyto doplňkové značky se umístí do místa spoje praporku s odkazovou čarou.

• Umístění značek

Přerušovaná čára může být umístěna nad nebo pod plnou čarou. U svarů symetrických může být přerušovaná čára vynechána. Odkazová čára značky se podle potřeby (tj. podle místa na výkrese) kreslí buď na stranu, kde je svar (svar je tedy na straně odkazové čáry) nebo na stranu opačnou, kde není svar (svar je potom na straně protilehlé k odkazové čáře). U svarů $\frac{1}{2}V$, $\frac{1}{2}Y$ a $\frac{1}{2}U$ musí šipka odkazové čáry směřovat proti svarové ploše,

na které bude zhotoveno zkosení. Odkazová čára se podle potřeby kreslí vzhledem ke svaru zleva, zprava, ze shora, zdola, tzn., že její poloha nemá zvláštní význam, vždy však musí být ukončena šipkou. Praporek odkazové čáry se kreslí rovnoběžně se spodním okrajem výkresu. Není-li to z důvodů místa možné, kreslí se praporek kolmo na spodní okraj výkresu.

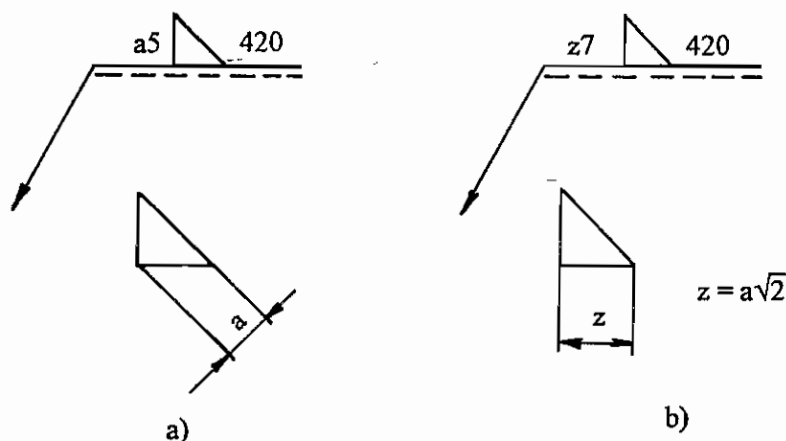
Rozhodující důležitost v označování svarů má umístění základní značky svaru. Je-li svar na straně odkazové čáry, umístí se značka svaru na plnou čáru, přičemž nemá zvláštní význam zda značka směřuje nad či pod tuto čáru (viz obr. 5.23). Je-li svar na straně protilehlé k odkazové čáře, umístí se značka svaru na přerušovanou čáru.



Obr. 5.23 Poloha značky vzhledem k praporku
 a) svar je na straně odkazové čáry;
 b) svar je na straně protilehlé k odkazové čáře

• **Rozměry svarů**

Rozměry svarů se píše buď před základní značku svaru nebo za základní značku. Před značku se umístí hlavní rozměr svaru vztahující se k příčnému řezu svaru, za značku se uvádí délka svaru. Velikost koutového svaru se může uvést dvěma způsoby, viz obr. 5.24.

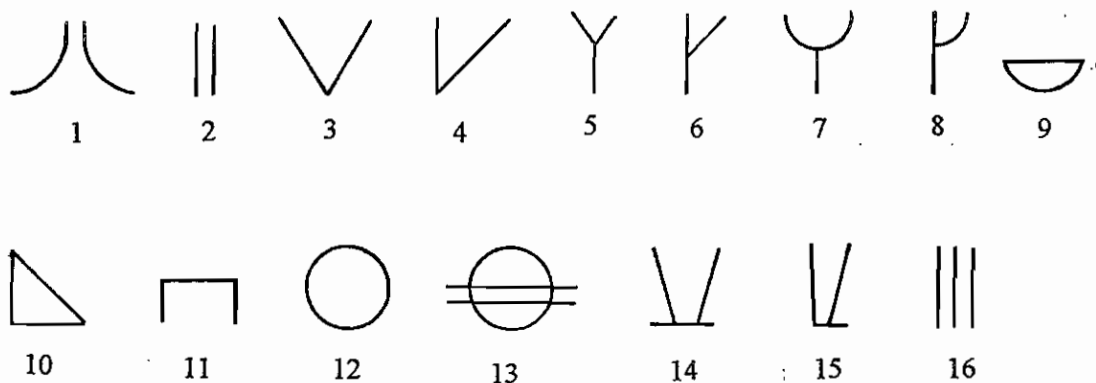


Obr. 5.24 Označení velikosti koutového svaru
 $a = 5 \text{ mm}$, $l = 420$

Pokud není za značkou uveden rozměr, je svar proveden po celé délce svařovaných dílců. Vzdálenost svaru od okraje dílce se neuvádí v označení svaru, ale kótou na výkrese.

- Základní značky**

Základní značky jsou uvedeny na obr. 5.25.

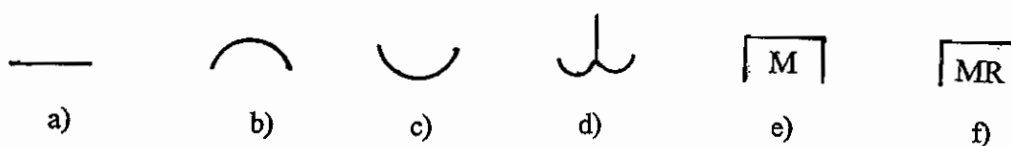


Obr. 5.25 Základní značky svarových spojů

- | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------|
| 1) lemový svar; | 2) I-svar; | 3) V-svar; | 4) ½V-svar; |
| 5) Y-svar; | 6) ½Y-svar; | 7) U-svar; | 8) ½U-svar; |
| 9) podložení svaru; | 10) koutový svar; | 11) děrový (žlábkový) svar; | |
| 12) bodový svar; | 13) švový svar; | 14) V-svar se strmým úkosem; | |
| 15) ½V-svar se strmým úkosem; | 16) čelní plochý svar | | |

- Doplňující značky**

Doplňující značky jsou uvedeny na obr. 5.26.

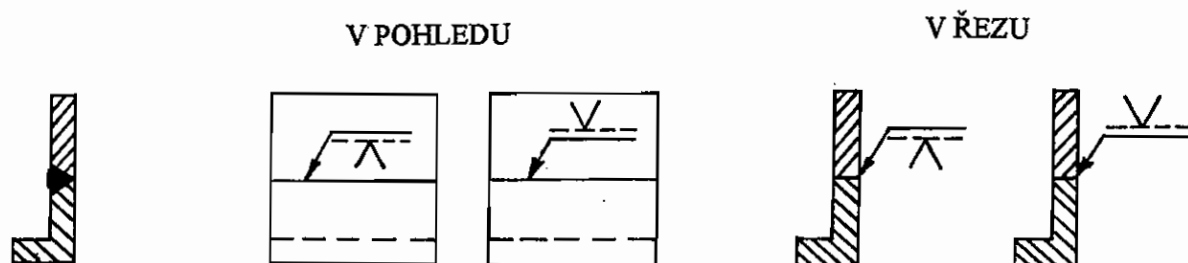


Obr. 5.26 Doplnující značky svarových spojů.

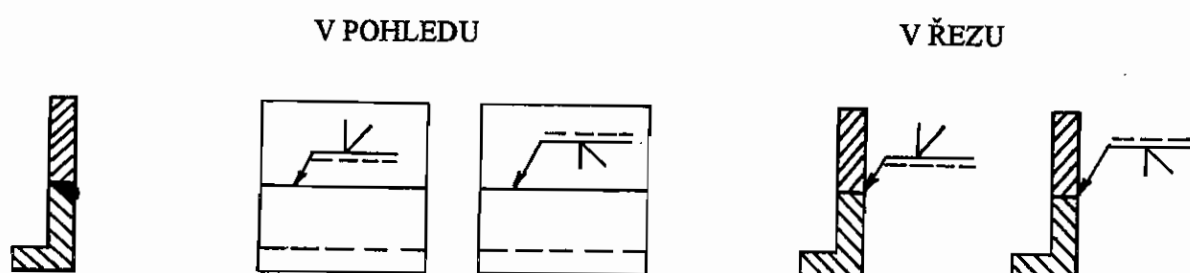
Tvar povrchu svarů

- | | | |
|-------------------------|------------------------|------------|
| a) plochý; | b) převýšený; | c) vydutý; |
| d) opracované přechody; | e) přivařená podložka; | |
| f) odnímatelná podložka | | |

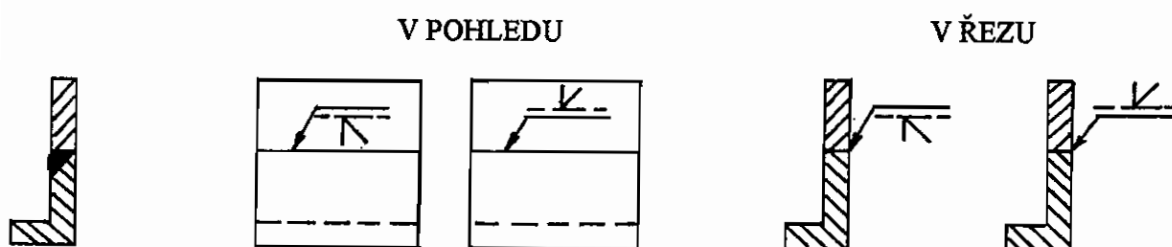
• Příklady označení svarů



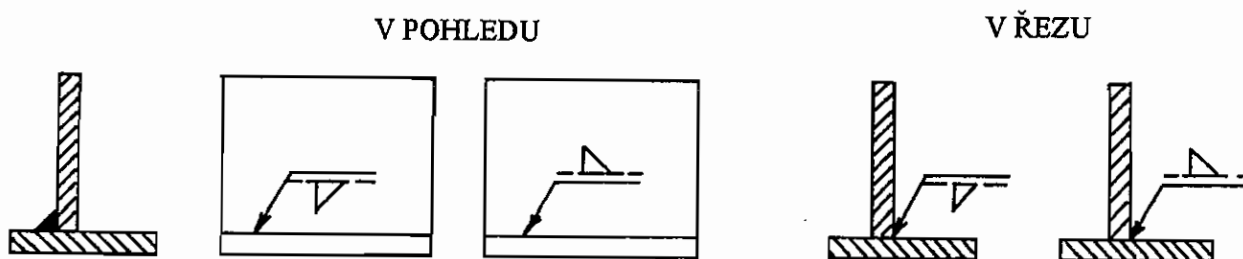
Obr. 5.27 Označení V-svaru
Svar je na straně protilehlé k odkazové čáře



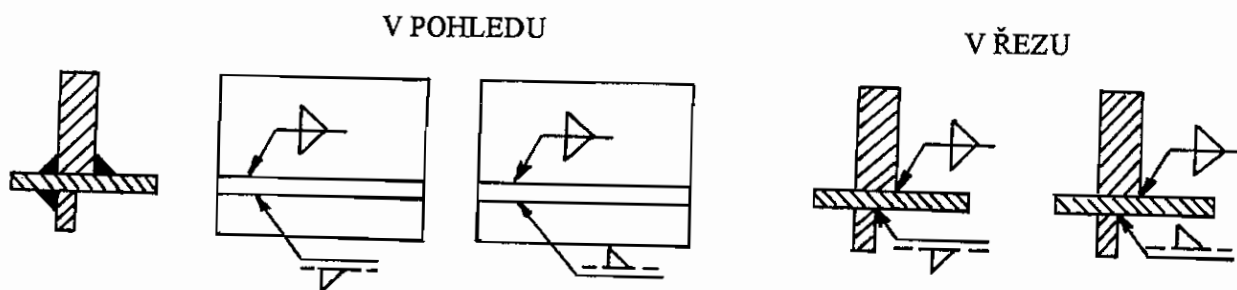
Obr. 5.28 Označení 1/2V-svaru
Svar je na straně odkazové čáry



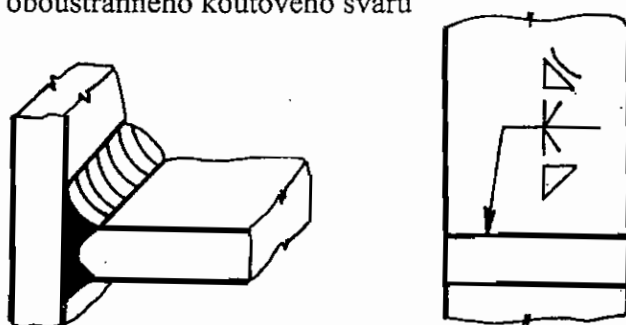
Obr. 5.29 Označení 1/2V-svaru
Svar je na straně protilehlé k odkazové čáře



Obr. 5.30 Označení koutového svaru
Svar je na straně protilehlé k odkazové čáře



Obr. 5.31 Označení oboustranného koutového svaru



Obr. 5.32 Označení oboustranného $\frac{1}{2}V$ -svaru, převařeného koutovým svarem
Horní koutový svar má vydutý tvar povrchu

Literatura

- ČSN EN 729-1 až 729-4. Požadavky na jakost při svařování. Tavné svařování kovových materiálů, 1996.
- ČSN EN 25817. Svarové spoje ocelí zhotovené obloukovým svařováním. Směrnice pro určování stupňů jakosti, 1995.
- ČSN EN 30042. Svarové spoje hliníku a jeho svařitelných slitin zhotovené obloukovým svařováním. Směrnice pro určování stupňů jakosti, 1997.
- ČSN EN ISO 6520-1. Svařování a příbuzné procesy. Klasifikace geometrických vad kovových materiálů. Část 1: Tavné svařování, 2000.
- ČSN 73 2601. Provádění ocelových konstrukcí, 1989. Resp. ČSN P ENV 1090-1.
- ČSN 69 0010-6-2. Tlakové nádoby stabilní. Technická pravidla. Výroba. Část 6.2: Svařování, 1996.
- ČSN 05 0120. Výpočet svarových spojů strojních konstrukcí, 1998.
- ČSN 73 1401. Navrhování ocelových konstrukcí, 1984.
- DIN 18800. Teil 1. Stahlbauten, 1990.
- STN 73 1401. Navrhovanie ocelových konstrukcí, 1998.
- FALTUS, F. aj.: Příručka svařování. III. díl. Výpočet svarů a navrhování svařovaných konstrukcí. SNTL, Praha 1960.
- NEUMANN, A.: Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure. Teil I – IV. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1993.
- NEUMANN, A.: Kompendium der Schweißtechnik. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1997.
- HOFMANN, H. G. aj.: Grundlagen der Gestaltung geschweißter Stahlkonstruktionen. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1993.
- REIBER, A.: Schweißgerechtes Konstruieren im Maschinenbau. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1988.

- ADAMKA, J.: Špeciálna technológia II. Navrhovanie a výroba zvarkov. [Skripta]. Slovenská VŠ technická, Bratislava 1991.
- PECHAR, J. aj.: Prvky kovových konstrukcí. SNTL, Praha 1984.
- ČSN EN ISO 13920. Svařování – Základní tolerance pro svařované konstrukce, 1998.
- ČSN 05 0235. Zváranie. Medzné odchylky zvarkov a prídavky na ich obrábanie, 1978.
- ČSN EN 29692. Ruční obloukové svařování, svařování v ochranných plynech a plamenové svařování. Příprava svarových ploch pro svařování ocelí, 1997.
- ČSN EN ISO 9692-2. Svařování. Příprava svarových ploch. Část 2: Svařování oceli pod tavidlem, 2000.
- ČSN 13 1075. Potrubí. Úprava konců součástí potrubí pro svařování, 1991.
- ČSN EN 22553. Svarové a pájené spoje. Označování na výkresech, 1998.
- ČSN EN 1708-1. Svařování. Detaily základních svarových spojů na oceli. Část 1: Tlakové součásti, 2000.
- ČSN P ENV 1993-1-5. Navrhování ocelových konstrukcí. Obecná pravidla. Doplňující pravidla pro rovinné deskostěnové konstrukce, 1998.
- ČSN 73 1500. Ocelové konstrukce. Základní ustanovení pro výpočet, 1986.
- ČSN P ENV 1993-1-1 až ČSN P ENV 1993-1-4. Navrhování ocelových konstrukcí.
- ČSN EN ISO 13919-1. Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním. Směrnice pro určování stupňů jakosti.

6. CHOVÁNÍ SVAŘOVANÝCH KONSTRUKCÍ PŘI RŮZNÝCH ZPŮSOBECH NAMÁHÁNÍ

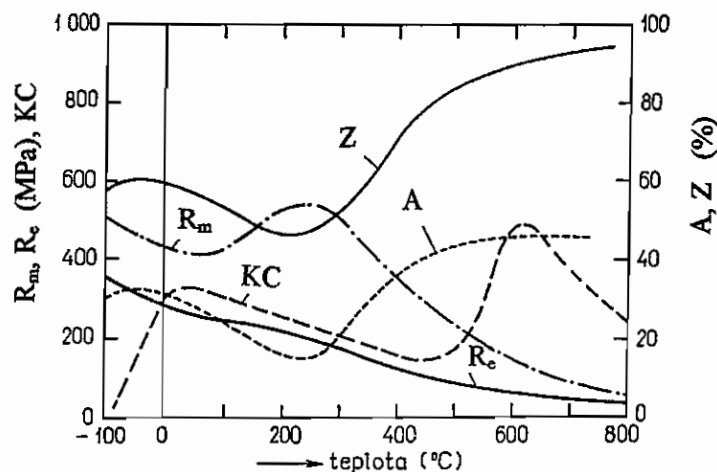
Při výběru materiálu pro svařované konstrukce a při jejich návrhu má zásadní důležitost způsob namáhání a provozní prostředí konstrukce. Většina svařovaných konstrukcí je navrhována pro práci v běžných atmosférických podmínkách. Pevnostní vlastnosti materiálu (zpravidla mez kluzu nebo smluvní mez kluzu) pro tyto podmínky jsou dobře známé a dostupné pro účely návrhu konstrukce. V případě návrhu pro zvýšené teploty nad 500 až 600 °C se řídicí vlastností stane pevnost při tečení. Je to proto, že u ocelí dochází při uvedených teplotách k tečení (creep) a k postupné deformaci ve směru hlavních napětí. Při namáhání svařované konstrukce při zvýšených teplotách může její životnost negativně ovlivnit i oxidace, jindy eroze nebo koroze. Při namáhání při záporných teplotách je důležitá houževnatost materiálu. Obecně platí, že nebezpečí nestabilního lomu narůstá s klesající teplotou a se zvyšováním rychlosti zatěžování. Při namáhání při zvýšených a záporných teplotách budou mít na chování konstrukce při namáhání značný vliv i fyzikální vlastnosti materiálů a to zejména velikost tepelné vodivosti a součinitele délkové teplotní roztažnosti při provozní teplotě. U svařovaných konstrukcí namáhaných dynamicky je rozhodující vlastností únavová pevnost. Chování svarových spojů u dynamicky namáhané konstrukce mohou velmi nepříznivě ovlivnit i jemné mikrotrhliny, neprůvary nebo studené spoje uvnitř svaru a vady geometrie povrchu svaru. Na chování svařované konstrukce se mohou projevit i vnitřní svarová prnutí. Ta dosahují místně mnohdy až meze kluzu, mohou se sčítat s provozním napětím a snížit životnost svařované konstrukce. I v tomto případě bude záležet na tom, zda je svařovaná konstrukce namáhána staticky nebo dynamicky.

6.1 Vliv teploty a rychlosti zatěžování na pevnost a houževnatost

Statická pevnost konstrukčních materiálů se zjišťuje za teploty okolí [1] při působení stálé nebo pomalu spojitě se měnící síly zkušebního (trhacího) stroje. Je to smluvní napětí, které odpovídá největšímu zatížení F_{\max} při statické zkoušce jednoosým tahem, které se dosáhne před porušením zkušební tyče. Statická pevnost je konvenční pevnost, vztažená na původní průřez zkušební tyče S_0 . Mezinárodně se označuje symbolem R_m . Platí pro ni vztah:

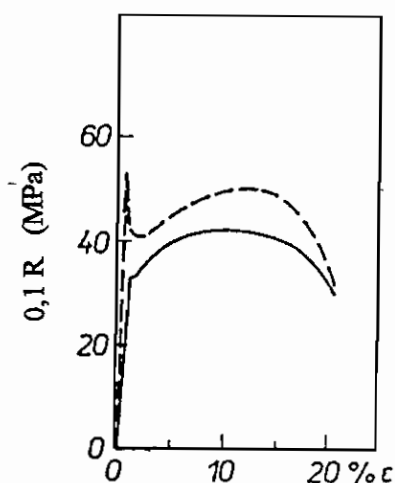
$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (MPa) \quad (6.1)$$

Hodnota R_m je důležitou základní materiálovou charakteristikou pro vzájemné porovnání materiálů. Méně je vhodná pro konstrukční výpočty, kdy se při určování dovoleného napětí v konstrukci uvažuje obvykle s mezí kluzu R_e , resp. $R_p 0,2$. Mez pevnosti R_m je daná chemickým složením materiálu a jeho strukturou. Závisí na teplotě a na rychlosti zatěžování, resp. deformace, viz obr. 6.1 a 6.2.



Obr. 6.1 Závislost mechanických vlastností uhlíkové oceli na teplotě

Z obr. 6.1 je patrné, že pevnostní charakteristiky R_m , R_e se stoupající teplotou klesají a naopak charakteristiky plasticity tažnost A a kontrakce Z stoupají.



Obr. 6.2 Závislost meze pevnosti a meze kluzu uhlíkové oceli na rychlosti zatěžování
Plná čára odpovídá rychlosti normované, čárkovaná čára rychlosti zvýšené

Při velké rychlosti zatěžování stoupá u všech kovů pevnost a výrazně mez kluzu, tažnost a kontrakce se mění jen málo.

Při nízkých teplotách stoupá pevnost a zejména mez kluzu a klesá houževnatost a plasticita. Při zvýšených teplotách dochází naopak k výraznému poklesu meze kluzu; při teplotě nad $400\text{ }^\circ\text{C}$ výrazná mez kluzu u oceli zaniká a dochází k tečení materiálu. Zkouška tahem při jiné teplotě než je teplota okolí se provádí podle norem [2, 3].

Houževnatost je mechanická vlastnost, která je daná kombinací pevnosti a plasticity materiálu. Plasticita je schopnost materiálu deformovat se plasticky před porušením, tzn. že charakterizuje jeho deformační schopnost. Zvyšováním teploty se plastické deformace usnadňují, jejím snižováním se ztěžují. Mírou plasticity je poměrné prodloužení ϵ při zkoušce tahem [1]. Mírou houževnatosti je mechanická práce, spotřebovaná na plastickou deformaci materiálu, např. nárazová práce K (J) při zkoušce rázem v ohybu [4]. Houževnatost materiálu

charakterizuje odolnost svařované konstrukce proti vzniku křehkého lomu nestabilním lomem. Vlivem nízké teploty a zvyšováním rychlosti zatěžování může dojít k nestabilnímu lomu i při zatížení, které je nižší než je zatížení odpovídající mezi kluzu. Zjišťuje se houževnatost vrubová K_C ($J.cm^{-2}$) nebo houževnatost lomová K_{IC} ($MPa.m^{1/2}$).

Přechodová teplota (tranzitní teplota) je teplota, při které nastává přechod od houževnatého ke křehkému porušení materiálu při jeho zatěžování. Není materiálovou konstantou, ale je stejně jako vrubová houževnatost ovlivněná celou řadou faktorů. Při stejné zkušební tyči, stejném místě odběru tyče, stejném tvaru a velikosti vrubu a stejné rychlosti deformace zkušební tyče bude při zkoušce rázem v ohybu přechodová teplota záviset zejména na chemickém složení oceli, jejím tepelném zpracování, mikrostruktuře a výrazně na případné degradaci plastických vlastností oceli vlivem podmínek provozu a provozního prostředí konstrukce. Základní podmínkou zabezpečení provozní spolehlivosti a životnosti svařované konstrukce je, aby teplota provozní byla vždy vyšší než je teplota přechodová. Přechodová teplota přitom není konstantní, při provozu svařované konstrukce se může zvyšovat.

Odolnost proti tečení

Ke zvýšení meze kluzu za vyšších teplot se konstrukční oceli legují molybdenem a chromem a karbidotvornými prvky (vanad, niob, tantal). Přesto mez kluzu materiálu platí pouze do určité teploty, dané zejména jeho chemickým složením a strukturou. Nad touto teplotou se projevuje tečení (creep) materiálu. Tečení je pomalá plastická deformace materiálu působením konstantního napětí (i nižšího než je mez kluzu zatěžovaného materiálu) a stálé teploty (obecná teplotní hranice počátku tečení se u oceli smluvně uvažuje 350 až 400 °C). Při tečení dochází ke změnám ve struktuře a substruktuře materiálu a ke vzniku pórů a mikrotrhlin. Tečení může za určitých podmínek vést k lomu. Rychlost tečení je tím větší a doba do lomu konstrukce je tím kratší, čím je vyšší provozní teplota a čím je větší zatížení konstrukce. Základní vliv na tečení má teplota, která rozhoduje o mechanismu deformace. Pro praxi má důležitost tečení vysokoteplotní. Komplexní mechanické vlastnosti materiálů namáhaných při vysokých teplotách se označují jako **žárupevnost**. Ta představuje odolnost materiálu proti porušení a deformaci při zvýšených teplotách. Kritériem odolnosti materiálu proti porušení při tečení je mez pevnosti při tečení R_{mT} nebo mez tečení R_T (viz kapitola Základy nauky o pružnosti a pevnosti). Vysokoteplotní tečení je ovlivňováno teplotou, napětím, strukturou (velikost zrna, typ základní hmoty), předchozí plastickou deformací za studena, prostředím (např. přednostní napadání hranic zrn přítomností SO_2 nebo V_2O_5).

6.2 Vliv vrubů a vad svarů

Vruby a vady ve svařované konstrukci způsobují místní koncentraci napětí, a tím i koncentraci deformace. To vede k rychlému vyčerpání deformační schopnosti v místě vrubu a ke vzniku únavového lomu. Náhlé změny tvaru, plošné vady typu trhlin, studené spoje, neprůvary, velké svařované tloušťky, dynamické namáhání a nízké provozní teploty přispívají ke vzniku křehkého lomu svařované konstrukce.

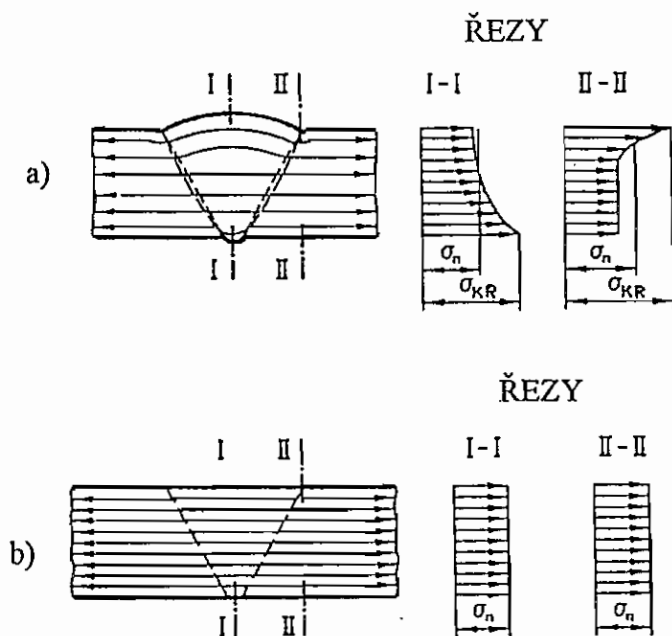
Vruby, vady a náhlé změny průřezů v konstrukci mají za následek odchylku v průběhu silového toku při zatěžování konstrukce. Každá odchylka průběhu silového toku znamená místní zvýšení napětí a současně snížení meze únavy. V místě napětíových špiček se překročí mez únavy nejdříve a dojde zde ke vzniku mikrotrhlin. Ty představují další vruby a zvyšují vrubový účinek a navíc zeslabují průřez. Dalším zatěžováním se mikrotrhliny zvětšují, vznikají trhliny a po čase dojde k rozlomení průřezu.

Návrh a chování svařované konstrukce zatížené staticky

Zatížení se považuje za statické, když počet cyklů za celou dobu životnosti svarového spoje není větší než $5 \cdot 10^3$ cyklů [5]. Staticky zatížené konstrukce se mají navrhovat co možno nejjednodušší. U staticky zatížených svarů je v popředí hospodárnost, proto se např. nepožaduje jejich opracování. Druh svaru se volí především s ohledem na výrobní náklady, avšak při zajištění požadované únosnosti. Při statickém zatěžování i relativně větší vady typu pórů nebo struskových vměšků neznamenají pokles únosnosti, pokud ve větší míře nezmenší nosný průřez svaru. Vliv vrubů není tak nepříznivý jako u konstrukcí zatížených dynamicky. U svarového spoje zatíženého staticky, tj. v oblasti plastických lomů, nemají heterogenita struktury a vnitřní pnutí prakticky vliv na únosnost spoje. Pouze nevýrazně snižují jeho deformační schopnosti. Špičky napětí, způsobené vrubovým účinkem svaru, jsou při statickém zatížení snižovány plastičností materiálu.

Návrh a chování svařované konstrukce zatížené dynamicky

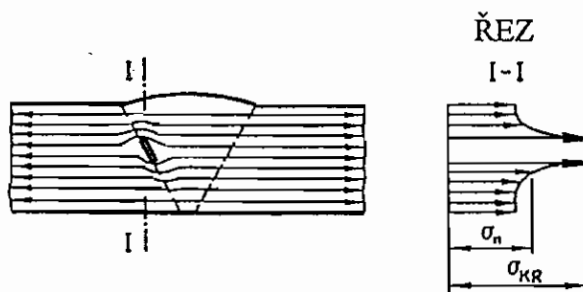
U dynamicky zatížených konstrukcí má rozhodující důležitost mez únavy svarového spoje. Protože ji značně snižují všechny vruby v konstrukci, je hlavní zásadou u dynamicky zatížené svařované konstrukce zabránit vzniku vrubů, resp. snížit na minimum jejich negativní účinek. Je to ovšem za cenu zvyšování výrobních nákladů. Vrub je lokální konstrukční nespojitost, která se může rychle stát výchozím bodem únavového lomu. V místě vrubu dochází ke změně silového toku, k napěťovým špičkám (obr. 6.3) a k víceosé napjatosti. Napěťové špičky jsou tím větší, čím více je vrubem porušen rovnoměrný silový tok v konstrukci.



Obr. 6.3 Průběh silového toku v tupém svaru
a) vliv vrubů v kořeni a v přechodu do základního materiálu;
b) opracovaný svar

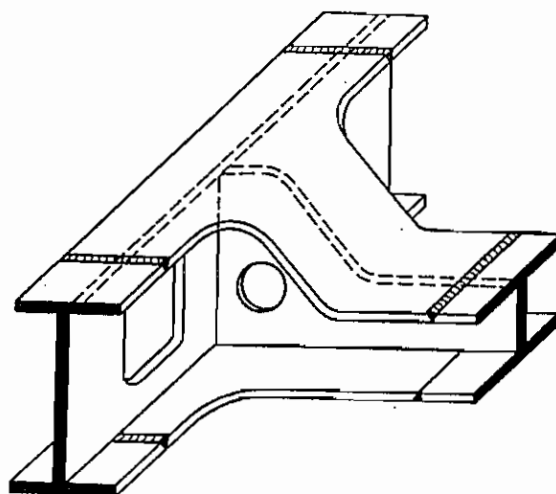
Dokonale provedené a opracované tupé svary snižují únavovou pevnost svarového spoje velmi málo. Snížení meze únavy mohou způsobit nejen vady svarových spojů uvedené v normě [6], ale i pouhým okem nezjistitelné drobné povrchové nerovnosti a necelistvosti. Proto je nutno u dynamicky zatížených konstrukcí provádět opracování povrchů svarů, přebroušování přechodů svarů do základního materiálu a vybrušování koncových kráterů.

U dynamicky namáhané konstrukce jsou zcela nepřijatelné studené spoje (obr. 6.4), vady v kořeni a zejména trhliny ve svarovém spoji. Klasifikace vad je uvedena v [6].



Obr. 6.4 Špičky napětí ve studeném spoji

Změna tuhosti prvků konstrukce musí být pozvolná, protože každé náhlé zmenšení nebo zvětšení velikosti průřezu vyvolá zvýšení víceosé napjatosti.



Obr. 6.5 Správně navržené spojení dynamicky namáhaných nosníků nestejně výšky profilu I

U dynamicky namáhané konstrukce by se tloušťky průřezů měly volit menší. Sníží se tím nebezpečí vzniku prostorové napjatosti a sníží se rychlost odvodu tepla ze svarového spoje. Pro dynamické namáhání je tupý svar funkčně nejlepším spojením. Je nutno používat dokonale provařené svary, např. svary typu V, poloviční V nebo oboustranné poloviční V. Kořen svarů vydrážkovat (kořen může působit jako místní koncentrátor napětí) a podložit svarovou housenkou. V případě svařování na podložku je tuto nutno po svaření odstranit a místo stehu obrousit. U konstrukcí dynamicky zatížených nebo vystavených silným korozním vlivům se neprovařené svary nesmí používat. Svary umísťovat pokud možno tak, aby se svařování provádělo v poloze vodorovná shora, kdy se dosáhne nejlepšího povrchu svarové housenky.

Účinky dynamického zatížení jsou zvětšovány provozními rázy konstrukce. Při dimenzování svarů je působení rázů zohledněno např. dynamickým součinitelem rázu [5] nebo vyšší hodnotou dílčího součinitele bezpečnosti při zatížení [7]. Při návrhu konstrukce zatížené rázy volit nepřerušované svary. Je-li nutno výjimečně použít koutové svary, musí být ovařené kolem celého obvodu a jejich velikost v případě nosného svaru by neměla být menší

než 3 mm. Tloušťka svařovaných průřezů musí být co nejmenší, povrchy svarů opracované nebo obroušené. Svařovaná konstrukce zatížená rázy by neměla být příliš tuhá, měla by umožňovat jistou pružnou deformaci.

6.3 Konstrukční oceli pro různé způsoby namáhání

Při posuzování oceli z hlediska vhodnosti pro dané namáhání svařované konstrukce je nutno vzít v úvahu degradaci vlastností oceli v teplem ovlivněné oblasti svarového spoje. O chování oceli budou rozhodovat zejména metoda a parametry svařování, svařovaná tloušťka a tuhost konstrukce, svařitelnost oceli, druh a velikost namáhání a provozní podmínky.

Statically namáhané pomocné konstrukce se navrhují z ocelí ČSN třídy 10. Jsou to oceli s nízkým obsahem uhlíku, bez zaručené čistoty a chemického složení. Výběrem taveb lze zajistit svařitelnost s ohledem na požadavek malého množství nečistot a nízkého obsahu síry.

Příklad svařitelných ocelí: 10 373 je zaručeně svařitelná, oceli 10 340 a 10 370 jsou dobře svařitelné. U všech tří jmenovaných ocelí platí uvedená svařitelnost do tloušťky 25 mm. Pro větší svařované tloušťky je nutný předehřev 150 až 200 °C.

Dynamicky málo namáhané konstrukce se navrhují z ocelí ČSN třídy 11. Tyto oceli mají zaručený obsah síry a fosforu a zaručený max. obsah uhlíku. Nejměkčí oceli této třídy (do 0,22 % C) jsou dobře svařitelné. Uklidněné jemnozrnné oceli této třídy se používají i při výrobě kotlů a tlakových nádob. Pevnost mají asi do 520 MPa, mez kluzu max. 300 MPa. Jejich svařitelnost je určena chemickým složením, stupněm desoxidace, svařovanou tloušťkou a tepelným zpracováním. Nejvyšší přípustná provozní teplota svarového spoje je 350 až 400 °C (z důvodů strukturní stálosti a creepové pevnosti). Svařitelnost je zejména limitována možností vzniku trhlin za studena v základní struktuře v teplem ovlivněné oblasti svarového spoje. Nebezpečí vzniku trhlin roste se stoupajícím obsahem uhlíku a se stoupající svařovanou tloušťkou (rychlý odvod tepla u tlustých, nepředehřátých plechů o tloušťce více než 15 mm). Se stoupající teplotou předehřevu a klesající svařovanou tloušťkou klesá nebezpečí vzniku trhlin za studena ve svarovém spoji. Neuklidněné oceli mají při obsahu fosforu více než 0,06 % sklon ke vzniku trhlin za studena, při obsahu síry více než 0,06 % k trhlinám za horka. Obsahy dusíku více než 0,01 % mají za následek stárnutí a křehnutí, zejména byl-li svarový spoj prováděn v těsné blízkosti místa tvářeného za studena. Přísada manganu zpevňuje matici, čímž se dá zvýšit mez kluzu nelegované oceli asi na 360 MPa. Tento způsob je např. použit u oceli 11 523.

Příklady nelegovaných svařitelných ocelí:

Uklidněné: 11 342, 11 375 (i polouklidněná), 11 378, 11 402, 11 425, 11 428, 11 455.

Neuklidněné nebo polouklidněné: 11 343, 11 373, 11 423.

Se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi pod nátěrem: 11 379, 11 529.

Oceli 11 373, 11 375, 11 378, 11 458, 11 503, 11 523, 11 583 jsou zaručeně svařitelné. Do 13 až 60 mm (podle chemického složení) se svařují bez předehřevu, po svaření není nutno tepelně zpracovat, pouze velmi složité konstrukce se žíhají ke snížení pnutí.

Oceli nelegované uhlíkové zaručeně svařitelné mají pro svařování nejvhodnější strukturu po normalizačním žíhání (v normě oceli označeno . 1), oceli s vyšším obsahem

uhlíku by se měly svařovat po jejich zušlechtní na dolní mez pevnosti (v normě označeno . 6).

Dynamicky namáhané jeřábové a mostní konstrukce, tlakové nádoby, kolejová a silniční vozidla, dálkovody aj. se navrhují z nízkolegovaných svařitelných ocelí se zvýšenou mezí kluzu. Umožňují významné zmenšení hmotnosti svařované konstrukce a snížení spotřeby oceli. Protože lomová houževnatost i kritická velikost vady obecně klesají s rostoucí mezí kluzu, jsou u těchto ocelí zvýšené požadavky na kvalitu svarů a na jejich kontrolu. Je třeba uvažovat i větší vrubovou citlivost těchto ocelí při únavě. Je zvýšené nebezpečí vzniku trhlin za studena, zejména trhlin indukovaných vodíkem.

Příklady svařitelných ocelí se zvýšenou mezí kluzu:

11 483, 11 484, 11 503, 11 523, 11 531, 13 220, 13 221, 15 222, 15 422, 16 224.

Nízkolegované oceli vyžadují často vhodný přívod tepla před svařováním (tj. předehřev), při svařování (tj. měrný tepelný příkon) a po svaření (tj. dohřev) a tepelné zpracování svařenců. Rozhodující přitom je jejich chemické složení a strukturní stav. Celkový obsah legujících prvků (Cr, Ni, Mo a také Mn, Si, V) obvykle nepřevyšuje 5 %. Obsah uhlíku je zpravidla mezi 0,2 až 0,6 %, obsah síry a fosforu je nízký. Při svařování nízkolegovaných ocelí je nutno vzít v úvahu jejich menší tepelnou vodivost ve srovnání s nelegovanými oceli. Zvýšený sklon nízkolegovaných ocelí ke tvorbě martenzitu v TOO má za následek větší vnitřní pnutí a zvýšené nebezpečí vzniku trhlin. Čím je vyšší obsah uhlíku v oceli, tím je vyšší tvrdost martenzitu v TOO, neboť uhlík zvyšuje její kalitnost. Čím je vyšší obsah manganu, chromu, niklu, molybdenu a vanadu, tím nižší je kritická rychlost ochlazování (viz ARA diagramy). Předehřevem se může rychlost ochlazování snížit, a tím zmenšit nebezpečí vzniku martenzitu v TOO. Teplotu předehřevu před svařováním je možno převzít z materiálového listu oceli, nebo se stanovuje výpočtem pomocí uhlíkového ekvivalentu, nebo se zjistí pomocí ARA diagramu. Tepelná hranice použití nízkolegovaných CrMo, CrMoV, CrMoVW, CrV ocelí z hlediska creepové pevnosti je 580 °C.

Dynamicky namáhané konstrukce se sníženou přechodovou teplotou se navrhují z ocelí mikrolegovaných. Ty mají mimořádné postavení v řadě svařitelných konstrukčních ocelí. Vlastnosti získají podle vyráběné tloušťky buď řízeným válcováním a ochlazováním nebo řízeným doválcováním (označeno u značky oceli . 16). Malými přísadami mikrolegujících prvků (Nb, V, Ti, Al, N, Zr v setinách procenta) a vhodným technologickým postupem u nich lze zvýšit mez kluzu a snížit přechodovou teplotu. Zejména při větších tloušťkách plechů a v tuhých konstrukcích je nutno vzhledem k nebezpečí vzniku vodíkem indukovaných trhlin svařovat s předehřevem. Předehřev rovněž zajistí vytvoření vhodných rozpadových struktur v TOO a sníží hladinu vnitřních pnutí. Někdy se používá dohřev a požaduje se dodržení minimální interpass teploty.

Příklad mikrolegovaných ocelí:

Záruka KCV do teploty 0 °C: 11 523.16, 11 543.16

Záruka KCV do teploty -20 °C: 11 483.1, 11 543.1, 11 533.16, 16 229.16

Záruka KCV do teploty -50 °C: 11 484.1, 11 503.1, 16 229.5, 13 220.1, 15 220.16

Mikrolegovaná je i ocel 15 217, patřící do skupiny ocelí se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi (oceli označené Atmofix s mezí kluzu až 420 MPa), dále otěruvzdorná 13 340 a ocel 15 146 (Abrazit).

Konstrukce pro práci při záporných teplotách

Teploty do $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ se označují jako nízké, teploty pod $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ jako kryogenní. Oceli pro uvedené teploty musí mít dostatečně vysokou mez kluzu a pevnost, současně však vyhovující vrubovou houževnatost a odolnost proti křehkému lomu. Požaduje se u nich dále nízká tepelná vodivost, malý součinitel délkové teplotní roztažnosti a dobrá svařitelnost. Podle teploty použití se oceli pro záporné teploty rozdělují do skupin: nelegované, nízkolegované, vysokolegované niklové a austenitické CrNi.

Nelegované oceli s obsahem uhlíku 0,2 až 0,25 % lze použít do $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, jemnozrnné Al-desoxidovaná ocel až do $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Do $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ lze použít oceli 11 369, 11 449, 11 484, 11 503. Do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ocel 11 458 (jemnozrnná modifikace oceli 11 523).

Nízkolegované svařitelné oceli pro nízké teploty musí mít uhlíkový ekvivalent menší než 0,41 %. Příkladem oceli pro teploty do $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ může být ocel 16 220, 16 222. Ocel 16 320 lze použít do $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vysokolegované niklové oceli se používají pro provozní teploty pod $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, a to podle obsahu niklu. Do teploty $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou to oceli s obsahem 1% Ni, do $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ s obsahem niklu 2,25 až 3,5 %, do $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ s obsahem niklu 5 % nebo 9 %. Pro vodíkové nádrže se používají 12 % niklové oceli, které jsou určeny až do teploty $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Austenitické CrNi oceli se používají do $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jejich vrubová houževnatost je při teplotách do $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ pouze o málo nižší než při teplotě $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Příkladem může být ocel 17 241, 17 242, 17 246, 17 248, 17 341.

Konstrukce žárupevné musí vykazovat pracovní schopnost v oblasti tečení, tj. při teplotě nad 0,4 teploty tavení materiálu. Podle výše pracovní teploty se u nich zaručuje buď mez kluzu za vyšších teplot nebo mez tečení, resp. mez pevnosti při tečení. Při teplotách nad $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ již nastává větší oxidace železa a je nutno kromě žárupevnosti zaručit i žáruvzdornost. Oceli pracující za vysokých teplot (asi nad $800\text{ }^{\circ}\text{C}$) se označují jako žáruvzdorné. Podle typu struktury a hlavních legujících prvků se žárupevné oceli rozdělují na nelegované (použití do 350 až $400\text{ }^{\circ}\text{C}$), nízkolegované (do 500 až $550\text{ }^{\circ}\text{C}$), vysokolegované chromové (do 600 až $650\text{ }^{\circ}\text{C}$), austenitické (do $620\text{ }^{\circ}\text{C}$) a vytvrditelné (do 650 až $700\text{ }^{\circ}\text{C}$). U všech žárupevných ocelí je nutno věnovat pozornost obsahu stopových prvků (Sn, As, Pb, Sb, Bi, P, S, O, N, H), protože segregují na hranicích zrn a snižují jejich pevnost.

Nelegované oceli s obsahem uhlíku 0,15 až 0,20 %, uklidněné hliníkem. Mají R_{mT} ($10^5/450$) až 85 MPa. Zaručeně nebo podmíněně svařitelné jsou např. 11 364, 11 366, 11 368, 11 375, 11 378, 11 416, 11 418, 11 444, 11 474, 11 478 (parní kotle, zvýšená odolnost proti stárnutí), 11 483, 11 531, 12 021, 12 022 (kotlové trubky), 12 025 (mikrolegovaná vanadem nebo niobem).

Nízkolegované oceli pro použití v oblasti meze kluzu jsou např. 13 030, 13 173, 13 221 (tyto tři na kotle a tlakové nádoby), 15 223 (na kotlové plechy o tloušťce větší než 100 mm), 15 235, 15 243, 15 342, 15 422, 16 221, 16 222, 16 342, 16 343, 16 444, 16 540. Oceli pro použití v oblasti meze tečení mají mez pevnosti při tečení při 10^5 h asi 50 až 70 MPa při teplotách jejich použitelnosti. Je to např. ocel 15 020, 15 121, 15 313 ($2\frac{1}{2}$ Cr 1Mo, ve světě nejběžnější), 15 110, 15 112, 15 128 (armatury do 580°C), 15 229

(až 600 °C), 15 236, 15 320 (běhouny parních turbín do 525 °C), 15 335 (Škoda T56, CrVMoW, do 565 °C).

Vysokolegované chromové žárupevné jsou např. oceli: 17 116 (9Cr, 1Mo), 17 126 (11Cr, Mo), 17 134 (11Cr, Nb, V, W), Škoda T60 (11Cr, Co).

Austenitické žárupevné jsou např. oceli: 17 331, 17 341, 17 240, 17 247, 17 248, 17 249, 17 348, 17 350, 17 353.

Konstrukce pro práci v korozivním prostředí se navrhuje z ocelí korozivzdorných. Ty se podle druhu legujících prvků a jejich množství v oceli rozdělují do tří velkých skupin, které se liší z hlediska svařování i z hlediska použití oceli. Jsou to:

Feritické a poloferitické chromové oceli ($C < 0,1 \%$, Cr asi 14 až 30 %).

Perliticko-martenzitické chromové oceli ($C = 0,1$ až $0,4 \%$, Cr asi 13 až 18 %).

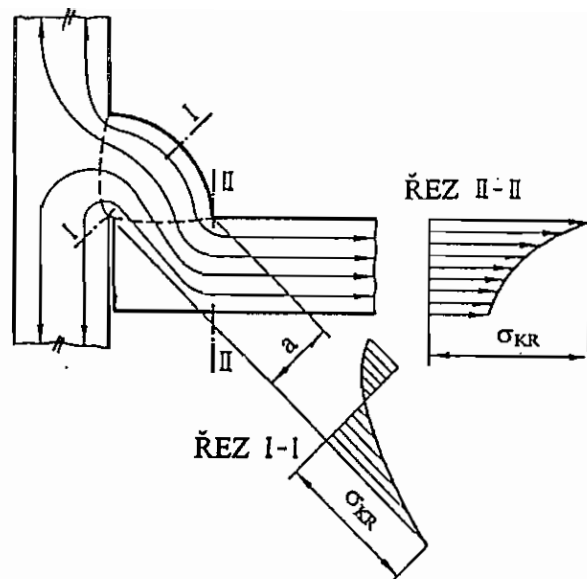
Austenitické, austeniticko-feritické a feriticko-austenitické chromniklové oceli (Cr asi 14 až 30 %, Ni asi 6 až 36 %).

Příklady korozivzdorných ocelí:

- Feritické oceli (čistě feritická struktura): X8Cr13, X8Cr17, X10CrSi13, X10CrAl24.
- Poloferitické oceli (převážně ferit s perlitem a martenzit): X10Cr13, X10CrAl17, 17 041.
- Perliticko-martenzitické oceli (perlitická nebo martenzitická struktura podle obsahu uhlíku a tepelného zpracování): X40Cr13, X15Cr13, X35CrMo17, X90CrMoV18.
- Martenzitické oceli: 17 020, 17 021, 17 022, 17 023, 17 027, 17 029, 17 042.
- Austenitické (stabilní austenit bez feritu δ): X8CrNiNb 16 13, X5CrNi18 9, X12CrNiTi 18 9.
- Austeniticko-feritické (labilní austenit s feritem δ): Jsou buď nestabilizované (17 240, 17 241, 17 249, 17 345, 17 346, 17 349, 17 350) nebo stabilizované (17 246, 17 247, 17 248, 17 252, 17 347, 17348, 17 353, 17 356).
- Feriticko-austenitické (feritická struktura s částicemi austenitu): X20CrNiSi25 4, X5CrNiMo18 10.

6.4 Použití tupých a koutových svarů

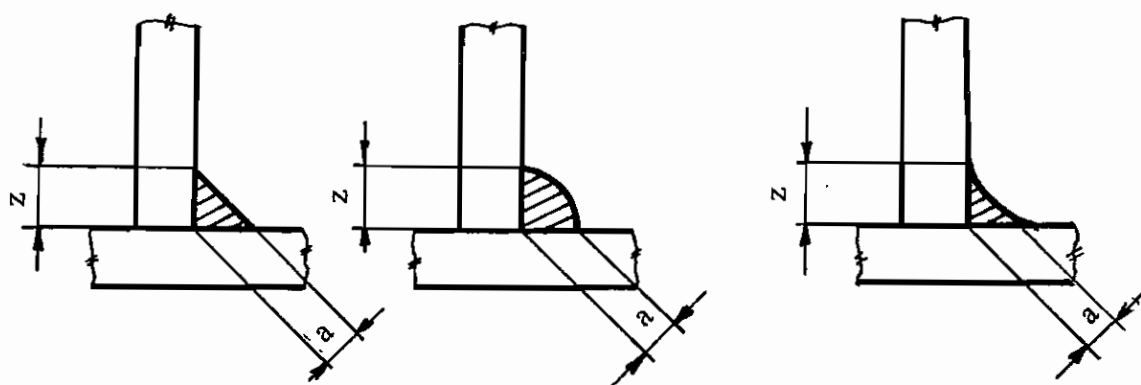
Tupé svary se navrhuje zejména pro přenášení normálových napětí. Za určitých podmínek může tupý svar přenášet stejné zatížení jako základní materiál. Je to tehdy, když je správně dimenzován, má dobře provařený kořen, je bez koncových kráterů a vyhověl kontrole prozářením. Dokonale provedené a opracované tupé svary snižují únavovou pevnost pouze nepatrně. Při zatížení stejnou silou je u tupého svaru průběh silového toku rovnoměrnější a je proto u něho příznivější využití materiálu než u svaru koutového (obr. 6.6). Z tohoto důvodu by se měla dávat přednost svarům tupým.



Obr. 6.6 Průběh silového toku u koutového svaru

Únosnost svarů obecně klesá v případě T spoje v pořadí: oboustranný svar tupý zcela provařený, oboustranný svar tupý s kořenovou mezerou, oboustranný svar koutový, jednostranný svar koutový. Je-li nutno výjimečně křížit tupý svar se svarem koutovým, převažuje se koutový svar přes svar tupý, bez ohledu na zatížení. Tupé svary s částečně provařeným průřezem nejsou vhodné pro namáhání tahem, jsou náchylné ke vzniku trhlin.

Koutové svary se navrhují pro přenášení smykových napětí a to zejména u T spoju. Jsou to tvarově jednoduché jednostranné nebo oboustranné svary, které nevyžadují přípravu svarových ploch. Přednost by se měla dávat svarům oboustranným. Koutové svary jsou hospodárné, ale jejich nevýhodou je, že snižují únavovou pevnost spoje. Možný tvar povrchu koutových svarů je na obr. 6.7.



Obr. 6.7 Tvar povrchu koutových svarů plochý, převýšený, vydutý

Z koutových svarů má díky plynulému přechodu do základního materiálu nejmenší vrubový účinek svar vydutý, největší vrubový účinek má svar převýšený. Je-li nutno koutový svar použít pro dynamické zatížení, musí být proveden jako vydutý. Koutový svar převýšený je navíc nevhodný, měl by se používat pouze u rohových spoju. Použití přerušovaných koutových svarů je odůvodněno nižšími výrobními náklady, menšími deformacemi a menším vnitřním pnutím ve svarovém spoji. Přerušované svary se většinou nepoužívají jako nosné

svary. Příliš malé koutové svary se mohou na velkém průřezu rychle ochladit (trhliny za studena) a kromě toho znamenají místní špičku napětí. Velké koutové svary jsou nehospodárné, objem koutového svaru roste se čtvercem jeho velikosti **a**.

6.5 Použití válcovaných profilů

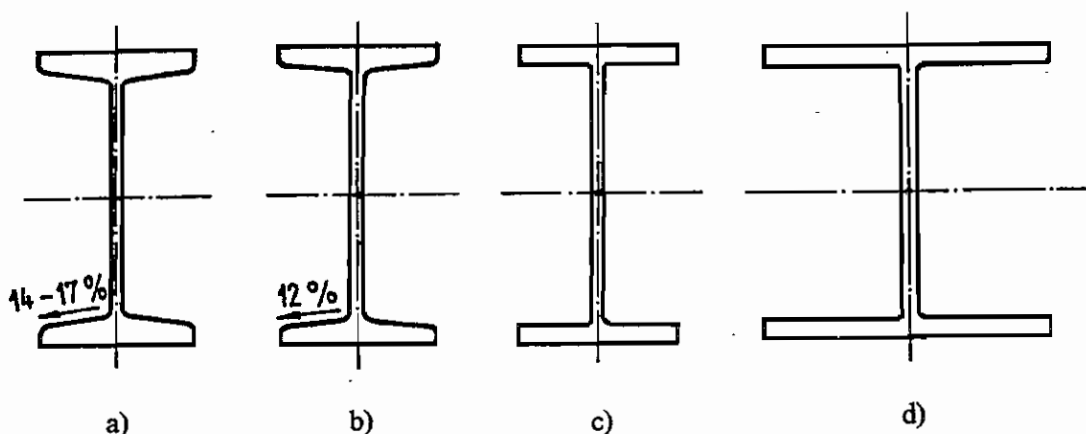
Z válcovaného hutního materiálu se ve svařovaných konstrukcích uplatňují nejčastěji plechy, široká ocel, pásy, trubky a tyče.

Plech jsou dodávány v tabulích nebo ve svitcích. Válcují se v tloušťkách od desetin mm až do 120 mm, v šířkách 500 až 4000 mm a délkách od 1 do 16 m. Blíže viz normy [17 až 21]. Podle zvláštních norem se dodávají plechy pro speciální zařízení jako jsou např. tepelná energetická zařízení, kotle a tlakové nádoby nebo plechy s vyšší mezí kluzu či povrchově upravené nebo plechy z jiných materiálů než ocel.

Široká ocel se používá pro namáhání ve směru jejího válcování. Válcuje se za tepla. Dodávané rozměry jsou: tloušťka 5 až 60 mm, šířka 160 až 900 mm, délka 3 až 14 m. Blíže viz normy [22, 23].

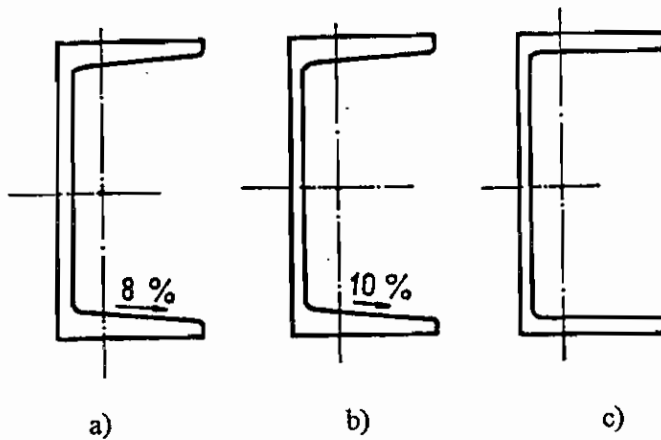
Trubky se používají nejčastěji kruhové válcované v rozsahu rozměrů $\varnothing 22 \times 2,5$ až $\varnothing 377 \times 36$ mm nebo svařované $\varnothing 12 \times 1$ až $152 \times 3,5$ mm. Obvykle jsou z ocelí 11 353 nebo 11 523.

Tyče válcované za tepla jsou buď jednoduchého průřezu a to nejčastěji kruhové, čtvercové, ploché, šestihranné, osmihranné nebo tvarového průřezu L, I, U, H, T. Pro svařované konstrukce mají největší význam úhelníky rovnoramenné od L 20 x 20 x 3 do L 200 x 200 x 20, nerovnoramenné od L 25 x 16 x 3 do L 160 x 100 x 14 a profily tvaru I, U, H. Blíže viz normy [9 až 16] a obr. 6.8 a 6.9. Používají se zejména u příhradových konstrukcí. Použití válcovaných profilů I, U, L ve svařovaných konstrukcích přináší úspory svarů tam, kde je požadovaný tvar dán již vývalkem (např. úspora krčních svarů u menších nosníků tvaru I).



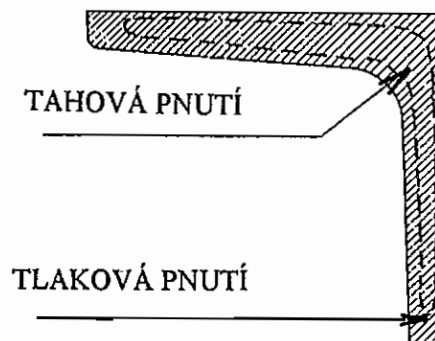
Obr. 6.8 Válcované profily I
a) standardní, b) ekonomický;
c) ekonomický s rovnoběžnými přírubami; d) širokopřírubový

Požadují-li se vysoké, štíhlé nosníky, svařují se profily I ze stojin a pásnic.



Obr. 6.9 Válcované profily U
 a) standardní, b) ekonomický;
 c) ekonomický s rovnoběžnými přírubami

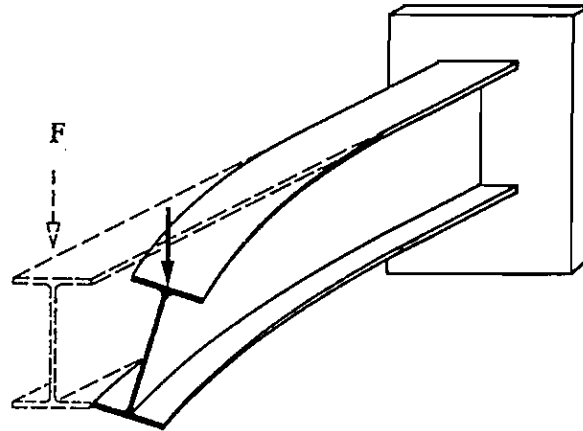
Při svařování velkými svary v místech vysokých vnitřních pnutí u válcovaných profilů (obr. 6.10) se zvyšuje nebezpečí křehkého lomu.



Obr. 6.10 Místa velkých vnitřních pnutí u válcovaného profilů
 Oblast segregace S, P je vyznačena čárkovaně

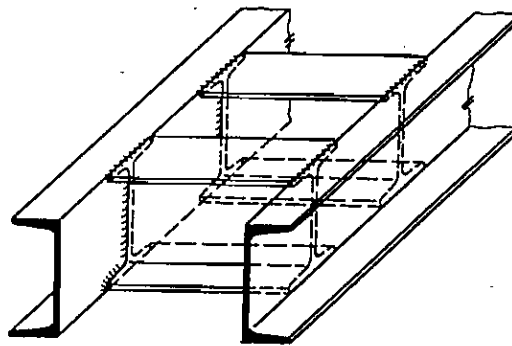
Kromě toho u vývalků z neuklidněné oceli dochází v místech vnitřních rádiusů u profilů L, I, T k výrazné segregaci fosforu a síry. V případě svařování v těchto místech může dojít k natavení fosfidů a sulfidů a vzniklá eutektika mohou zapříčinit vznik trhlin za horka ještě dříve, než dojde k zatížení svařené konstrukce.

U dlouhých úzkých I profilů zatížených ohybem podle obr. 6.11 může dojít k naklopení a zkroucení profilu. Zabránit tomu lze zvětšením kvadratického momentu průřezu zvětšením šířky pásnice, volbou profilu U nebo uzavřeným profilem skříňového typu.



Obr. 6.11 Nebezpečí zkroucení dlouhého úzkého I profilu

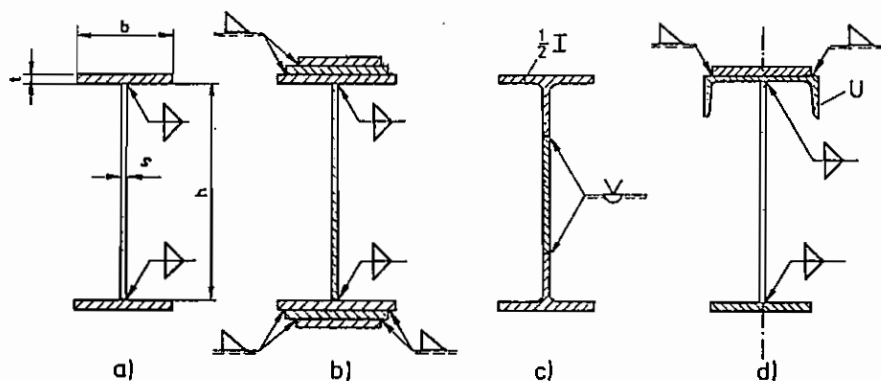
Příklad párového uspořádání otevřených profilů ve svařovaném uzlu namáhaném krutem je na obr. 6.12.



Obr. 6.12 Svařovaný uzel z otevřených profilů

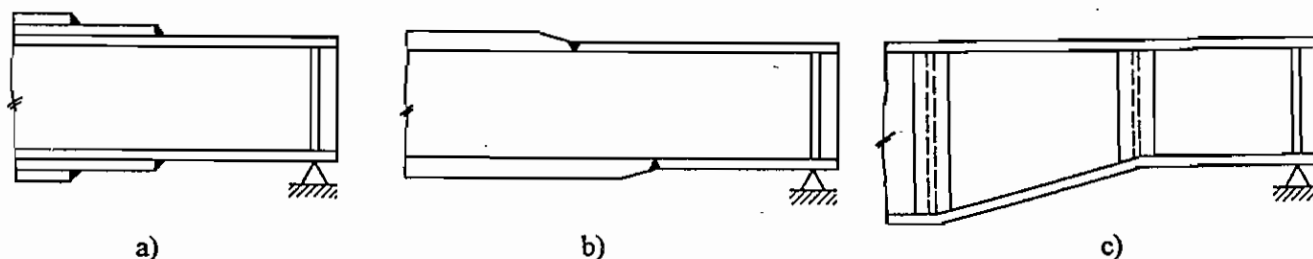
6.6 Svařované nosníky

Nosníky vyšší než 400 mm se s výhodou vyrábějí svařováním, přičemž se jejich průřez může přizpůsobit požadovanému účelu. Základní typ svařovaného nosníku je tvořen stojinou (stěnou), ke které jsou krčnými svary přivařené dvě pásnice (pásy). Výška svařovaného nosníku se volí $1/10$ až $1/15$ vzdálenosti podpěr. Při výšce nosníku kolem 1m bývá tloušťka stojiny 8 až 12 mm. Její úlohou je přenášet smyková napětí od posouvajících sil a vytvořit tvar s vyhovujícím kvadratickým momentem průřezu a průřezovým modulem v ohybu. Ohybový moment přenáší pásnice. Tloušťka pásnice má být max. 50 mm. Větší tloušťka by se nepříznivě projevila velkým odvodem tepla při svařování krčních svarů a možností vzniku trhlin za studena. Při požadavku větší tloušťky než 50 mm se proto pásnice vytvoří svařením několika tenkých lamel. Krční svary pro připojení pásnic ke stojině se navrhují buď jako oboustranné koutové nebo v případě velkého dynamického zatížení jako svary oboustranné poloviční V, přeavařené koutovým svarem. Toto řešení se používá např. u horní pásnice jeřábové dráhy, která je zatěžována pojížděcími koly jeřábu. Příklady možností řešení svařovaných nosníků jsou na obr. 6.13.



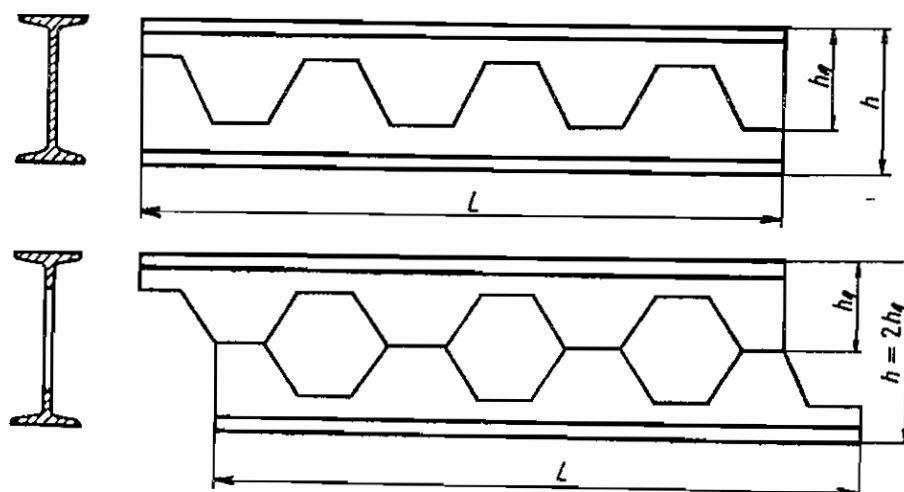
Obr. 6.13 Příklady provedení svařovaných I nosníků
 a) standardní provedení; b) zesílení pásnic;
 c) pásnice z válcovaného profilu; d) horní pásnice z profilu U

V případě potřeby nosníku s proměnlivým průřezovým modulem v ohybu, přizpůsobeném ohybovému momentu, se návrh provádí podle obr. 6.14.



Obr. 6.14 Nosníky přizpůsobené velikosti ohybového momentu
 a) lamelové řešení; b) změna tloušťky pásnic; c) změna výšky nosníku

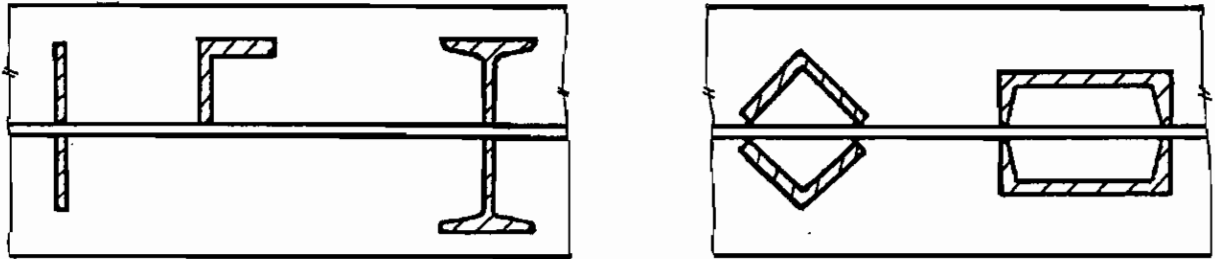
Jiným řešením pro zvětšení kvadratického momentu průřezu lehkého nosníku je použití prolamovaného nosníku podle obr. 6.15. Používá se např. na jeřábové dráhy, jeřáby a obloukové střešní konstrukce.



Obr. 6.15 Prolamovaný nosník

V případě požadavku na přenos kroutícího momentu se větší nosníky navrhují jako uzavřené skříňového typu se dvěma tenkostěnnými stojinami. Stabilita je zabezpečena dvěma rovnoběžnými pásnicemi a několika svislými výztuhami, umístěnými rovnoměrně po délce nosníku.

U svařovaných nosníků s tenkou stojinou se jejich tuhost a stabilita zvětšuje přivařením podélných a příčných výztuh. Možnosti jejich provedení jsou na obr. 6.16 a 6.17. Příčné výztuhy se umísťují do míst velkých posouvajících sil nebo do míst působitě sil. Podélné výztuhy mají význam u nosníků s velkou výškou stojiny v případě velkého ohybového momentu.



a)

b)

Obr. 6.16 Průřezy příčných výztuh
a) otevřené; b) uzavřené

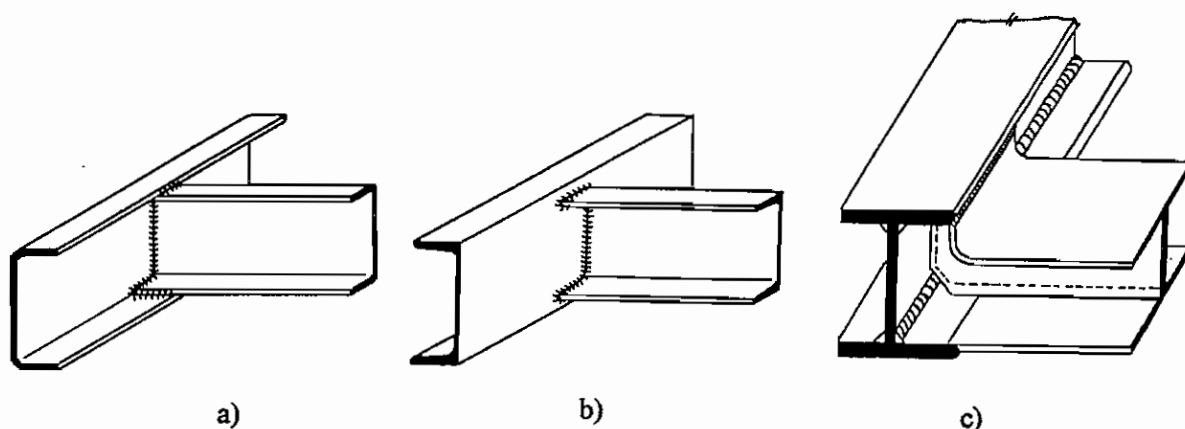


a)

b)

Obr. 6.17 Uspořádání výztuh u nosníku
a) nesprávné křížení svarů;
b) správné řešení, ale pro dynamické namáhání musí být svar proveden po celém obvodu výztuhy.

Příklady spojení podélných a příčných nosníků jsou na obr. 6.18 a 6.19. V místě A u obr. 6.19 je nebezpečí vzniku trhlin z důvodu velkého místního tahového napětí.



Obr. 6.18 Spojení nosníků pro dynamické zatížení
a) nesprávné řešení; b) i c) správné řešení



Obr. 6.19 Spoj U nosníků namáhaný ohybem
a) nesprávné řešení; b) správné řešení

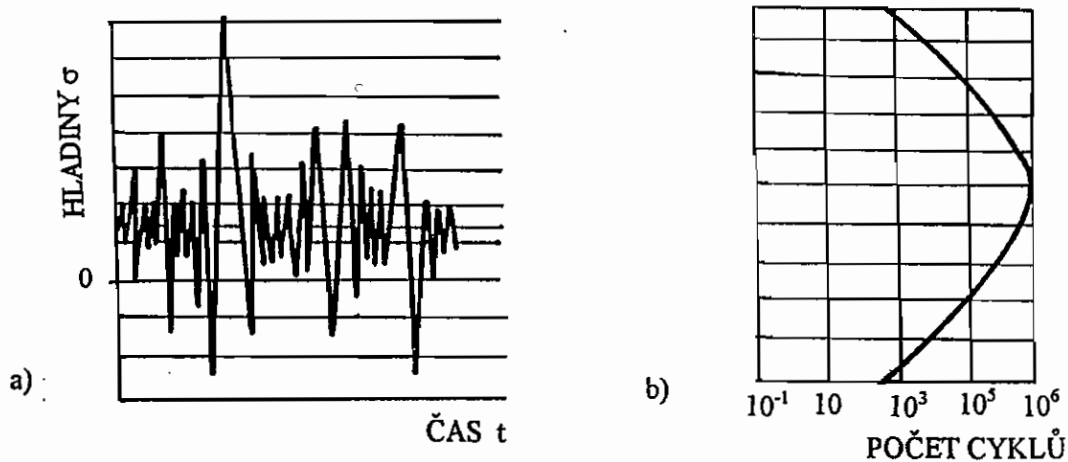
6.7 Dynamicky namáhané konstrukce

Velká část svařovaných konstrukcí je v provozu zatěžována časově proměnlivými silami. Současná praxe proto namáhání konstrukcí hodnotí buď jako převážně statické nebo dynamické. Napěťové špičky ve vrubech konstrukce namáhané dynamicky vedou ke vzniku únavových trhlin v případě, že je překročena **únavová pevnost** materiálu. Únavová pevnost svarových spojů je vždy menší než je statická pevnost základního materiálu. Závisí na vnitřním pnutí ve spoji, změnách ve struktuře tepelně ovlivněné oblasti a na počtu a velikosti koncentrátorů napětí. Těmi mohou být např. vady vnitřní a povrchové, náhlé změny průřezů, malé poloměry ohybu, zkorodovaná místa, drážky, zápichy, příliš velká drsnost povrchu a vruby obecně. Únavovou pevnost lze zvýšit zejména přebroušením povrchu svarového spoje a přechodů svarového kovu do základního materiálu nebo vnesením tlakových vnitřních pnutí (kuličkování, válečkování) do míst, kde lze očekávat vznik únavových trhlin. Vliv provozních, technologických i konstrukčních faktorů se do výpočtu meze únavy skutečné součásti zahrnuje pomocí součinitelů, kterými se upravuje mez únavy zjištěná na hladkých zkušebních tyčích.

Mez únavy svarového spoje není jen závislá na mezi únavy svarového a základního kovu, na jeho teplem ovlivněné oblasti, ale především na tvaru spojení. Únavový lom vychází z místa nejvíce namáhaného, tedy z místa, kde vlivem vady nebo vrubu je silový tok porušen a vzniká soustředěné napětí. Mez únavy tupých svarů s dokonale provařeným kořenem a s bezvadným provedením přechodu ze svaru do základního materiálu, se jen málo liší od meze únavy základního materiálu. Únavový lom vychází zpravidla z vady svaru nebo z přechodu svaru do základního materiálu. Mez únavy spoje velmi citelně snižují vrubové účinky neprovařeného kořene a ostrého přechodu z povrchu svaru do základního materiálu. Spoje s koutovými svary mají nízkou mez únavy a to pro velmi nepříznivé nerovnoměrné rozdělení napětí a pronikavý vrubový účinek svaru a vrubu v kořeni svaru. Rozhodující vliv mají tvar svaru a jakost přechodu do základního materiálu. Opracováním přechodu lze mez únavy podstatně zvýšit, zejména u čelních koutových svarů. U koutových svarů bočních je třeba opracovat konce svarů. Zvětšení průřezu koutového svaru nad hodnotu potřebnou pro statické namáhání prakticky nezvyšuje únosnost spoje na únavu.

Ve svařovaných konstrukcích větších tloušťek nelze vyloučit vady plošného charakteru, které vzhledem k jejich malé délce není technicky možné odstraňovat. V některých případech je i z ekonomických důvodů vhodnější tyto vady v konstrukci ponechat a jejich chování při dynamickém zatěžování hodnotit pomocí lomové mechaniky. Rozhodujícím faktorem, který určuje rozvoj únavových trhlin, je součinitel intenzity napětí. Je parametrem, který popisuje intenzitu napjatosti na čele trhliny, určuje její rozevření a jeho druhá mocnina vyjadřuje hnací sílu potřebnou k šíření trhliny. Šíření únavové trhliny úzce souvisí s rozvojem plastické deformace na jejím čele. Proto jen v případě vysokocyklové únavy, kde rozměr plastické zóny je ve srovnání s délkou trhliny velmi malý, lze rozvoj a podmínky zastavení růstu trhliny popsat součinitelem intenzity napětí.

Statistická analýza zatížení skutečných konstrukcí vychází ze záznamu provozních zatížení a z jejich vyhodnocování pomocí výpočetní techniky. Mnoho svařovaných konstrukcí není zatěžováno opakovaným sinusovým kmitáním, ale jejich namáhání je nepravidelné velikostí i četností výskytu. Příkladem mohou být vozidla, jeřáby nebo stojany výrobních strojů. Kdyby se v těchto případech navrhovaly průřezy konstrukcí podle meze únavy, mylně by se předpokládalo, že se nejvyšší možná hodnota zatížení vyskytuje stále a průřezy by byly silně předdimenzovány. Proto se exponované díly v průběhu provozu zařízení sledují a měří např. pomocí tenzometrů a zjišťuje se velikost, počet a frekvence amplitud kmitů. Výskyt amplitud napětí na jedné hladině dává kumulativní spektrum, viz obr. 6.20.



Obr. 6.20 Spektrum náhodného zatěžování konstrukce
a) změřené hladiny napětí; b) kumulativní spektrum zatěžování

Uvedený průběh dává informaci o tom, kolikrát se vyskytuje amplituda napětí dané velikosti v celkovém souboru namáhání konstrukce. Vyhodnocená spektra napětí se pro praktickou potřebu, v rozdělení spektra 10^6 kmitů do osmi bloků, uvádějí v tabulkové formě, viz např. tab. 6.1.

Tabulka 6.1 Zatěžovací spektrum kmitů

Blok	Relativní napětí	Četnost výskytu
1	1,000	2
2	0,950	16
3	0,850	280
4	0,725	2720
5	0,575	20000
6	0,425	92000
7	0,275	280000
8	0,125	605000

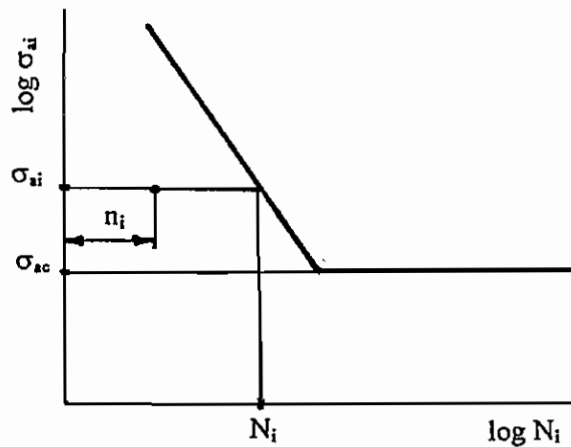
Zpracováním parametrů provozního zatížení statistickými charakteristikami se určuje počet výskytu charakteristických veličin v průběhu zatěžování. Ze známých metod to jsou metoda relativních vrcholů, metoda absolutních vrcholů, metoda přechodů, metoda relativních vrcholů, metoda párových rozkmitů a metoda stékání deště (rain flow podle ASTM). V poslední době je nejčastěji používána metoda stékání deště, která byla vypracována na základě studia deformačních procesů a porušování při kmitavém namáhání.

Pro vyjádření únavových charakteristik se používají Wöhlerovy křivky, které udávají závislost mezi amplitudou napětí jednoduchého kmitavého zatížení a počtem kmitů do lomu. Wöhlerova křivka se přibližuje k mezní hodnotě amplitudy napětí σ_c , tj. k mezi únavy. Amplitudou napětí na mezi únavy se může zatěžovat konstrukce libovolným počtem kmitů bez nebezpečí vzniku únavového lomu.

Určování životnosti náhodně namáhaných strojních dílů se provádí na základě znalosti spekter náhodného zatížení a průběhu Wöhlerovy křivky pomocí některé hypotézy. Tou je např. Palmgren-Minerova, Haibachova, Hobbacherova, Corten-Dolanova, Sedláčková aj. Palmgren-Minerova hypotéza vychází z předpokladu lineárního přírůstku únavového poškození, kdy dílčí poškození D_i ve třídě i na hladině amplitudy napětí σ_{ai} je úměrné poměrnému počtu kmitů n_i/N_i ; n_i je počet kmitů v zatěžovacím spektru kmitů a N_i je počet kmitů odpovídající Wöhlerově křivce, viz. obr. 6.21. Pro únavový lom platí vztah:

$$D = \sum_i D_i \quad (6.1)$$

U materiálů s výraznou mezí únavy σ_c (např. ocele) je podle této hypotézy únavové poškození vyvoláno pouze amplitudami vyššími, než je amplituda na mezi únavy. To však nebylo plně potvrzeno experimenty.



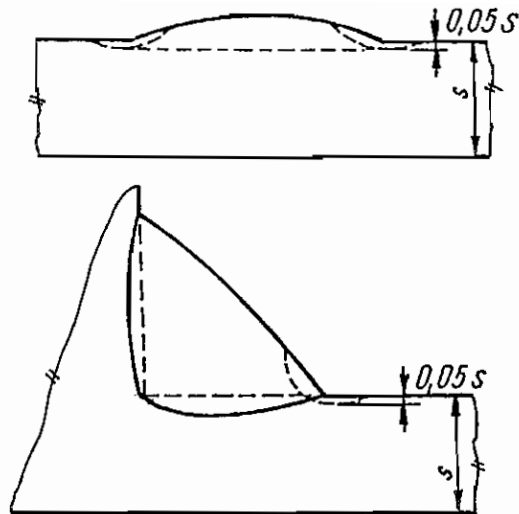
Obr. 6.21 Vyhodnocování životnosti podle hypotézy Palmgren-Minera

6.8 Prostředky ke zvětšení únavové pevnosti

Svarové spoje obecně znamenají slabá místa dynamicky zatěžovaných konstrukcí, neboť jejich únavová pevnost je obvykle nižší než únavová pevnost základního materiálu. Hlavními zdroji nižší únavové pevnosti svarových spojů nejčastěji jsou především náhlé změny nosného průřezu, které způsobují lokální koncentraci napětí, odlišná struktura ve svarovém spoji, vady svarového spoje a vnitřní pnutí způsobená teplotně deformačním cyklem svařování. Nejdůležitější charakteristikou únavové pevnosti je Wöhlerova křivka získaná zkoušením buď vzorků svarového spoje nebo celých svařovaných dílců.

Základním pravidlem při navrhování a výrobě svařovaných konstrukcí pro dynamické namáhání je vyvarovat se nebezpečných vrubových účinků, které snižují únavovou pevnost. Zajištění tohoto požadavku není vždy proveditelné, protože např. nelze očekávat, že obrobením povrchu tupého V nebo X svaru bez jeho podložení se získá bezvrubý svar. Neprovařený kořen v tomto případě zmaří účinek obrobení povrchu. Únavovou pevnost svarových spojů lze obecně zvýšit takovými úpravami, které odstraňují vruby nebo které alespoň snižují vrubové účinky.

Obrobení povrchu svarů, které odstraní vruby v přechodu svarového kovu do základního materiálu, může podstatnou měrou zvýšit mez únavy svarového spoje. I mírné místní zeslabení průřezu podle obr. 6.22 je přijatelnější než ostrý vrub. Jako nástroj se při tom používá např. kotoučová fréza na ohebném hřídeli.



Obr. 6.22 Odstranění vrubového účinku obrobením povrchu

Broušení povrchu svarů musí být prováděno jemně, kontrolovaně. Intenzivní broušení ovlivní mez únavy nepříznivě. Následkem značného ohřevu povrchu svaru a jeho rychlého ochlazení mohou na povrchu svaru vzniknout tahová vnitřní pnutí. Při použití hrubého kotouče vzniknou případně vruby ostřejší, než jaké se měly odstranit.

Kuličkováním nebo **prokováním** povrchu svarů a přechodů do základního materiálu lehkým pneumatickým kladivem se zvýší pevnost povrchu a do míst špiček napětí se vnesou příznivá tlaková pnutí, která mohou dosáhnout až meze kluzu. Při kuličkování musí být velikost kuliček co nejmenší, aby drobné povrchové krátery po úderu kuliček co nejméně zdrsňovaly povrch.

Žihání ke snížení pnutí nevede ve všech případech ke zvýšení meze únavy. Z hlediska zvýšení únavové životnosti se uplatní v případech, kdy je kmitavé napětí převážně tlakové. U svarových spojů, kde žiháním ke snížení pnutí dojde ke snížení pevnosti v teplem ovlivněné oblasti, dojde i ke snížení meze únavy.

Volba druhu svaru musí zajistit co nejplynulejší průběh silového toku ve svarovém spoji. Svary tupé vykazují vyšší únavovou pevnost než svary koutové. Vzhledem k tomu, že každý počátek a konec svaru (koncový kráter) je místem vrubu a špičky napětí, mají přerušované koutové svary při srovnání se svary koutovými průběžnými nižší únavovou pevnost.

Lokálním ohřevem (TIG, plamen) lze při odborném postupování mez únavy zvýšit.

6.9 Mosty, jeřáby, vozidla

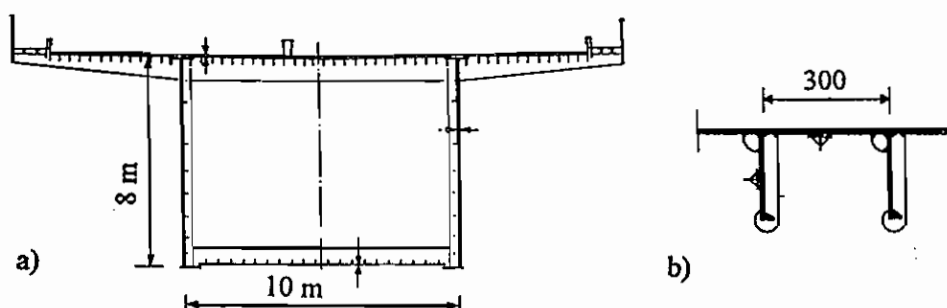
Mosty, jeřáby a vozidla patří ke konstrukcím, které jsou při provozu namáhány převážně dynamicky. Riziko vzniku křehkého lomu svařovaných konstrukcí namáhaných dynamicky a navíc s časově proměnlivými rázy je ovlivňováno zejména rychlostí deformace, stavem napjatosti a provozní teplotou. Pro chování mostů, jeřábů a vozidel má proto význam kromě spektra zatížení především tloušťka stěny, tvar svařované konstrukce a stav vnitřních pnutí v konstrukci. Důležitá u nich je dále jakost svarových spojů, protože se ukazuje, že převážná část křehkých lomů nastává v důsledku vad ve svarových spojkách. Možnou příčinou porušení uvedených konstrukcí je kombinace únavového a křehkého lomu, tj. z předem existující vady (nejčastěji z oblasti svarového spoje) se trhлина začne šířit

únavovým procesem. Po dosažení kritické velikosti se tato trhлина náhle rozšíří přes celý zbývající průřez svařené konstrukce a dojde k lomu.

Při výrobě mostů, jeřábů a vozidel je svařování jednou z rozhodujících výrobních činností. Provozy, které vykonávají svařečské práce na těchto zařízeních musí mít velký průkaz způsobilosti, svařečské práce musí dozorovat svařečský inženýr a svařeči musí mít platné osvědčení o zkoušce svařeče podle normy [40].

Mosty silniční se provádějí převážně jako plnostěnné konstrukce, mosty železniční při malém rozpětí jako plnostěnné, při velkém rozpětí jako konstrukce příhradové. Mosty se navrhují podle norem [31 až 33].

Norma [33] platí pro navrhování a posuzování ocelových konstrukcí mostů pozemních komunikací, železničních, městských drah a lávek pro chodce. Příklad ocelové konstrukce mostu provozní komunikace je na obr. 6.23.



Obr. 6.23 Konstrukce mostu pozemní komunikace
a) profil mostu; b) podélné výztuhy

Tyto konstrukce se posuzují podle mezního stavu únosnosti (např. porušení konstrukce, ztráta stability, únavový lom, křehký lom) a podle mezního stavu použitelnosti (např. překročení mezních průhybů, vznik nepříjemných kmitání lávek pro chodce). Jako materiály se doporučují oceli pevnostní řady 37 a 52, resp. oceli 15 127 a 15 217 do korozního prostředí. Konstrukce musí být navržena a vyrobena s ohledem na minimalizování účinku vrubů a jejich nepříznivého vlivu na únavovou pevnost.

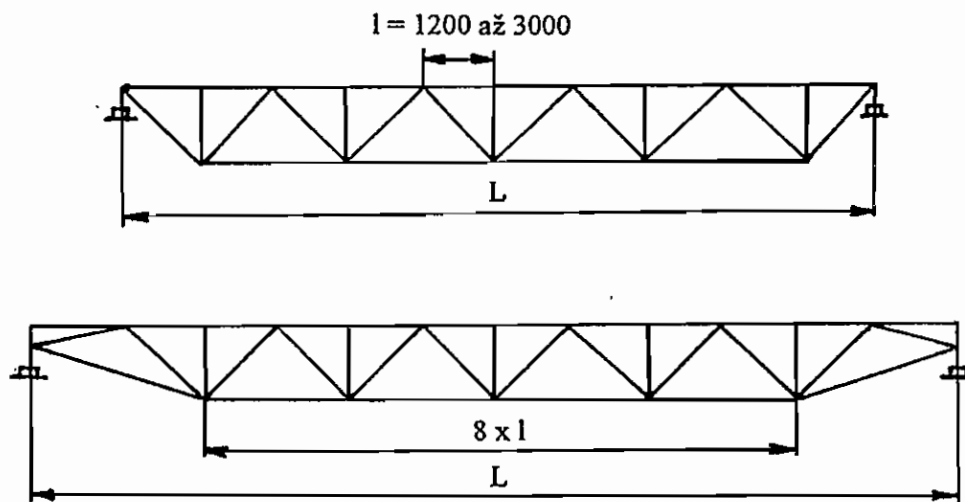
Na obr. 6.24 je snímek prvního zcela svařeného příhradového mostu v ČSR, který byl podle návrhu ing. dr. Faltuse postaven v r. 1931 přes železniční koleje v plzeňské Škodovce. Tehdy to byl největší svařovaný most na světě.



Obr. 6.24 První celosvařovaný most příhradové konstrukce

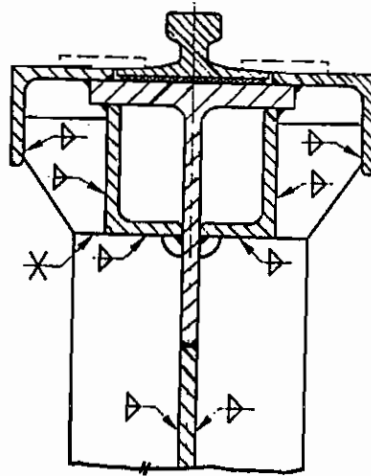
Obecně platí, že kořeny tupých svarů jsou u železničních mostů vydrážkovány a podloženy nebo svařovány na podložku, tj. dokonale provedeny. Přednostně by se mělo svařovat v poloze vodorovné shora. Všechny tupé svary namáhané kolmo na podélnou osu svaru míjivým napětím v tahu nebo střídavým napětím se kontrolují prozářením v celé délce. Zkouška prozáření se v případě pochybností doplňuje zkouškou ultrazvukem. Všechny nosné svary musí proto být dobře přístupné pro trvalou kontrolu.

Jeřáby i jeřábové dráhy a zdvihadla se navrhují podle norem [34 až 39]. Používají se v mnoha průmyslových a jiných odvětvích. Existuje celá řada různých typů jeřábů, které mají společné to, že jejich základem je svařovaná konstrukce nejčastěji příhradového typu, viz např. obr. 6.25.



Obr. 6.25 Osové soustavy příhradových nosníků jeřábových mostů

Při návrhu a výrobě jeřábů je nutno uplatnit všechny zásady předepsané pro svařované konstrukce dynamicky namáhané. Příklad řešení jeřábové dráhy je na obr. 6.26.



Obr. 6.26 Průřez nosníku jeřábové dráhy

Vozidla vyžadují zvláštní přístup při jejich návrhu i výrobě z důvodů jejich sériové výroby a dynamického zatížení proměnlivého s časem. Je nutno vycházet ze znalosti sil, které pocházejí z kolejí nebo vozovky a ze zatěžovacího spektra kmitů. Pro vozidla jsou charakteristické požadavky na co nejmenší hmotnost svařené konstrukce při vysoké pevnosti použitých materiálů, tzn. požadavek malé tloušťky stěn. Je nutno zajistit rovnoměrný průběh silového toku v místě svarového spoje a minimalizovat vrubové účinky, tj. zabránit místní koncentraci napětí.

U vozidel se v široké míře uplatňují kromě ocelí i lehké skříňové profily nejrůznějších tvarů z hliníkových slitin. Jako metoda svařování se velmi často používá svařování odporové. Při návrhu svařované konstrukce je v těchto případech nutno zajistit přístupnost pro elektrody bodové svářečky a dostatečné přeplátování svařovaných plechů. Pro vozidla je charakteristická skořepinová konstrukce, která zajišťuje jejich vysokou tuhost při provozu. Nosný plech skořepinových konstrukcí bývá hlubokotažný o tloušťce 0,7 až 1 mm.

Při návrhu železničních vozidel je nutno dodržet řadu národních a mezinárodních předpisů a dohod, např. vnější obrys vozidla, brzdové zařízení. Nosné součásti jsou zpravidla z ocelí pevnostní třídy 370 a 520 MPa. Pozornost je nutno věnovat rámovému systému. Rámy lokomotivních podvozků jsou rozměrné svařované konstrukce, složitě namáhané značnými dynamickými silami v kombinaci se zatížením statickým. Dynamické síly za provozu podvozků působí ve směru podélném, příčném i svislém. Rám je namáhán kombinací ohybu a krutu. Je tvořen zpravidla dvěma podélníky a příčnickem. Podélníky jsou svařovány z tenkostěnných otevřených profilů, které jsou vyztuženy příčkami. Příčnick je svařován buď z válcovaných U profilů nebo z plechových výlisků a tvoří uzavřený obdélníkový profil. Vlastní frekvence kmitů hlavního rámu (způsobené např. nárazníky) nesmí korespondovat s kmity pojezdového ústrojí.

Silniční vozidla mají obvykle plochý rám podvozku z otevřených nebo uzavřených profilů. Je vytvořen z podélných a příčných nosníků. Podle účelu vozidla je rám buď tuhý na krut (např. v případě vozidel s dlouhou karoserií) nebo měkký na krut (např. vozidla pro těžbu zemin, zemědělské práce). Pro osobní vozidla a autobusy se rám spojuje s karoserií

do jednoho samonosného celku. V zásadě se potom jedná o tenkostěnný skříňový nosník vyztužený soustavou podélných a příčných výztuh, který má dostatečnou pevnost a tuhost i při nejvyšší jízdní rychlosti a podílí se co možno nejméně na celkové hmotnosti vozidla.

Literatura

- ČSN EN 10002-1. Kovové materiály. Zkouška tahem. Část 1: Zkouška tahem za okolní teploty, 1994.
- ČSN EN 10002-5. Kovové materiály. Zkouška tahem. Část 5: Zkouška tahem za zvýšené teploty, 1998.
- ČSN EN 42 0313. Zkoušení kovů. Zkouška tahem za snížených teplot, 1985.
- ČSN EN 10045-1. Kovové materiály. Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho. Část 1: Zkušební metoda, 1998.
- ČSN 05 0120. Výpočet svarových spojů strojních konstrukcí, 1998.
- ČSN EN ISO 6520-1. Svařování a příbuzné procesy. Klasifikace geometrických vad kovových materiálů. Část 1: Tavné svařování, 2000.
- ČSN 731401. Navrhování ocelových konstrukcí, 1984.
- FREMUND, P., PODRÁBSKÝ, T.: Konstrukční oceli. CERM, Brno 1996.
- ČSN 42 5541. Tyče průřezu rovnoramenného L z konstrukčních ocelí válcované za tepla. Rozměry, 1976.
- ČSN 42 5545. Tyče průřezu nerovnoramenného L z konstrukčních ocelí válcované za tepla. Rozměry, 1979.
- ČSN 42 5550. Tyče průřezu I z ocelí tř. 10 a 11 válcované za tepla. Rozměry, 1970.
- ČSN 42 5553. Tyče průřezů IPE z konstrukčních ocelí válcované za tepla. Rozměry, 1989.
- ČSN 42 5570. Tyče průřezu U z ocelí tř. 10 a 11 válcované za tepla. Rozměry, 1970.
- ČSN 42 5571. Tyče průřezu UE z ocelí tř. 10 a 11 válcované za tepla. Rozměrová norma, 1962.
- ČSN 42 5572. Tyče průřezu UPE z konstrukčních ocelí válcované za tepla. Rozměry, 1985.
- ČSN 42 5580. Tyče průřezu T z ocelí tř. 10 a 11 válcované za tepla. Rozměry, 1970.
- ČSN 42 6317. Tenké plechy z konstrukčních ocelí tř. 10 a 11 válcované za studena. Rozměry, 1976.
- ČSN 42 0118. Plechy tenké z ocelí tř. 10 až 16 válcované za tepla. Rozměry, 1974.
- ČSN 42 5310. Plechy tlusté z ocelí tř. 10 až 16 válcované za tepla. Rozměry, 1991.
- ČSN 42 5315. Plechy z ocelí tř. 17 válcované za tepla. Rozměry, 1978.
- ČSN EN 10088-2. Korozivzdorné oceli. Část 2. Technické dodací podmínky pro plechy a pásy, 1998.
- ČSN 42 5524. Široká ocel z ocelí tř. 10 a 11 válcovaná za tepla. Rozměry, 1986.
- ČSN 42 5526. Široká ocel válcovaná za tepla z ocelí tř. 12 až 16 vysoké přesnosti. Rozměry, 1990.
- FALTUS, F. aj.: Příručka svařování I. až III. díl. SNTL, Praha 1960.
- NEUMANN, A.: Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure. Teil I – IV. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1993.
- NEUMANN, A.: Kompendium der Schweißtechnik. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1997.
- HOFMANN, H. G. aj.: Grundlagen der Gestaltung geschweißter Stahlkonstruktionen. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1993.
- REIBER, A.: Schweißgerechtes Konstruieren im Maschinenbau. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1988.
- ADAMKA, J.: Špeciálna technológia II. Navrhovanie a výroba zvarkov. (Skripta.) Slovenská VŠ technická, Bratislava 1991.

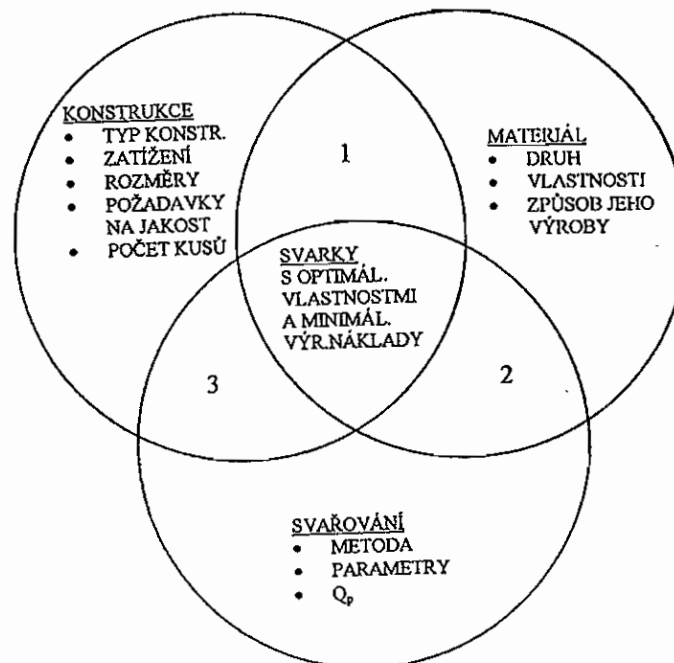
- PECHAR, J. aj.: Prvky kovových konstrukcí. SNTL, Praha 1984.
- ČSN P ENV 1993-2. Navrhování ocelových konstrukcí. Část 2: Ocelové mosty, 1999.
- ČSN P ENV 1090-5. Provádění ocelových konstrukcí. Část 5: Doplnující pravidla pro mosty, 1999.
- ČSN 73 6205. Navrhování ocelových mostů, 1999.
- ČSN 27 0101. Jeřáby. Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů, 1961.
- ČSN 27 0104. Jeřáby. Svařování ocelových konstrukcí, 1981.
- ČSN ISO 8686-1. Jeřáby. Zásady výpočtu zatížení a konstrukčního řešení. Část 1: Všeobecně, 1993.
- ČSN ISO 8686-5. Jeřáby. Zásady konstruování. Mostové a portálové jeřáby, 1994.
- ČSN 27 0140-1. Jeřáby a zdvihadla. Projektování a konstruování, 1987.
- ČSN 27 0140-4. Jeřáby a zdvihadla. Projektování a konstruování. Hlavní konstrukční části, 1987.
- ČSN EN 287-1. Svařování. Zkoušky svářečů. Tavné svařování. Část 1: Oceli, 1995.

7. TECHNOLOGIČNOST SVAŘOVANÝCH KONSTRUKCÍ

Při návrhu svařovaných konstrukcí je potřebné uvažovat i se všemi technologickými vlivy. Konstrukci je nutno navrhovat ve spolupráci s technologem a s materiálovým odborníkem. Jedině tak je možné zabezpečit spolehlivost svařované konstrukce při minimálních materiálových, mzdových a časových nárocích na výrobu. Spolupráce konstruktéra se svářečským technologem nebo svářečským inženýrem je nezbytnou podmínkou při výrobě svařovaných konstrukcí. Cílem provádění technologičnosti výkresů je snížit pracnost svarků a uspořít materiály při respektování požadavků konstruktéra na funkci, bezpečnost provozu a životnost svařované konstrukce. Pro návrh svařované konstrukce je nutné vzít v úvahu následující ukazatele:

- Funkční vlastnosti, které musí svařovaná konstrukce splňovat po celou dobu její životnosti
- Vhodná technologie svařování
- Výrobní náklady spojené se svařováním

Souvislost mezi konstrukcí, materiálem a výrobou svarku je patrná z obr. 7.1. V tomto obrázku vyjadřuje oblast 1 volbu materiálu podle namáhání konstrukce (zatížení, provozní prostředí, teplota), oblast 2 volbu materiálu podle metody svařování (minimální degradace vlastností materiálu), oblast 3 volbu konstrukce podle metody svařování (přístupnost, možnost mechanizace, počet kusů).



Obr. 7.1 Oblasti působení technologičnosti

Technologičnost konstrukce znamená geometrické uspořádání a materiálové zajištění konstrukce, které umožňuje výrobu konstrukce s vynaložením minimálních finančních nákladů. Je souhrnem požadavků, kterým musí konstrukce vyhovět, aby při hospodárné výrobě byla zabezpečena maximální funkční způsobilost konstrukce po celou dobu její předpokládané životnosti. Technologičnost konstrukce zahrnuje vzájemné vztahy mezi návrhem, výrobou a provozem konstrukce. Jejím účelem je vytvořit výrobní podklady,

které umožní vyšší využití vlastností materiálů a zvýší spolehlivost a ekonomičnost svařovaných konstrukcí.

7.1 Svařovací plán

Při návrhu svařované konstrukce je nutno vzít v úvahu následující charakteristiky a zařadit je podle důležitosti konstrukce do výrobních podkladů nebo do samostatného plánu svařování:

- Rozdělení konstrukce do svařovaných dílů a podskupin s ohledem na jejich deformace a vnitřní pnutí při svařování, na přístupnost svarů, na použitelnost mechanizovaných a automatizovaných metod výroby.
- Prostředky k zabránění resp. snížení vzniku deformací a vnitřních pnutí.
- Metoda svařování s ohledem na vybavení svařovacího pracoviště.
- Parametry svařování.
- Druh svaru, tvary a rozměry svarových ploch, počet a velikost svarů.
- Přípravky pro svařování.
- Přídavné materiály s ohledem na zvolený základní materiál, jejich typy a rozměry.
- Poloha svařování.
- Sled kladení svarových housenek.
- Tepelné zpracování základního materiálu před svařováním a tepelné zpracování svarku.
- Způsob mechanického opracování svarů a svarku.
- Způsob značení svarů značkou svářeče.
- Vizuelní a defektoskopická kontrola svarů.
- Požadavky na jakost při svařování (vyšší, standardní, základní) a na stupeň jakosti svarových spojů (B, C, D).

Technologická příprava výroby začíná převzetím konstrukčních podkladů. První úlohou při vypracování postupu svařování je studium zadání, výkresové dokumentace, podmínek zkoušení a přejímky. Nejasnosti v zadání se musí ihned odstranit. Vyžadované změny je třeba konzultovat s konstruktérem. Je nutno vzít v úvahu výrobní program, technologické vybavení, výrobní zkušenosti. Různé kombinace technologických principů vedou k různým výrobním možnostem. Musí se zohlednit i otázky bezpečnosti práce, hygieny a požární ochrany. Následuje porovnání technologických variant a určení optimální varianty. Stanoví se rámcový technologický postup. Podle pořadí operací se určí podmínky svařování, svařovací zařízení a přípravky, zařízení na ohřev a manipulaci a pracoviště. Zpracuje se detailní postup svařování, seznam zařízení a přípravků. Určí se výrobní časy a normy spotřeby materiálu. Stanovení a schvalování postupů svařování je uvedeno v normě [1].

7.2 Zásady technologičnosti

Zásady technologičnosti svařovaných konstrukcí lze z hlediska výroby, technologie svařování a z ekonomického hlediska shrnout takto:

- Konstrukci navrhnout tak, aby mělo co nejméně svarů.
- Při návrhu konstrukce respektovat metalurgické zvláštnosti technologie svařování a vliv procesu svařování na vlastnosti materiálu konstrukce.
- Využívat normalizaci dílů a používat stavebnicové konstrukce. Volit technologicky nenáročnou přípravu dílů ke svařování včetně úpravy svarových ploch.

- Snižovat hmotnost konstrukce optimální volbou základního materiálu s odpovídající svařitelností.
- Využívat nové technologické postupy a moderní metody svařování s vysokou koncentrací energie a tím s minimálním tepelným ovlivněním základního materiálu.
- Správnou volbou tvaru konstrukce, základních i přídavných materiálů a technologie svařování snižovat vnitřní pnutí a deformace. Volit správný druh a rozměr svaru a jejich optimální umístění.
- Umožnit potřebný přístup svařovacího hořáku nebo elektrody do místa svaru.
- Svařování elektrickým obloukem podle možnosti nahrazovat svařováním odporovým.
- Zabezpečit optimální polohu svařovaných dílců, případně i pomocí přípravků.
- Zvažovat způsob úpravy svarových úkosů s ohledem na pracnost.
- Vyhybat se svařování tenkých a tlustých stěn z důvodu nebezpečí propálení.
- Svarové spoje umísťovat co nejdále od obráběných ploch.
- Svary provést před tepelným zpracováním nebo před povrchovou úpravou.
- Při svařování uzavřených nádob zajistit, aby byl v nádobě odvětrávací otvor.
- Konstrukci a technologii svařence volit tak, aby bylo možno co nejvíce využít mechanizace a automatizace svařování. To vede ke zvýšení produktivity výroby.
- Návrh tvaru konstrukce a umístění svarových spojů musí splňovat nejen požadavky na pevnost a houževnatost, ale i požadavky na operativnost svařování, jako je např. přístupnost pro svařování a pro kontrolu svarů a pro jejich případnou opravu.
- Dobře zvážit nutnost předehřevu před svařováním a nutnost tepelného zpracování svařence. Jedná se o časově náročné a ekonomicky nákladné operace. Jsou ale účelné u svařovaných konstrukcí z ocelí o vyšší pevnosti a při dynamickém namáhání konstrukce.
- Volbu svařované konstrukce a její technologii volit s ohledem na výrobní a kontrolní možnosti závodu. Výrobní tolerance a přídavky na opracování volit pouze technicky zdůvodnitelné.
- Při zajišťování všech technických požadavků, kladených na svařovanou konstrukci je nutno mít na mysli také kategorie: cena, pracnost a materiálové náklady.

7.3 Volba základního a přídavného materiálu

O volbě **základního materiálu** rozhoduje zejména funkce svařované konstrukce, druh, velikost a rychlost zatěžování, pracovní teplota a prostředí, technologie výroby konstrukce, ekonomická hlediska a dodávaný sortiment. Výběr ocelí je možné provést např. pomocí norem [2 až 4]. Pomůckou při orientaci pro základní potřebu může být [5, 20]. Při volbě ocelí se podle potřeby uvažují charakteristiky mechanických a fyzikálních vlastností, způsob výroby a odlévání oceli, její tepelné zpracování, odolnost proti únavovému a křehkému porušení, svařitelnost, odolnost proti korozi aj.

Konstrukce běžných parametrů se obvykle navrhují z oceli řady S235. Pro konstrukci s větším zatížením může být účelnější pevnější ocel řady S255. Pro konstrukce mimořádných parametrů lze použít oceli vysoké pevnosti. Oceli různé pevnosti lze v konstrukci kombinovat se zřetelem na velikost a druh namáhání, např. pásnice plnostěnného nosníku navrhnout z pevnější oceli než stojinu. Při statickém namáhání konstrukce stoupá únosnost svarového spoje úměrně se stoupající mezi kluzu oceli.

Při výběru oceli uvnitř zvolené pevnostní řady je důležitým kritériem odolnost oceli proti křehkému porušení. Např. oceli 10370, 11373, 11375 a 11378 mají prakticky stejnou

pevnost, mez kluzu i tažnost, ale liší se vrubovou houževnatostí a svařitelností, viz tabulky 7.1 a 7.2.

Tabulka 7.1 Vrubová houževnatost svařitelných ocelí řady 37 podle ČSN

Ocel	Teplota, při které se zaručuje vrubová houževnatost (°C)		
	Plechý do 25 mm	Plechý nad 25 mm	Tvarové tyče
11373	+ 20°	bez záruky	bez záruky
11375	± 0°	± 0°	+ 20°
11378	± 0°(- 20°)	± 0°	- 20°

Tabulka 7.2 Svařitelnost plechů z ocelí řady 37 podle ČSN

Ocel	Obsah (%)		Tloušťka (mm)		
	C	Mn	3 až 16	17 až 25	nad 25
11373	max. 0,22	0,8	zaručená	podmíněně zaručená	dobrá
11375	max. 0,20	1,8	zaručená	zaručená	podmíněně zaručená
11378	max. 0,16	2,2	zaručená	zaručená	zaručená

Čím nepříznivější jsou provozní podmínky, čím větší je tloušťka materiálu a tuhost konstrukce, čím horší mohou být následky selhání konstrukce, tím jakostnější se volí ocel z hlediska její vrubové houževnatosti a plastických vlastností.

Konstrukční oceli řady S235 a S355 jsou poměrně houževnaté. Ve srovnání s nimi jsou vysokopevnostní jemnozrnné oceli řady S690 a S960 méně houževnaté a jsou více náchylné na únavový lom následkem vrubů v konstrukci. Při vyšším dynamickém zatížení se projeví skutečnost, že vyšší pevnost oceli, např. S355, neposkytuje vzhledem k její vyšší vrubové citlivosti prakticky žádná vyšší dovolená napětí než ocel s nižší pevností, např. S235. U neopracovaných tupých svarů a zejména u koutových svarů prakticky není rozdíl v hodnotách meze únavy u oceli s vyšší pevností (R_m 520 MPa) a nelegované (R_m 380 MPa). U dynamicky namáhaných konstrukcí proto nelze vysoké pevnosti ocelí řádně využít. Vysoká pevnost se však může plně využít u konstrukcí a dílů namáhaných tahem, méně při namáhání ohybem. Oceli o vysoké pevnosti mají ve srovnání s ocelmi řady S235 vysokou mez kluzu a pevnosti, ale jiné důležité charakteristiky, např. modul pružnosti E , jsou u všech konstrukčních ocelí podobné. Vyšší pevnost oceli umožňuje snížit hmotnost svařované konstrukce, ale zvyšuje náklady na její výrobu. U pevnější oceli se totiž obecně kladou zvýšené požadavky na kvalitu svarů a na jejich kontrolu. Příčinou je skutečnost, že lomová houževnatost materiálu a kritická velikost vady klesají s rostoucí pevností a mezí kluzu materiálu. Přednosti ocelí o zvýšené pevnosti se plně a hospodárně využijí v případech, kdy působí na svařovanou konstrukci velká klidná zatížení.

Volba **přídavného materiálu** se provádí zejména podle druhu materiálu základního, druhu a velikosti zatížení, tuhosti konstrukce, svařované tloušťky a podle technologie svařování. Je nutné, aby se vlastnosti svarového spoje co nejvíce blížily vlastnostem základního materiálu. Pevnost svarového spoje nesmí být nižší než je minimální pevnost základního materiálu. Nemí být přípustná výrazně vyšší pevnost a mez kluzu svarového kovu

oproti základnímu materiálu. TOO má mít stejné plastické vlastnosti jako základní materiál. Je nutno zabránit vysokému zvýšení tvrdosti v TOO svarového spoje. Při svařování běžných konstrukčních ocelí nemá tvrdost překročit hodnotu 350 HV, u jemnozrnných ocelí vyšší pevnosti jsou přípustné hodnoty tvrdosti vyšší. Příliš rozdílné vlastnosti základního materiálu a svarového kovu mají nepříznivý vliv na únosnost svařované konstrukce. Vyšší pevnost svarového kovu by měla za následek snížení jeho deformační schopnosti a tím jeho menší odolnost proti únavovému i křehkému porušení. Orientačně lze přídavný materiál volit pomocí vztahů [19]:

$$R_e \text{ svarového kovu} = (1,1 \text{ až } 1,3) R_e \text{ základního materiálu} \quad (7.1)$$

$$R_m \text{ svarového kovu} = (0,9 \text{ až } 1,2) R_m \text{ základního materiálu} \quad (7.2)$$

Při svařování uhlíkových a nízkolegovaných ocelí o různé pevnosti se přídavný materiál volí podle oceli s nižší pevností, ale předehřev a další podmínky svařování podle oceli s vyšší pevností. Důvodem je dosažení ukazatele celistvosti a ukazatele mechanických vlastností svarového spoje (zabránění vzniku trhlin za studena v teplem ovlivněné oblasti a dostatečná tažnost a vrubová houževnatost svarového kovu).

Při svařování ocelí rozdílných strukturních bází (např. ocel feriticko-perlitická a ocel austenitická) je přídavný materiál v případě pracovní teploty nad 400 °C nutno volit s ohledem na požadavek co nejbližšího součinitele délkové teplotní roztažnosti k oběma svařovaným ocelím a na zajištění strukturní stálosti, tj. zabránění difúze uhlíku do austenitického materiálu. V těchto případech se používá přídavný materiál s vysokým obsahem niklu.

Klasifikace přídavných materiálů je normována [6 až 18]. V současné době je k dispozici dostatečné množství kvalitních firemních podkladů pro výběr přídavných materiálů.

Literatura

- ČSN EN 288-1 až 8. Stanovení a schvalování postupů svařování kovových materiálů. Část 1 až 9, 1995 až 2000.
- ČSN CR 12187. Svařování. Směrnice pro rozdělení materiálů do skupin pro účely svařování, 1999.
- ČSN EN 10020. Definice a rozdělení ocelí, 1994.
- ČSN 42 0002. Číselné označování a rozdělení ocelí ke tváření, 1978.
- KOVAŘÍK, R.: Oceli a jejich svařování. ŠKODA WELDING, s. r. o. Plzeň, 2000.
- ČSN EN 499. Svařovací materiály. Obalené elektrody pro ruční obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí. Klasifikace, 1997.
- ČSN EN 757. Svařovací materiály. Obalené elektrody pro ruční obloukové svařování vysokopevnostních ocelí. Klasifikace 1998.
- ČSN EN 1599. Svařovací materiály. Obalené elektrody pro ruční obloukové svařování žárovevných ocelí. Klasifikace, 1999.
- ČSN EN 1600. Svařovací materiály. Obalené elektrody pro ruční obloukové svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí. Klasifikace, 1999.

- ČSN EN 440. Svařovací materiály. Dráty a svarové kovy pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí tavící se elektrodou v ochranném plynu. Klasifikace, 1997.
- ČSN EN 1668. Svařovací materiály. Tyče a dráty pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí wolframovou elektrodou v inertním plynu a jejich svarové kovy. Klasifikace, 1999.
- ČSN EN 12070. Svařovací materiály. Drátové elektrody, dráty a tyčinky pro obloukové svařování žárovevých ocelí. Klasifikace, 2000.
- ČSN EN 12072. Svařovací materiály. Drátové elektrody, dráty a tyčinky pro obloukové svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí. Klasifikace, 2000.
- ČSN EN 12534. Svařovací materiály. Drátové elektrody, dráty a tyčinky pro obloukové svařování vysokopevnostních ocelí tavící se elektrodou v ochranném plynu a jejich svarové kovy. Klasifikace, 2000.
- ČSN EN 758. Svařovací materiály. Plněné elektrody pro obloukové svařování s přívodem nebo bez přívodu ochranného plynu nelegovaných a jemnozrnných ocelí. Klasifikace, 1999.
- ČSN EN 12071. Svařovací materiály. Plněné elektrody pro obloukové svařování žárovevých ocelí v ochranném plynu. Klasifikace, 2000.
- ČSN EN 12070. Svařovací materiály. Plněné elektrody pro obloukové svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí s přívodem nebo bez přívodu ochranného plynu. Klasifikace, 2000.
- ČSN EN 10204. Kovové výrobky. Druhy dokumentů kontroly, 1994.
- DIN 18 800. Teil 1. Stahlbauten, 1990.
- BALEJ, Z.: Materiály pro výrobu svařovaných ocelových konstrukcí v evropských normách. In Sborník přednášek „Technické požadavky na ocelové konstrukce“. TDS Brno, Luhačovice, březen 2001.

8. NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z HLINÍKU A JEHO SLITIN

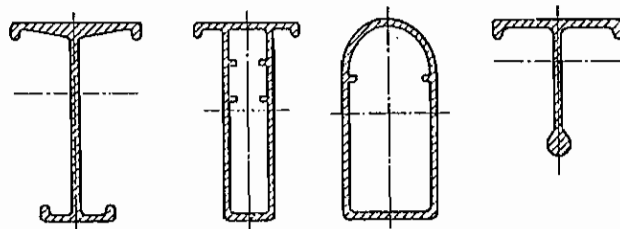
Hliníkové slitiny nalézají stále větší uplatnění nejen u předmětů denní potřeby, ale i v mnoha inženýrských oblastech. Protože je cena hliníkových slitin několikanásobně vyšší než cena běžných konstrukčních ocelí, je použití Al-slitin účelné pouze v případech, kdy lze dobře využít jejich specifických vlastností, jako jsou např. malá hustota, dobrá slévateľnost a tvařitelnost, dobrá korozní odolnost, nemagnetičnost, velmi dobrá elektrická a tepelná vodivost, příznivý poměr pevnosti k hustotě a tím mimořádná vhodnost pro lehké stavební a dopravní konstrukce [1, 2].

Mnohé Al-slitiny mají dobrou svařitelnost. Při jejich svařování ale musíme vzít v úvahu zejména:

- Velkou afinitu hliníku ke kyslíku (na povrchu hliníku se neustále vytváří tenká vrstva oxidu Al_2O_3 , který se taví až při teplotě 2042 °C)
- Třikrát větší součinitel délkové teplotní roztažnosti hliníku než feriticko perlitické oceli (velké deformace a vnitřní pnutí ve svarovém spoji, možnost vzniku trhlin)
- Třikrát menší modul pružnosti v tahu než má feriticko perlitická ocel
- Velkou rozpustnost plynů v hliníku (pórovitost svarů).
- Al-slitiny nemají fázové přeměny v tuhém stavu.
- Při tavení přechází hliník velmi rychle do tekutého stavu.

8.1 Zásady návrhu

U svařovaných konstrukcí z hliníkových slitin lze při výpočtu, návrhu a výrobě aplikovat mnohé zásady, platné pro ocelové konstrukce, avšak vždy s přihlédnutím k podstatným rozdílům v mechanických a fyzikálních vlastnostech obou uvedených materiálů. Na rozdíl od oceli nemá hliník výraznou mez kluzu a jeho houževnatost závisí jen málo na teplotě. Při návrhu je dále nutno zohlednit nízkou hodnotu modulu pružnosti v tahu hliníku, pokles pevnosti v teplem ovlivněné oblasti u zpevněných nebo vytvrzených Al-slitin až z 540 MPa na hodnotu pod 275 MPa a vyšší cenu Al-polotovarů. S výhodou lze ale použít tvarově velmi rozmanité Al-profilů, které umožňují příznivé řešení pevnostních problémů. Vyrábí se až do rozměrů cca 500 mm [1] protlačováním nebo hranováním. Příklad protlačovaných prvků z Al-slitin je na obr. 8.1.



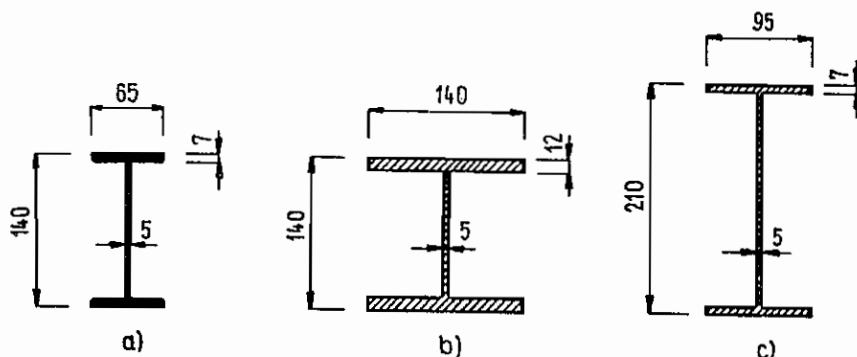
Obr. 8.1 Příklady protlačovaných Al-profilů

Modul pružnosti Al-slitin je mezi 65 000 až 75 000 MPa. Tento nízký modul pružnosti se projeví v tuhosti nosníku, jeho průhybu, prodloužení a stabilitě. Znamená např., že se tahem namáhaná tyč z Al-slitiny prodlouží při stejném zatížení třikrát více než ocelová tyč stejného průřezu. Rovněž průhyb nosníku z Al-slitiny je třikrát větší. Vhodným konstrukčním tvarem, např. zvětšením výšky, tj. zvětšením kvadratického momentu průřezu nosníku, je možno uvedeným pružným deformacím zabránit. Při stejném statickém systému platí [3, 4] vztah:

$$E_{Al} \cdot J_{Al} = E_{Oc} \cdot J_{Oc} \quad (8.1)$$

- E_{Al} modul pružnosti v tahu Al-slitiny
- E_{Oc} modul pružnosti v tahu oceli
- J_{Al} kvadratický moment průřezu Al-slitiny
- J_{Oc} kvadratický moment průřezu oceli

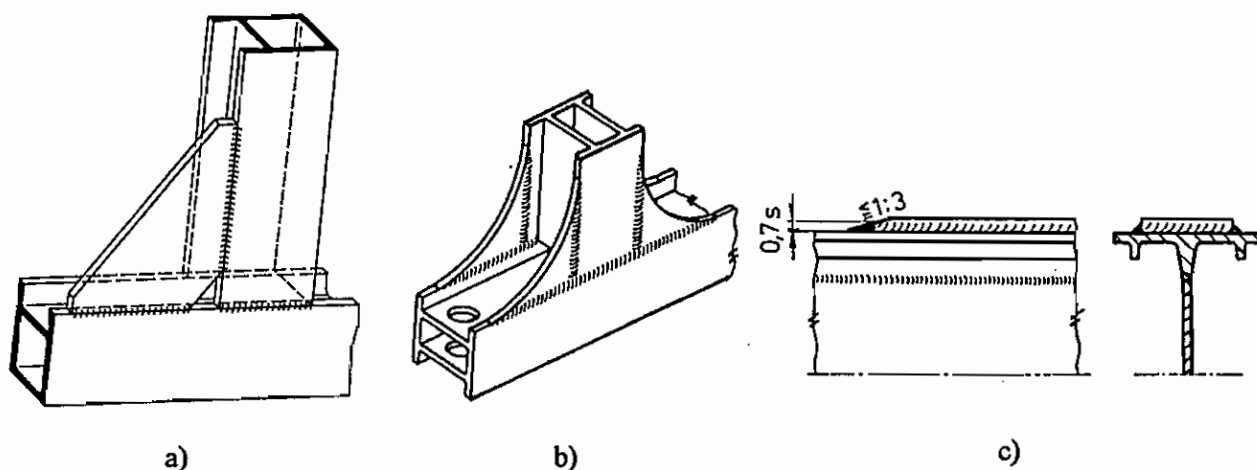
Využití vztahu (8.1) je patrné z obr. 8.2. Tři zobrazené nosníky mají stejný průhyb, avšak při stejné výšce je nosník z Al-slitiny (b) o 18 % lehčí. Vyšší nosník z Al-slitiny (c) je o 50 % lehčí než nosník ocelový (a) [4]. Nosníky z Al-slitin se navrhují přednostně jako vetknuté nebo příhradové, protože mají menší průhyb než nosníky prosté nebo plnostěnné. Tlačené pruty z Al-slitin se navrhují s velkým kvadratickým momentem průřezu a s pokud možno malou vzpěrnou délkou, protože štíhlý prut z Al-slitiny má přibližně třikrát menší únosnost ve vzpěru než stejný prut z oceli.



Obr. 8.2 Porovnání průřezů nosníků o stejném průhybu
a) nosník ocelový; b), c) nosníky z Al-slitiny

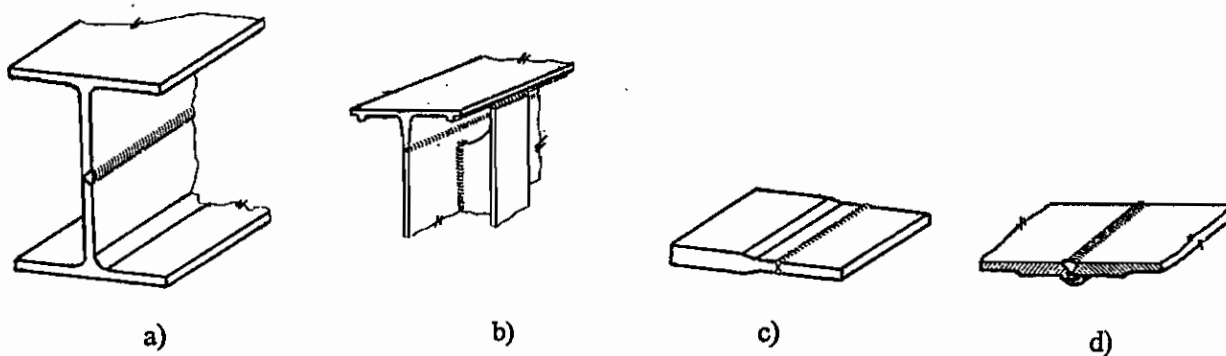
Návrh svařované konstrukce je nutno provádět tak, aby se hospodárně využily přednosti protlačovaných profilů a hraněných plechů. Používat pokud možno svary, které je možno provádět mechanizovanou nebo automatizovanou metodou svařování v poloze vodorovné shora. Omezit montážní svary, neboť znamenají možnost vzniku méně jakostních svarů. Z pevnostních důvodů se doporučuje navrhovat přednostně tupé svary [1]. Příčné tupé svary umísťovat do míst malého namáhání. Zásadně by se neměly používat spoje přeplátované. Z kořenové strany je nutno při přípravě hran pro tupé svary provést malé zkosení hran (~ 0,5 až 1 mm) pod úhlem 45°, aby se zabránilo vzniku vrubu v kořeni. Koutové svary používat pouze u podélných svarů namáhaných smykovým napětím od ohybu. Čelní koutové svary jako nosné svary nepoužívat. Při návrhu konstrukce pro dynamické namáhání je nutno zohlednit velkou citlivost Al-slitin na vruby a minimalizovat možnosti jejich vzniku. V návrhu dodržovat co možno nejrovnoměrnější průběh silového toku

v průřezu konstrukce, provádět postupné přechody tuhosti a zaoblení, odstraňovat vnější i vnitřní vruby (viz obr. 8.3). Hromadění svarů při dynamickém zatížení není dovoleno, pokud možno nepoužívat svary v poloze svislé a nad hlavou. Není dovoleno svařovat na plochách, které byly zpevněny tvářením za studena [1, 2].



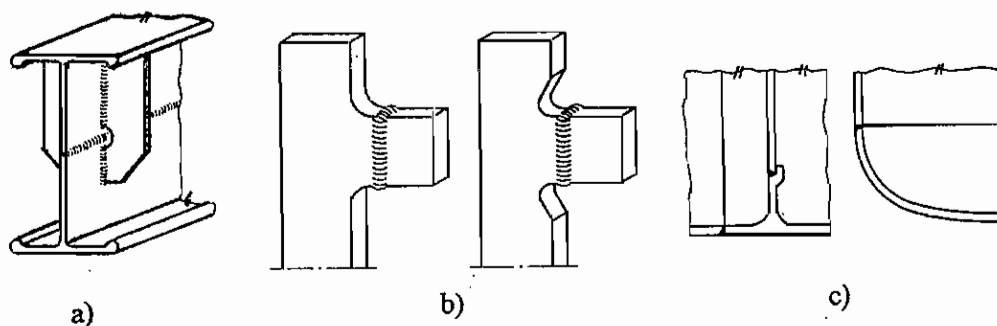
Obr. 8.3 Příklady návrhu řešení svařovaných uzlů
 a) spoj staticky namáhaný; b) spoj dynamicky namáhaný;
 c) zesílení pásnice

Při dimenzování je nutno u svarového spoje vzít v úvahu, že následkem vneseného tepla ztrácí Al-slitina v TOO část své pevnosti. Při výpočtu uvažovat, že změkčení zasahuje do 30 mm na každou stranu od osy svaru [1]. Leží-li podíl změkčení pod 20 %, zohlední se při výpočtu snížení pevnosti uvažováním menší účinné plochy svaru nebo menšího kvadratického momentu průřezu či menšího modulu odporu průřezu [1, 2]. Příklady návrhu svařované konstrukce z Al-slitin jsou podle [1, 2, 4] uvedeny na obr. 8.4. Svarové spoje umísťovat do míst malého napětí, tj. např. u nosníku do jeho neutrální osy (a), zabránit skokům v tuhosti (b), svary neumísťovat do míst se změnou rovnoměrného silového toku (c), provádět zesílení v místě svaru (d).



Obr. 8.4 Příklady zásad správného návrhu
 a), b) nosníky; c), d) spoje pro dynamické zatížení

Příklady návrhu výztuh (a), spojovacích plechů (b) a připojení dna nádrže (c) jsou na obr. 8.5.



Obr. 8.5 Příklady konstrukčních uzlů
 a) vyztužení nosníku; b) spoj plechů dynamicky zatěžovaných,
 c) svary nádrže

Zvláštní důležitost při navrhování konstrukcí z hliníkových slitin má správná volba základního materiálu. Z nabízeného sortimentu slitin je nutno vybrat optimální slitinu z hlediska pevnosti, korozivzdornosti a svařitelnosti.

8.2 Hliníkové slitiny pro svařované konstrukce

Legující prvky výrazně ovlivňují mechanické a korozivní vlastnosti hliníkových slitin a tím jejich použití jako konstrukčního materiálu pro nosné svařované konstrukce.

- **Čistý hliník.** Obsahuje 99,85 % Al (ČSN 42 4002) až 99,5 % Al (ČSN 42 4005). Má v tvrdém stavu pouze malou pevnost (min. 100 až 130 MPa). Pro svařované konstrukce se nepoužívá.
- **Slitiny tepelně nezpracovávané.** Založeny na systému hliník-hořčík (magnalia). Někdy se přidává mangan. Relativně vysoké pevnosti se dosahuje tvářením za studena. Podle českých norem jsou to slitiny AlMg2 (ČSN 42 4412), AlMg3 (ČSN 42 4413), AlMg5 (ČSN 42 4415) a AlMn (ČSN 42 4432). Největší pevnost v tahu v této skupině má slitina AlMg5 (min. 350 MPa v tvrdém stavu). Tyto slitiny se u svařovaných konstrukcí používají nejčastěji a to pro jejich relativně vysokou pevnost, svařitelnost a dobrou korozní odolnost. Příklad použití: železniční a kolejová vozidla, tlakové nádoby, sila, lodní konstrukce, nábytek, hornictví, chemický průmysl.
- **Slitiny vhodné pro vytvrzení.** Tvrdost získávají precipitačním vytvrzením, ke kterému dochází při vytvrzování, což je zvláštní tepelné zpracování. Vytvrzování zahrnuje tři pracovní pochody: rozpouštěcí žíhání, rychlé ochlazení a stárnutí. Rozpouštěcí žíhání je ohřev slitiny na teplotu, při níž se legující prvky zcela rozpustí v hliníku, takže slitina se stává homogenním tuhým roztokem. Teplota ohřevu (podle druhu slitiny 450 až 500 °C) po dobu 1 – 2 hodin musí být velmi přesně dodržena. Přehřátím by zrna zhrubla, při nízké teplotě by slitina neměla požadovanou tvrdost a pevnost. Nasycený tuhý roztok se prudce ochladí. Legující prvky se při tom nemohou vyloučit tak, jak by to odpovídalo rovnovážnému diagramu, ale vznikne přesycený tuhý roztok. Tento roztok není stabilní. V průběhu času, během tzv. stárnutí, se z něho vylučují velmi jemné precipitáty, které podstatně zvyšují pevnost slitiny. Stárnutí slitiny může probíhat po dobu více desítek dní buď při pokojové teplotě nebo po dobu několika hodin za teploty vyšší (150 až 180 °C). Podle toho rozeznáváme vytvrzování za studena, často označované jako

„přirozené“ stárnutí, a vytvrzování za tepla, nazývané též „umělé“ stárnutí. Obojí lze i kombinovat.

Pevnost většiny Al-slutin zpevněných tváření za studena nebo vytvrzováním se v oblasti svaru při teplotách nad 200 °C postupně zmenšuje a v oblasti, kde teplota dosáhla 350 až 400 °C dojde k úplnému změkčení. Tento nepříznivý jev lze řešit např. volbou materiálu, svařováním tlakem za studena nebo odporovým bodovým svařováním, zvětšením tloušťky v místě svaru nebo přemístěním svarů do míst s nižším napětím.

V praxi se používají tři skupiny vytvrzovaných slitin:

- Velmi pevné slitiny pro letectví a zbrojní průmysl typu **Al-Cu-Mg** duraly (např. AlCu4Mg1 podle ČSN 42 4203), **Al-Cu-Mg-Si** a **Al-Zn-Mg-Cu** dosahují pevnosti v tahu až 500 MPa. Nejsou však příliš vhodné pro svařované konstrukce. Výjimkou jsou svary provedené odporovým svařováním bodovým nebo švovým, kde dochází v TOO pouze k malé ztrátě pevnosti a korozní odolnosti.
- Vhodné slitiny pro svařování jsou typu **Al-Zn-Mg** (např. AlZn4Mg1 podle ČSN 42 4441). Dosahují pevnosti do 360 MPa ve vytvrzeném stavu. Pevnost se v TOO po svaření sníží až na 50 % [5], ale samovytvrzením dojde ke zvýšení pevnosti asi o 65 % už během prvních deseti dnů po svaření, po 60 dnech se může dosáhnou max. 85 až 90 % původní pevnosti po vytvrzení. Ze slitin Al-Zn-Mg se svařují např. rámy oken, prvky kolejových a silničních vozidel, jeřáby, mosty.
- Slitiny typu **Al-Mg-Si** (aviály) dosahují min. pevnosti v tahu 280 MPa (např. AlMgSi podle ČSN 42 4400). Používají se např. pro vysoce namáhané díly vozidel, lodí, letadel a pro nádrže. Vlivem tepla při svařování dochází i u těchto slitin v TOO k měknutí a ke snížení pevnosti, ale na rozdíl od slitin legovaných mědí jsou i ve stavu po svaření odolné proti korozi.

8.3 Metody svařování

Podle části 4 normy [6] Zkoušky postupů obloukového svařování hliníku a jeho slitin, se hliník a jeho slitiny z hlediska technologie svařování rozdělují do následujících skupin:

Skupina 21: Čistý hliník, Čistý hliník s obsahem $\leq 1,5$ % nečistot nebo legujících prvků. ČSN 42 4002 až 05.

Skupina 22a: Tepelně nezpracovatelné slitiny. Slitiny Al-Mg s obsahem $\leq 3,5$ % Mg. ČSN 42 4412 a 13.

Skupina 22b: Tepelně nezpracovatelné slitiny. Slitiny Al-Mg se 4-5,6 % Mg. ČSN 42 4415.

Skupina 23: Tepelně zpracovatelné slitiny. Slitiny Al-Mg-Si a tepelně zpracovatelné slitiny Al-Zn-Mg, které vyžadují řízený tepelný příkon a tepelné zpracování nebo stárnutí po svařování. ČSN 42 4400 a 01.

Ve srovnání se svařováním ocelí je metalurgie svařování hliníku a jeho slitin relativně jednoduchá, protože u nich s výjimkou precipitačního vytvrzování nedochází k fázovým změnám při teplotách pod teplotou solidu. V praxi je proto hlavním požadavkem při výběru přídavného materiálu dosáhnout u svarového kovu odpovídající pevnosti v tahu a zabránit vzniku trhlin za horka při tuhnutí svarového kovu. Běžně se používají tři typy přídavných materiálů: čistý Al, Al+5 % Si, Al+5 % Mg (někdy ještě navíc Mn nebo Cr ke zvýšení pevnosti, nebo Ti či Zr ke zjemnění zrna). Obecným pravidlem je, že ve stavu po svaření má být pevnost v tahu svarového kovu stejná jako základního vyžíhaného materiálu [5].

Bezprostředně před svařováním je nutno svarové plochy pečlivě očistit a odmastit acetonem nebo ethylalkoholem, nářadí používat pouze pro hliník. U Al-slitin není nutno přesně řídit měrné svařovací teplo, z hlediska metalurgického nejsou požadovány předehřev a dohřev. Z důvodů stabilního hoření oblouku se přesto předehřev používá. Předehřívá se zejména při svařování větších tloušťek a při svařování odlitků.

Používané metody svařování:

- **Plamenové svařování** je nevýhodné. Tepelně nejvíce ovlivňuje základní materiál. Používá se výjimečně pro svařování tenkých plechů ze slitin Al-Mg, Al-Mn, pro tupé svary přístupné z obou stran. Používaná tavidla jsou na bázi chloridů a fluoridů, jsou silně hydrofobická a leptající. Musí se dobře opláchnout a neutralizovat kyselinou, vedou ke vzniku pórů. Používá se měkký kyslíko-acetylenový plamen s malým přebytkem acetyleny. Oblast změknutí je široká.
- **Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou.** Je rovněž nevýhodné, používá se zřídka a to v opravárenství. Obaly obsahují chloridy, fluoridy a kryolit. Struska se musí pečlivě odstranit. Svařuje se stejnosměrným proudem obrácenou polaritou. Dochází k velkému rozstříku (ztráta kovu až 12 %). Používá se předehřev 100 až 200 °C pro lepší stabilizaci oblouku. Elektroda pro Al-slitiny je typu AlSi5, AlSi12 nebo AlMn1. Průměry 2,5 až 5,0 mm, např. elektrody E-S 64x.
- **Svařování v ochranných plynech** je nejvýhodnější, není zapotřebí tavidel. Je to dnes téměř výhradně používaná metoda tavného svařování Al-slitin. Nepoužívá se MAG. WIG se používá pro tloušťky 1 až cca 10 mm. Ochranný plyn je nejčastěji argon, výjimečně helium nebo směs Ar + He (30 % až 70 %). Předehřev při svařování větších tloušťek (od 8 mm) je u vytvrditelných slitin v rozsahu 150 až cca 300 °C, pro stabilizaci oblouku cca 150 °C. Svařovací proud je většinou střídavý, stejnosměrný pro svařování tenkých plechů. Při nepřímé polaritě dochází k příznivému rozrušování oxidické vrstvy na svařovaném povrchu, ale wolframová elektroda se příliš zahřívá. Přídavný materiál je ve formě tyčinek nebo drátu, průměry 2 až 5 mm. Např. dráty OK TIGROD 18.xx. MIG se používá pro dlouhé, dobře přístupné svary pro tloušťky větší než cca 3 mm. Svařovací proud je stejnosměrný nebo pulzní, nepřímá polarita. Ochranný plyn argon, pro větší tloušťky směs 50 % Ar a 50 % He. Předehřev pro větší tloušťky plechů je 150 až cca 300 °C. Přídavný materiál je drát odvíjený z cívky, používané průměry od 0,8 mm (pro tloušťky plechů 2 až 5 mm) do 6 mm (pro tloušťky plechů nad 30 mm). Např. dráty OK AUTROD 18.xx. Svařovací práce ulehčuje svařování na podložku.
- **Svařování odporové** se provádí většinou jako bodové nebo švové a to u malých tloušťek plechů (do 3,5 mm). Je nutno svařovat tvrdým režimem, tj. velkou intenzitou proudu a krátkým svařovacím časem. Dochází k relativně malému tepelnému ovlivnění v místě spoje. V některých případech se provádí odporové svařování stykové (např. spoje trubek, profilů okenních rámců) nebo tlakové s indukčním ohřevem.
- Dalšími použitelnými metodami svařování Al-slitin jsou **svařování plazmou, laserem, třením, elektronovým paprskem, difúzní, ultrazvukové a tlakem za studena.** Použití těchto metod je prozatím omezeno na úzký okruh výrobků.

8.4 Pájení

Tato metoda se pro spojování Al-slitin používá výjimečně. Problém je v přítomnosti oxidické vrstvy na povrchu hliníku, která zhoršuje smáčivost použité pájky. Prozatím nejsou vhodná tavidla pro pájení Al-slitin. Lze používat pájky na bázi zinku a kadmia nebo typu AlSi 12. Používá se např. reakční pájení pomocí speciálního tavidla na bázi chloridu

zinečnatého, které reaguje s hliníkem za vzniku tekuté vrstvy zinku. Tato vrstva potom umožní běžné pájení.

8.5 Vady svarů a jejich vliv na únosnost konstrukce

Při svařování hliníku a jeho slitin jsou v praxi zjišťovány vady:

- Solidifikační trhliny ve svarovém kovu (interkrystalické).
- Likvační trhliny v TOO (interkrystalické).
- Trhliny za studena v TOO u vysokolegovaných slitin typu Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg (transkrystalické).
- Tvorba pórů a bublin ve svarovém kovu.
- Vměšky ve svarovém kovu.
- Snížení pevnosti v TOO u slitin zpevněných za studena nebo vytvrzováním.

Kromě těchto metalurgických vad, které mohou různou měrou ovlivnit únosnost konstrukce, se při svařování Al-slitin mohou v závislosti na metodě svařování vyskytnout i vady technologického rázu. Z nich vady typu vruby, zápaly, studené spoje, krátery a neprovařený kořen mohou při dynamickém namáhání výrazně ovlivnit únosnost svařené konstrukce. Mohou být příčinou vzniku únavového lomu. Z důvodů vysoké náchylnosti hliníku na vruby není např. ani dovoleno používat při značení rýsovací jehly [1]. Z hlediska křehkého lomu je obecně příznivá relativně vysoká lomová houževnatost Al-slitin. Pro vznik křehkého lomu potřebný víceosý stav napjatosti vzniká přednostně v tlustostěnných částech a v místech vrubů. Vzhledem k tomu, že se z Al-slitin svařují tenkostěnné konstrukce, lze u nich při běžných teplotách a pečlivé výrobě stěží očekávat vznik křehkého lomu. Póry by se projevíly na snížení únosnosti staticky namáhaného spoje až v případě, že by výrazněji snížily nosný průřez svaru. Při statickém provozu konstrukce se mohou trhliny zvětšovat mechanismem koroze pod napětím.

Metody svařování mají své typické vady: Při svařování WIG je to nečistý povrch svaru, wolframové vměšky ve svarovém kovu, neprovařený kořen, studený spoj, vruby. Při svařování MIG velký rozstřík, studené spoje, zápaly, vruby. Při svařování odporovým nízká pevnost spoje, malá svarová čočka, stříkání roztaveného kovu, svarová čočka roztavená až k povrchu plechů, otláčení povrchu plechu od elektrod.

Možnosti snižování metalurgických vad

Pórovitosti nelze zabránit, lze ji snížit použitím drátů s minimálním obsahem vodíku, dobrým skladováním (vhodnější než obaly z PVC jsou obaly z PE nebo PTFE), nahrazením sprchového přenosu přenosem pulzním (nebo při metodě MIG kapkovým), mírným předehřevem nebo mírným přehřátím svarové lázně, vyšším tepelným příkonem (usnadní se unikání vodíku ze svarové lázně).

Vznik solidifikačních a likvačních trhlin je možno řešit použitím přídavných materiálů legovaných křemíkem. Nebezpečí vzniku trhlin zvětšuje olovo. Nejvíce náchylné k trhlinám jsou vytvrditelné Al-slitiny legované mědí nebo zinkem. Svařování pulzním proudem, předehřev, vysoká čistota ochranných plynů, zvýšení rychlosti svařování, stehování v krátkých vzdálenostech a umožnění deformace jsou dalšími prostředky snižování nebezpečí vzniku trhlin.

Klasifikace vad svarových spojů se provádí podle normy ČSN ISO 6520 [7], požadavky na jakost při svařování stanovuje norma ČSN EN 729-1 až 4 [8]. Směrnicí

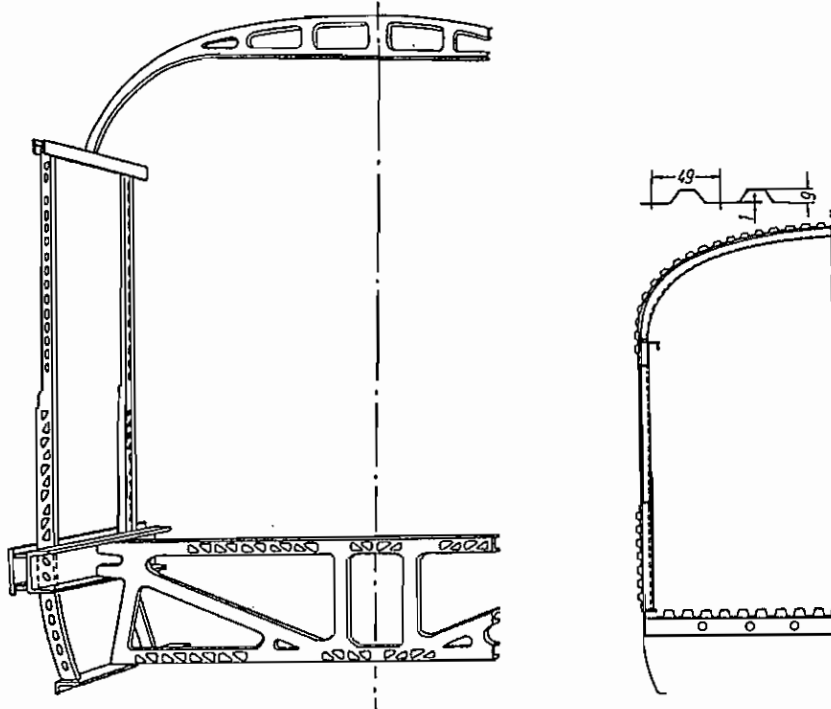
pro mezní velikost vad ve slitinách Al v závislosti na zvoleném stupni jakosti B, C nebo D je norma ČSN EN 30042 [9].

8.6 Příklady návrhu konstrukcí z hliníkových slitin

Základem lehkých konstrukcí z Al-slitin jsou protlačované profily a hraněné či rovné plechy. Svařované nosné konstrukce z Al-slitin se dnes používají zejména v následujících oblastech:

- **Vozidla.** Doprava zahrnuje 35 % celkové spotřeby hliníku [1]. Menší hmotnost Al-slitin umožňuje zvýšit rychlost vozidel nebo zvětšit hmotnost převáženého nákladu. Příkladem mohou být díly karoserií osobních automobilů, motocyklů, skříň vagonů, cisternové a chladičí vozy, posuvné střechy, dveře, chladiče, kabiny lanových drah, přívěsy. Polotovary jsou buď z nevytvrditelných slitin (plechy) nebo pouze z vytvrditelných slitin (protlačované profily, trubky). Pro kolejová a silniční vozidla se např. používají dobře svařitelné materiály nevytvrditelné – Al 99,5; AlMg3; AlMg2Mn0,8; AlMg4,5Mn, nebo vytvrditelné – AlMgSi0,5; AlMgSi0,7; AlMgSi1; AlZn4,5Mg1.

Slitina AlMgSi0,7 se používá nejčastěji, protože splňuje požadavek pevnosti v tahu svařového spoje min. 150 MPa při metodě WIG. Při požadavku vyšší pevnosti to je slitina AlZn4,5Mg1, která má pro uvedený případ svařování pevnost v tahu min. 275 MPa [1]. Životnost svařované konstrukce železničních vagonů se uvažuje 30 let, s opravami se počítá každých 5 až 6 let. Příklad svařovaných uzlů na železničním vagoně je uveden na obr. 8.6 [4]. V současné době ve světě jezdí přes 30000 vagonů vyrobených z Al-slitin [1]. Převážně to jsou vagony pro podzemní a městské dráhy, ale jsou použity i pro Intercity expresy. V silniční dopravě se prosadily Al-slitiny např. při výrobě automobilů (podlahy, postranice, čelní stěny) nebo u můstků pro umístění dopravních dálničních značek.



Obr. 8.6 Konstrukční skupiny pro kolejová vozidla

- **Lodě.** Využívá se vyšší korozní odolnost Al-slitin zejména v mořské vodě a větší stabilita lodí, daná malou hustotou hliníku. Svařují se celé trupy lodí a člunů o výtaku 50 až 800 t

o délce až 70 m [1]. Dále to jsou např. plachetnice a policejní, záchranné, hasičské a rybářské čluny. Jiným příkladem mohou být komíny, stožáry, lodní můstky, přepážky, okna. Příkladem z nedávné doby jsou lodě vysokorychlostního převozu mezi Dánskem a Švédskem. Pro stavbu lodí se používají zejména slitiny AlMg4,5Mn a AlMgSi1. Slitina AlMg4,5Mn v oblasti svarů vykazuje relativně malý pokles tvrdosti a navíc přísada manganu zvyšuje její rekrytalizační teplotu. Zmenšení tvrdosti a pevnosti slitiny AlMgSi v oblasti svarů je nutno řešit vhodným konstrukčním návrhem. Slitiny AlMgSi jsou dobře odolné proti korozi i ve svařeném stavu.

- **Letecké a vesmírné aplikace.** Al-slitiny se používají zejména pro hladké skořepinové konstrukce trupů vojenských a civilních letadel a pro vesmírné družice, v menší míře pro pohonné ústrojí letadel. Životnost konstrukcí pro civilní letadla je omezena na 15 let [1] z důvodů koroze. Pro vesmírné účely jsou zdůrazňovány požadavky na extrémně nízkou hmotnost a vysokou výrobní přesnost a jakost konstrukce. Z hlediska svařování jsou pro letectví předmětem zájmu např. slitiny AlCuMgMn, AlMgSiCr, AlZnMgCuCr, AlCuLiAgMg. Přípustné metody svařování jsou svařování WIG, plazmové, elektronovým paprskem, odporové bodové a švové, laserové [1, 2]. Příkladem použití Al-slitin pro svařované konstrukce mohou být kanály klimatizace nebo klapky pro letadla. Pro vesmírné účely se elektronovým paprskem z Al-slitin svařily např. válcové přepravní nádrže družice ARIANE.
- **Inženýrské stavby.** Využívá se snažší transport a montáž konstrukcí z Al-slitin, nižší zatížení podlah a nižší náklady na základy. Příklady: stožáry, konstrukce hal, mosty, sila, jeřábové výložníky, antény, ve stavebnictví např. stropy, obložení, střechy, okenice, zábradlí, obložení. Základní ustanovení pro výpočet je v normě [10]
- **Nádrže a potrubí.** Předností těchto zařízení svařených z Al-slitin je bezpečnost proti křehkému porušení při nízkých teplotách a korozní odolnost proti mnoha médiím, pro která jsou určena. Příkladem může být nádrž o objemu 3000 m³ pro tekutý dusík, svařená z materiálu AlMg4,5Mn [1] o tloušťce stěny od 5 do 13 mm. Z Al-slitin se např. svařují i trubkové výměníky tepla. Potrubí se od průměru 450 mm vyrábí svařováním ze skroužených plechů.

Literatura

- NEUMANN, A., HOBACHER, A.: *Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure, Teil 4*. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1993.
- NEUMANN, A.: *Kompendium der Schweißtechnik*. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1997.
- PECHAR, J. aj.: *Prvky kovových konstrukcí*. SNTL, Praha 1984.
- GULER, K.: *Aluminium für Verkehrfahrzeuge*. Sonderdruck des Symposiums Aluminium im Verkehr, München 1965.
- FENN, B.: *Učební texty předmětu Principles of Welding Technology*, Brunel University, London 1998.
- ČSN EN 288-4 Stanovení a schvalování postupů svařování kovových materiálů, 1995.
- ČSN ISO 6520-1. Svařování a příbuzné procesy. Klasifikace geometrických vad kovových materiálů. Část 1: Tavné svařování, 2000.
- ČSN EN 729-1 až 4. Požadavky na jakost při svařování. Tavné svařování kovových materiálů, 1996.
- ČSN EN 30042. Svarové spoje hliníku a jeho svařitelných slitin. Směrnice pro určování jakosti, 1997.
- ČSN 73 1590. Hliníkové konstrukce. Základní ustanovení pro výpočet, 1986.

Poznámky:

DÍL IV.

VÝROBA, TECHNICKÁ PŘÍPRAVA VÝROBY A KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ

Autor: Ing. Jiří Barták, CSc.
Recenzenti: Ing. Lumír Ciompa
Ing. Drahomír Schwarz, CSc.



1. OCHRANA ZDRAVÍ A BEZPEČNOST PŘI SVAŘOVÁNÍ

Úvod

Technologie svařování je výrobní proces, který sebou přináší celou řadu rizik. V České republice není dosud vybudována potřebná základna zákonů a zákonných předpisů, z kterých by vyplývala závaznost příslušných ustanovení stávajících norem bezpečnostních ustanovení pro svařování. V současné době platí řada norem ČSN 05 06xx, která zahrnuje bezpečnostní ustanovení pro celý obor svařování kovů. Je tvořena společnou základní normou, zahrnující problematiku projektování a přípravy pracovišť z hlediska bezpečnosti práce, dále pak normou pro provoz svářečských pracovišť, na kterou navazují normy pro jednotlivé metody svařování. Tyto normy obsahují pak doplňky vyplývající ze zvláštností a charakteru jednotlivých metod svařování.

Základní norma ČSN 05 0600 "**Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro svařování kovů. Projektování a příprava pracovišť.**" je určena pro technicko-organizační pracovníky, projektanty, konstruktéry, vedoucí provozů, mistry, pracovníky svářečského dozoru a další řídicí pracovníky. Určuje opatření z hlediska bezpečnosti práce, která musí být dodržena při projektování a přípravě svářečských pracovišť pro všechny technologie svařování.

Norma ČSN 05 0601 "**Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro svařování kovů. Provoz.**" je určena svářečskému dozoru, svářečům, operátorům a všem pracovníkům provádějícím programování, seřizování, údržbu a opravy svařovacích zařízení. Určuje bezpečnostní požadavky pro provádění svářečských prací, zejména pak prací ze zvýšeným nebezpečím.

Na tuto normu bezprostředně navazují další normy pro jednotlivé metody svařování, ve kterých jsou obsaženy odchylky a doplňky, vyplývající ze specifčnosti jednotlivých způsobů svařování.

ČSN 05 0610 "*Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro plamenové svařování kovů a řezání kovů.*"

ČSN 05 0630 "*Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro obloukové svařování kovů.*"

ČSN 05 0650 "*Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro odporové svařování kovů.*"

ČSN 05 0661 "*Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro třecí svařování kovů.*"

ČSN 05 0671 "*Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro laserové svařování kovů.*"

ČSN 05 0672 "*Svařování. Bezpečnostní ustanovení pro elektronové svařování kovů.*"

Uvedené normy se musí používat vždy ve spojení s normou ČSN 05 0601.

1.1 Názvosloví

Pro jednotný výklad názvů a pojmů uvedených v bezpečnostních normách se používají následující definice:

svařování

- všechny metody a způsoby svařování, navařování, tepelné dělení a další způsoby zpracování kovů, při kterém se používá svařovací zařízení, bez ohledu na stupeň mechanizace a automatizace,

svářeč

- pracovník provádějící svařování, navařování, tepelné dělení a další způsoby zpracování kovů,

svářečské pracoviště

- pracovní prostor vymezený pro svařování a pro umístění svařovacího zařízení, určených pro operace související se svařováním,

nebezpečný prostor

- prostor, ve kterém za určitých okolností může nastat stav zapříčiňující úraz osob nacházejících se v tomto prostoru,

prostor bezpečný z hlediska úrazu elektrickým proudem

- prostor, ve kterém je sníženo nebezpečí úrazu elektrickým proudem (podle ČSN 33 0300),

prostor nebezpečný z hlediska úrazu elektrickým proudem

- prostor, ve kterém je vlivem prostředí trvalé nebo přechodné nebezpečí úrazu elektrickým proudem (vlhko, horko, vodivý prach apod.),

mez výbušnosti

- mezní hodnota koncentrace plynu či jiného média, při které je možný výbuch. Může být dolní a horní,

nebezpečná koncentrace pro výbuch

- koncentrace směsi hořlavých plynů, par nebo prachů se vzduchem nebo jiným oxidovadlem, představující polovinu hodnoty dolní meze výbušnosti,

prostor s nebezpečím požáru

-prostor, ve kterém se vyskytují hořlavé látky a výbušniny,

prostor s nebezpečím výbuchu

- prostor, ve kterém se může za normálního provozu vyskytnout nebezpečná koncentrace pro výbuch směsi hořlavého plynu, par nebo prachu s oxidovadlem,

aerosol

- rozptýlené tuhé nebo kapalné částice ve vzduchu se zanedbatelnou pádovou rychlostí,

nejvyšší přípustná koncentrace škodlivin v pracovním prostředí (NPK-P)

- koncentrace plynů, par a aerosolů v pracovním ovzduší, vztažená na 8-hodinový pracovní čas, o které se podle současných vědeckých znalostí předpokládá, že nepoškozuje zdravotní stav osob, vystavených jejímu vlivu,

prostor s nebezpečím otravy

- prostor, ve kterém je značně překročena NPK-P, resp. jsou překročeny mezní hodnoty inkriminovaných škodlivin,

prostor s nebezpečím zadušení

- prostor, ve kterém je nedostatek vzduchu nebo obsah kyslíku ve vdechovaném vzduchu poklesne pod 16 % nebo je znemožněna vazba na červené barvivo či odevzdávání kyslíku tkáním (vdechování oxidu uhelnatého nebo kyanovodíku),

dýchací zóna

- prostor ve výšce dýchacích cest svářeče podle pracovní polohy s ohledem na vykonávanou práci.

1.2 Oprávnění ke svařování

Svářečské práce mohou vykonávat:

- osoby starší 18 let, které mají platné svářečské oprávnění,
- osoby, které jsou ve výcviku svařování pod přímým odborným dozorem svářečského instruktora,
- žáci středních odborných učilišť a středisek praktického vyučování (mladší 18 let), kteří absolvovali základní výcvik svařování a vykonávají svářečské práce pod přímým dozorem mistra odborné výchovy,
- osoby s vyšším odborným vzděláním při řešení výzkumných a vývojových prací v oblasti svařování, s písemným pověřením zaměstnavatele a prokazatelnou znalostí bezpečnostních předpisů (ověřeno osobou s vyšší kvalifikací v oblasti svařování, např. svářečský technolog),
- osoby provádějící programování a nastavování svařovacích zařízení pro mechanizované a automatizované technologie, které mají výkon uvedených prací daný pracovní smlouvou a prokazatelně ovládají obsluhu svařovacího zařízení a zásady bezpečnosti.

Platnost svářečského oprávnění:

- platná svářečská zkouška podle ČSN EN 287, ČSN EN ISO 9606, ČSN EN 1418, ČSN 05 0705, ČSN 05 0710, případně jiných předpisů (platnost 2 roky),
- platné osvědčení o doškolení a přezkoušení z bezpečnostních předpisů (platnost 2 roky),
- platné potvrzení o zdravotní způsobilosti (každých pět let, u osob starších 50 let každé tři roky),
- potvrzení zaměstnavatele, že pracovník je přijat k výkonu svářečských prací.

1.3 Nebezpečí při svařování

Na svářečských pracovištích se téměř vždy vyskytují velmi vysoké teploty, roztavený kov, zdraví škodlivé zplodiny a aerosoly. Je proto nutné včas a s dostatečnou účinností volit všechny dostupné prostředky ke snížení hrozícího nebezpečí a zajištění bezpečnosti práce. Svářečské práce musí být zajišťovány tak, aby nedošlo k požáru nebo výbuchu, nevznikaly úrazy rozstříkem roztaveného kovu a strusky, bylo sníženo nebezpečí ohrožení pohyblivými se částmi svařovacího zařízení. Mimo to se musí zabránit poškození zdraví pracovníků

rizikovými faktory, jako je působení škodlivých plynů, par a aerosolů, dále pak účinků záření a nadměrného hluku. Bezpečnostní opatření na svářečských pracovištích musí být adekvátní povaze prováděných prací.

1.3.1 Ochrana před nebezpečím při svařování

* ochrana před úrazem elektrického proudu

Úrazům elektrickým proudem se musí zabránit vyloučením dotyku svářeče s živými částmi zařízení. Lidský organizmus nutno chránit před úrazem elektrickým proudem především používáním bezpečného proudu (stejnoseměrný proud - 25 mA, střídavý proud - 10 mA). Proto pro zajištění bezpečné práce na pracovišti musíme snížit možnost vzniku úrazu elektrickým proudem na minimum vhodnými opatřeními (např. používat osvětlení a ruční elektrické nářadí výhradně na napětí bezpečné pro dané prostředí).

- *Prostory normální* jsou takové, kde je snižené nebezpečí úrazu elektrickým proudem (studené a suché prostředí s nevodivým prachem), tam je bezpečné napětí stejnosměrné do 100 V a střídavé do 50 V.
- *Prostory nebezpečné* jsou prostory, kde je buď stálé nebo přechodné nebezpečí úrazu elektrickým proudem (venkovní, horké, vlhké, s vodivým prachem, vodivým okolím, s nebezpečím mechanického poškození vodiče a uzavřené kovové nádrže). Zde je bezpečné napětí stejnosměrné do 60 V a střídavé do 24 V.
- *Prostory zvlášť nebezpečné* jsou hlavně prostory s mokřím prostředím a tam je bezpečné napětí stejnosměrné do 25 V a střídavé do 12 V.

* ochrana před úrazem pohyblivými částmi zařízení

Vstup obsluhy do vymezeného nebezpečného prostoru může být až po přerušení přívodu pohonné energie do zařízení. Za provozu automatizovaného svařovacího zařízení je vstup do jeho manipulačního prostoru zakázán. Všechny pohyblivé části svařovacího zařízení musí být zakrytovány.

* ochrana před popálením

Při svářečských pracích používat předepsané ochranné pracovní prostředky (Tabulka 1.1). Odstranit ze svářečského pracoviště hořlavé látky a důsledně kontrolovat, zda je zamezeno vzniku požáru nebo výbuchu. Při manipulaci se svarky používat ochranné prostředky a pomůcky.

* ochrana před úrazem rozstříkem kovu a úlomků strusky

Při svářečských pracích používat předepsané ochranné prostředky (Tabulka 1.1). Při kontrole svaru bezprostředně po jeho svaření, případně čištění svaru, používat brýle.

* ochrana zdraví před účinky dýmů a aerosolů

Při svařování obalenými elektrodami a dále pak při svařování součástí s kovovým nebo nekovovým povlakem, svařování vysoce legovaných materiálů apod. vznikají škodlivé dýmy a aerosoly. Je proto nutné zabezpečit odsávání zplodin tak, aby jejich koncentrace v dýchací zóně svářeče nepřekročila přípustnou hodnotu. To můžeme zajistit důkladným odsáváním zplodin stabilními nebo přenosnými odsávacími zařízeními. Vzniká-li i nadále nebezpečí překročení mezních hodnot, doporučuje se použití speciálních svářečských kukel s přívodem vzduchu (přivádět kyslík je přísně zakázáno).

*** ochrana zdraví před účinky škodlivého záření**

Při svařování elektrickým obloukem vzniká nebezpečné záření. Je to především záření světelné (viditelné), infračervené (tepelné) a ultrafialové. Při svařování metou WIG také záření vysokofrekvenční. Svářeč, případně další pracovníci na svařovacím pracovišti se musí chránit předepsanými ochrannými prostředky (Tabulka 1.1). Ostatní pracovníci pracující v okolí jsou chráněni zástěnami, které musí být z nehořlavého nebo obtížně hořlavého materiálu.

*** ochrana zdraví před účinky nadměrného hluku**

Zdroje hluku umístíme vždy mimo svářečské pracoviště. Je-li hladina hluku překročena, musí být svářeč před jeho škodlivými účinky chráněn osobními ochrannými prostředky (Tabulka 1.1).

*** ochrana zdraví před účinky ozónu**

Při svařování elektrickým obloukem vzniká trojmocný kyslík – ozón, který je ve větší koncentraci zdraví škodlivý. Snížení jeho koncentrace je možné buď důsledným odsáváním nebo používáním ochranných plynů s příměsí dusíku.

1.3.2 Práce se zvýšeným nebezpečím

Před zahájením svářečských prací musí být vyhodnoceny prostory, ve kterých se bude svařovat, včetně prostor přilehlých, zda se nejedná o práci se zvýšeným nebezpečím. To jsou takové práce, při kterých hrozí zvýšené nebezpečí úrazu nebo trvalého poškození zdraví, nebezpečí výbuchu nebo požáru. Mezi práce se zvýšeným nebezpečím patří především práce:

- *v uzavřených a těsných prostorách* (tlakové nádoby, kotle, nádrže, podpalubí lodí apod.),
- *v mokřích, vlhkých nebo horkých podmínkách*, snižujících elektrický odpor ochranných pomůcek a kůže lidského těla,
- *na nádobách, potrubích a zařízeních, které obsahovaly nebo jsou znečištěny látkami ohrožujícími zdraví,*
- *prostory s nebezpečím požáru nebo výbuchu* (páry benzínu, moučný nebo uhelný prach apod.),
- *nádoby, potrubí a zařízení, která jsou pod tlakem a nebo obsahovaly hořlavé či hoření podporující látky,*
- *pod vodou* (platí Vyhláška ČÚBP č. 48/1982 Sb.),
- *v prostředí s překročením nejvyšší přípustné koncentrace* prachů, plynů, svářečských dýmů a aerosolů, případně jiných škodlivin v pracovním ovzduší,
- *v prostředí s vyšší intenzitou záření, než je hygienicky přípustné,*
- *na pracovišti s lasery* třídy III.b a IV. Nebo *při svařování elektronovým paprskem*, když není vyloučeno zasažení pracovníka přímým nebo odraženým paprskem,
- *na pracovišti, kde hladina hluku převyšuje nejvyšší přípustnou mez,*
- *na nádobách, potrubí a zařízeních, u kterých se nedá bezpečně zjistit, zda jejich obsah nebyl zdraví nebezpečný.*

1.3.3 Příkaz pro práce se zvýšeným nebezpečím

Při zvýšeném nebezpečí je povoleno svařovat pouze na písemný příkaz a po splnění všech, v něm nařízených bezpečnostních opatření. Za vyhodnocení nebezpečných prostor,

za vystavení písemného příkazu a za kontrolu provedení nařízených doplňujících bezpečnostních opatření odpovídá zplnomocněný pracovník. Bezpečnostní opatření v příkazu stanoví pracovníci s odbornou způsobilostí v příslušné oblasti. V příkazu musí být vymezena doba platnosti a stanoven dohled dalších pracovníků (včetně asistenční hlídky) na zajištění ochrany před zvýšeným nebezpečím. *Zplnomocněný pracovník* je osoba určená a písemně jmenovaná zaměstnavatelem.

Příkaz pro práce se zvýšeným nebezpečím musí obsahovat:

- přesné určení pracoviště, kde se svařování bude provádět,
- podrobný popis úkolu,
- podrobné uvedení druhu zvýšeného nebezpečí zjištěného při vyhodnocení nebezpečí jak na pracovišti, tak v přílehlých prostorách,
- odborné vyjádření bezpečnostního technika, technika požární ochrany, případně dalších odborných pracovníků,
- nařízená bezpečnostní opatření,
- datum a čas (od – do), pro který byl příkaz vystaven,
- příjmení a jméno svářeče, rozsah oprávnění a číslo Osvědčení,
- příjmení a jméno asistenční hlídky,
- podpis zplnomocněného pracovníka.

Všichni zúčastnění pracovníci musí být před začátkem práce proškoleni a podpisem potvrdí, že byli seznámeni s nebezpečím na daném pracovišti a se způsoby jak tomuto nebezpečí předcházet.

Písemný příkaz pro opakovanou činnost může být nahrazen schváleným technologickým postupem.

Pokud se změní pracovní podmínky uvedené v příkazu nebo se změní určení pracovníci, musí být vystaven příkaz nový.

1.4 Svářečská pracoviště

Svářečským pracovištěm rozumíme pracovní prostor vymezený pro svařování a pro umístění svařovacího, případně dalšího technologického zařízení. Pracovní a manipulační prostor musí umožňovat bezpečné svařování, sestavování svarků a manipulaci s materiálem.

Pro trvalý výkon práce jednoho svářeče musí připadat nejméně 15 m³ volného nezastavěného prostoru a nejméně 2 m² volné podlahové plochy bez odkládacích ploch a spojovacích cest. Při práci s plazmou musí být nejméně 40 m³ (nad 3 kVA – 100 m³) nezastavěného prostoru a 6 m² (nad 3 kVA – 10 m²) volné podlahové plochy. Výška stropu na svářečském pracovišti musí být nejméně 3 m.

Podlaha svářečského pracoviště musí být s nehořlavého materiálu, odolná proti mechanickým vlivům. Povrch podlahy musí být rovný a neklouzavý. Případná změna úrovně podlahy musí být max. pod úhlem 15⁰.

Pokud to charakter výroby dovoluje, doporučuje se umístit pracoviště svářeče do kabiny, kde stěny jsou z nehořlavého materiálu, které musí mít vhodné tepelné a izolační

vlastnosti, musí zabraňovat šíření škodlivin do okolí, nesmí tyto škodliviny pohlcovat a musí odolávat fyzikálním, chemickým a jiným vlivům. Stěny a strop svářečského pracoviště musí svým tvarem, povrchovou a barevnou úpravou co nejvíce snižovat odraz záření na pracovišti. Výška stěn musí být nejméně 2 m a pro zabezpečení proudění vzduchu v kabině mezera mezi stěnou a podlahou 150 až 200 mm.

Osvětlení svářečského pracoviště musí odpovídat ČSN 05 0008. Na pracovní ploše svářeče má být minimálně 300 luxů.

Větrání svářečských pracovišť musí zabezpečit, že v dýchací zóně svářeče není překročena nejvyšší koncentrace škodlivin. Větrání může být přirozené, kombinované a nucené.

- *Přirozené větrání* lze použít v případě, že na jednoho svářeče připadá minimálně 100 m³ prostoru a při svařování nevznikají toxické plyny a páry.
- *Kombinované větrání* se předpokládá u stálých pracovišť (přirozené větrání s místním odsáváním zplodin).
- *Nucené větrání* musí mít pracoviště, kde se svařují materiály s obsahem Pb, Be, Cd, Hg, Mn (vysoký obsah), Zn a jejich sloučenin. Při nuceném větrání musí být zajištěno:
 - 1) odsávané zplodiny nejsou vedeny přes dýchací zónu svářeče,
 - 2) na jednoho svářeče připadá nejméně 50 m² vnějšího čistého vzduchu za hodinu,
 - 3) z celkového množství vzduchu přiváděného na svářečské pracoviště musí být min. 10 % vnějšího čistého vzduchu.

Rozmístění pracovních prostředků a předmětů na pracovišti musí vyplývat z povahy svářečských prací. Bezpečnostní opatření musí odpovídat technologii svařování, časovému rozsahu práce a stupni automatizace svařovacího procesu. Přečody musí mít předepsanou šířku a nesmí sloužit k ukládání připravených dílů, hotových svarků nebo jiných předmětů. Před řídicími skříněmi a rozvaděči musí zůstat volný prostor nejméně široký 0,8 m.

1.5 Závěr

Bezpečnost při svařování kovů, která je obsažena v normách řady 05 06xx je normou doporučenou a je vhodné se jí řídit. Při jejich používání je nutné respektovat jednak technologii svařování a dále pak specifické podmínky (prostředí, stupeň mechanizace apod.). Současně musíme dodržovat celou řadu dalších bezpečnostních norem, mezi které patří především elektrotechnické předpisy (např. ČSN 33 2320, ČSN 33 2330, ČSN 34 1610 a další), předpisy pro instalaci a rozvody plynů (ČSN 34 6460, ČSN 38 6461, ČSN 38 6479) a celou řadu dalších norem a předpisů. Závaznost bezpečnostních norem v současné podobě skončila k 31.12.1999 a postupně jsou nahrazovány vládními vyhláškami, koncipovanými tak, aby mohly být harmonizovány s předpisy Evropského společenství. Dnem 1.7.2000 nabyla účinnosti Vyhláška ministerstva vnitra č. 87/2000 Sb., kterou se stanoví podmínky požární bezpečnosti při svařování a nahřívání živců v tavných nádobách.

Politika bezpečnosti práce představuje otevřený systém opatření, kterými je ovlivněno chování právnických i fyzických osob. Nestanoví tedy taxativní a neměnné kroky, naopak předpokládá při realizaci jednotlivých částí svého obsahu aktivní spolupráci s profesní sférou a sociálními partnery. Pojem bezpečnosti práce přitom chápe v širokém pojetí jako ochranu zdraví a životů zaměstnanců před negativními účinky, vyplývající z pracovního procesu,

tedy nejen z ohrožení vyvolaného určitou technologií nebo strojem. Jejím cílem je vytvářet podmínky pro předcházení úrazům a újmám na zdraví, které vznikají v důsledku nebo v souvislosti s pracovní činností nebo během ní.

Některé související předpisy

České technické normy

ČSN 01 8013	Požární tabulky
ČSN 01 8014	Tabulky k označování prostor s tlakovými nádobami na plyny
ČSN 05 01xx	Svařování. Konstruktivní předpisy a směrnice pro kovy.
ČSN 05 01xx	Svařování. Výrobní předpisy z hlediska vybavení pracovišť a kvalifikace svářečů
ČSN 05 0507	Předpisy pro základní zkoušky svářečů
ČSN 05 0710	Předpisy pro úřední zkoušky svářečů
ČSN 07 8304	Tlakové nádoby na plyny. Provozní pravidla.

České normy harmonizované

ČSN ISO 3864	Bezpečnostní barvy a bezpečnostní značky.
ČSN EN 1598	Ochrana zdraví a bezpečnost práce při svařování a příbuzných procesech – Průsvitné závěsy pro obloukové svařování
ČSN EN 287-1	Svařování – Zkoušky svářečů – Tavné svařování. Část 1: Oceli
ČSN EN 287-2	Svařování – Zkoušky svářečů – Tavné svařování. Část 2: Hliník a jeho slitiny.
ČSN EN ISO 9606-3	Svařování – Zkoušky svářečů – Tavné svařování. Část 3: Měď a její slitiny
ČSN EN ISO 9606-4	Svařování – Zkoušky svářečů – Tavné svařování. Část 3: Nikl a jeho slitiny
ČSN EN 1418	Svářečský personál-Zkoušky svářečských operátorů pro tavné svařování a seřizovačů odporového svařování pro plně mechanizované a automatické svařování kovových materiálů.
ČSN EN 29 539	Materiály na zařízení pro plamenové svařování, řezání a příbuzné procesy.

Literatura

- Bezpečnost a hygiena na svařovacích pracovištích. Sborník přednášek. Pardubice, září 1991.
BUREŠ, J.: Bezpečnost při svařování. 2.vydání, 1998.
JENERÁLOVÁ, B.: Komentář k vyhlášce Ministerstva vnitra č.87/2000 Sb.

Tabulka 1.1

Ochranné pomůcky

Druh ochrany	G		E		R		Poznámka
	Z	D	Z	D	Z	D	
Ochrana očí a tváře - ochranné brýle - ochranná kukla nebo štít - ochranný tvarový štít	x		x		x		Použití je možno sloučit
Ochrana dýchacích orgánů - respirátor - tvarová maska - dýchací přístroj							
Ochrana sluchu - zátkové chrániče - ušní chrániče - protihluková přilba							
Ochrana hlavy - ochranná přilba - ochranná čepice - hutnický klobouk							
Ochrana rukou - svářečské rukavice s manžetou - svářečský pracovní rukáv kožený - 5-ti prsté kožené rukavice	x		x		x		
Ochrana těla - oblek svářečský impregnovaný - kožená zástěra svářečská - oteplovací vložka - prošívaná vesta s rukávy - podložka pro svářeče	x		x		x		b) na montážích se zástěra nosit nemusí
Ochrana nohou - kožená pracovní obuv - prošívaná pracovní obuv – kanady - ochranné kožené kamaše - slévárenské boty - pérka	x		x		x		
Zajištění proti pádu - bezpečnostní pás s přidavným lanem - přidavné lano nehořlavé							
G – svařování plamenem E – svařování elektrickým obloukem R – svařování odporem Z – základní ochrana pracovníka D – doporučená ochrana pracovníka							

2. ZAJIŠTĚNÍ KVALITY SVAŘOVANÝCH KONSTRUKCÍ A ŘÍZENÍ JAKOSTI VE VÝROBĚ

Úvod

Problematika svařování je současný fenomén, který dnes prolíná celým průřezem činností výrobní organizace, kde je používáno. Proto je nutné chápat svařování jako komplexní problém, na jehož řešení se musí podílet prakticky všichni zaměstnanci organizace, kteří zajišťují realizaci výroby, od pracovníka realizujícího kontrakt až po pracovníka výpravy. Většina organizací zhotovuje výrobky nebo poskytuje služby určené k uspokojení potřeb zákazníka. Hlavním požadavkem zákazníka je záruka kvality. Jakost je souhrn vlastností, které vyjadřují způsobilost výrobku plnit funkce, pro které je určen.

Technické specifikace samy o sobě nezaručují, že budou důsledně plněny požadavky odběratele. Hlavním faktorem činnosti organizace je jakost jejich výrobků a služeb. K dosažení a udržení příznivých výsledků ekonomické činnosti je nutné stálé zvyšování kvality, protože i ze strany zákazníků je neustálý trend růstu požadavků na jakost. To vede k zavádění různých systémů pro zabezpečování jakosti a následně k rozvoji norem a směrnic v oblasti systémů jakosti, které doplňují technické požadavky. Systémy jakosti v organizacích ovlivňují především jejich záměry, druh výrobku nebo služby a specifičnost jejich činnosti.

2.1 Systémy řízení a zabezpečení jakosti ve výrobě

K vybudování systému řízení jakosti v organizaci mohou sloužit normy řady ČSN EN ISO 9000. Jejich účelem není normalizace zavedených systémů jakosti, ale objasnění pojmů a vzájemných vztahů mezi hlavními pojmy, které se týkají jakosti a poskytnutí směrnic využitelných k internímu řízení jakosti, případně externímu zabezpečování jakosti.

Hlavními termíny pro potřeby těchto norem jsou:

Politika jakosti	celkové záměry a směry organizace v oblasti jakosti, formulované vrcholovým vedením.
Management jakosti	součást funkce celkového řízení, která určuje a realizuje politiku jakosti.
Systém jakosti	organizační struktura, zodpovědnosti, postupy, procesy a zdroje potřebné pro realizaci managementu jakosti.
Operativní řízení jakosti	provozní metody a činnosti používané ke splnění požadavků na jakost.
Zabezpečování jakosti	všechny plánované a systematické činnosti nutné pro dosažení přiměřené důvěry, že výrobek nebo služba uspokojí dané požadavky na jakost.

Pokud dané požadavky na jakost zcela neodpovídají potřebám uživatele, není zabezpečování jakosti úplné. Její efektivnost vyžaduje vyhodnocování působících faktorů formou ověřování a prověrek výroby a kontrolních operací. Zabezpečování jakosti slouží jednak jako nástroj řízení v organizaci a dále pak ve smluvních vztazích k dosažení důvěry k dodavateli.

Při zavádění systému řízení jakosti má organizace usilovat o:

- dosažení a udržování jakosti výrobku nebo služby na úrovni soustavného uspokojování stanovených nebo předpokládaných potřeb zákazníka,
- důvěru vlastního vedení, že stanovená jakost je stále dosahována a udržována,
- poskytnutí důvěry zákazníkovi, že dodávaný výrobek nebo služba má požadovanou jakost.

Soubor norem ISO 9000 je možné použít ve dvou odlišných situacích: smluvních a nesmluvních. V obou případech však platí, že organizace dodavatele je nucena zavést a udržovat takový systém jakosti, který by posílil jeho konkurenční schopnost a umožní mu dosáhnout potřebnou jakost výrobku při efektivně vynaložených nákladech.

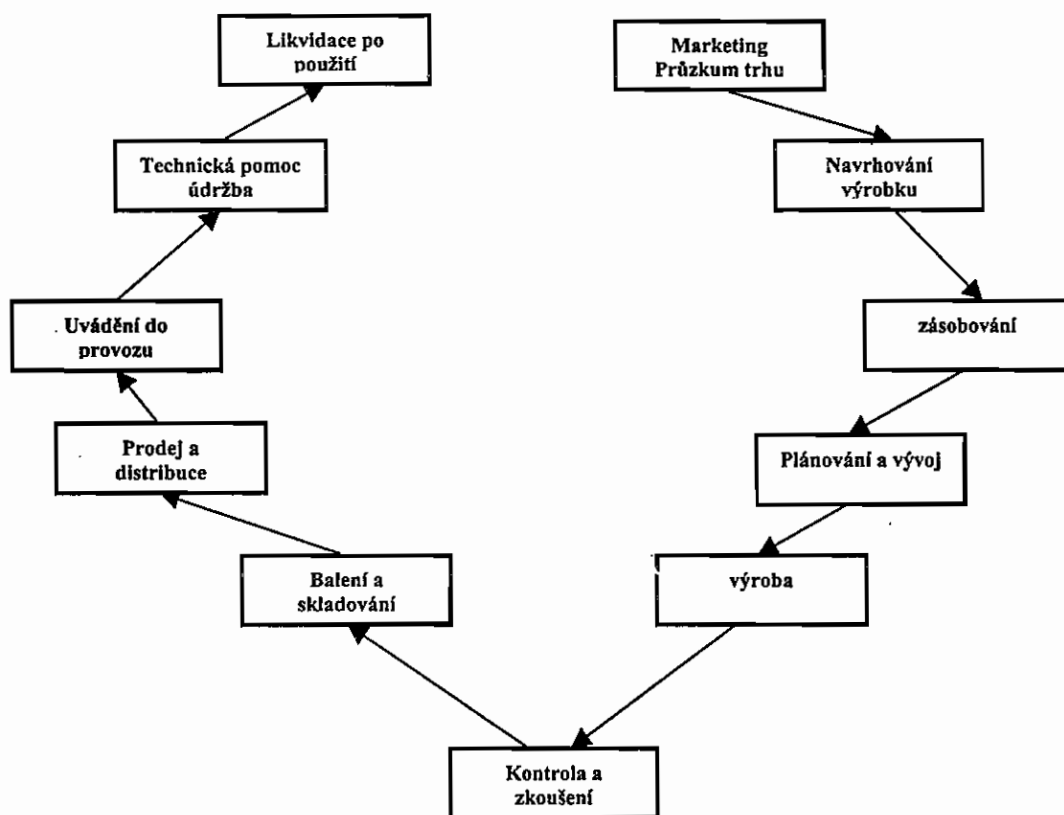
Ve smluvních vztazích se odběratel zajímá především o určité prvky systému jakosti dodavatele, které ovlivňují jeho schopnost soustavně vyrábět výrobky nebo poskytovat služby podle stanovených požadavků. Dále se také zajímá o související rizika. Proto odběratel smluvně vyžaduje, aby určité prvky byly součástí systému jakosti dodavatele.

Používání norem řady ČSN EN ISO 9000

Normy řady ČSN EN ISO 9000 pro systémy jakosti obsahují dva druhy norem, které se vztahují buď na situaci smluvní nebo nesmluvní.

- a) ČSN EN ISO 9004 poskytuje potřebné údaje pro řízení jakosti ve všech organizacích. Jsou to informace o technických, lidských a správních faktorech, které ovlivňují jakost výrobků nebo služeb. Zdůrazňuje uspokojování potřeb zákazníka, vymezení funkční odpovědnosti a význam posouzení případných rizik a přínosů. Všechna tato hlediska by se měla brát v úvahu při vytváření a udržování účinného systému jakosti.
- b) ČSN EN ISO 9001, 9002 a 9003 se používá pro externí zabezpečování jakosti ve smluvních vztazích. Určité prvky systému jakosti byly seskupeny do tří odlišných modelů ve vazbě na funkční nebo organizační schopnost požadovanou na dodavateli výrobku nebo služby. Volba a použití modelu zabezpečování jakosti vhodného pro danou situaci mají poskytnout prospěch jak pro odběratele, tak dodavatele. Zkoumáním rizik, nákladů a přínosů umožní oběma stranám stanovit rozsah a charakter vzájemně poskytovaných informací a opatření, která musí každá strana přijmout, aby poskytla přiměřenou důvěru, že zamýšlená jakost bude dosažena.

Odpovědnost za řízení jakosti má vrcholové vedení organizace (ČSN EN ISO 9000 kap. 3.2). Systém jakosti se obvykle vztahuje a působí na všechny činnosti spojené s jakostí výrobku nebo služby. Zahrnuje všechny fáze od počáteční identifikace až po konečné upokojení požadavků a očekávání zákazníka. Tyto fáze lze znázornit smyčkou jakosti (viz obr.2.1).



Obr. 2.1 Smyčka jakosti

S ohledem na vzájemnou vazbu činností v rámci firmy mají být marketing a navrhování zdůrazněny jako mimořádně důležité pro určení a vymezení potřeb zákazníka, jeho očekávání a požadavků, dále pak poskytnutí podkladů pro výrobu dle stanovených specifikací při optimálních nákladech.

Nová norma ČSN EN ISO 9001:2000

Struktura systému řízení jakosti podle znění nové verze normy je orientovaná procesně a prohlubuje orientaci řízení jakosti na zákazníka. Novým prvkem je monitorování spokojenosti zákazníka, což je jedním z měřítek účinnosti systému a současně zdroj podnětů pro zlepšování systému, nabízených služeb a výrobků. Není přesně stanoven rozsah dokumentace pro všechny stupně řízení, ale odvíjí se od druhu a typu organizace. Novým požadavkem je stanovení pravidel a zabezpečení interní komunikace mezi různými úrovněmi a funkcemi a dále pak zabezpečení potřebného pracovního prostředí.

System řízení jakosti z pohledu ČSN EN ISO 9001:2000, je členěn do čtyř základních oblastí:

- uplatnění odpovědnosti vedení,
- řízení zdrojů,
- realizace výrobků,
- měření, monitorování, analyzování a jejich využití ke zlepšování.

Aby organizace fungovala efektivně, musí stanovit a řídit mnoho navazujících procesů. Systematická identifikace a řízení procesů používaných organizací a vztahy mezi nimi musí být popsány a jsou podstatou systému řízení jakosti. K všeobecným požadavkům, kladeným na systém řízení jakosti patří:

- identifikace procesů nezbytných pro systém řízení jakosti,
- stanovení posloupnosti a vzájemné vazby těchto procesů,
- stanovení metod a kritérií pro řízení a monitorování procesů,
- zajištění dostupnosti informací, nezbytných pro podporu a monitorování procesů,
- měření, monitorování a analyzování procesů, přijímání opatření pro dosažení plánovaných výsledků a neustálé zlepšování,
- řízení identifikovaných procesů v souladu s požadavky mezinárodní normy pro řízení jakosti.

Procesní struktura systému řízení jakosti v žádném případě neznamena zavržení stávajícího systému a vytvoření systému zcela nového. Ve většině případů procesy představují sdružování a kombinaci dosavadních standardních systémových do menších či větších celků. Nově je zdůrazňováno neustálé zlepšování systému jakosti.

Za výrobek odpovídá vždy výrobce, a proto i prokázání shody výrobků s požadavky je jeho úkolem (Zákon č. 22/1997 Sb. - o technických požadavcích na výrobky).

2.2 Příručka jakosti

Příručka jakosti (dále jen PJ) se zpracovává podle normy ČSN EN 10013. Jejím účelem je popsat systém zajišťování jakosti v organizaci, management jakosti a ověřování výrobků. Podat informaci zákazníkům i ostatním institucím, jakým způsobem organizace plní požadavky národních a mezinárodních norem zajišťování jakosti a bezpečného provozu výrobků. V úvodu PJ se uvádí zásady, pravidla a postupy zajišťování jakosti, odpovědnost řídicích pracovníků organizace za dodržování ustanovení uvedené v příručce jakosti v oblasti jejich působnosti. V dalších částech PJ je popsán použitý systém jakosti, způsob přezkoumání smlouvy, řízení dokumentace, zásobování, označení a sledovatelnosti výrobku, řízení procesů, provádění kontroly a zkoušení, metrologie, stav po kontrole a zkouškách, řízení neshodného výrobku, opatření k provádění nápravy a prevence, systém manipulace, skladování, balení, ochrana a dodávání výrobků, řízení záznamů o jakosti, interní prověrky jakosti, příprava (školení) pracovníků, zajišťování servisu a využití statistických metod. Popsaný systém v PJ zpravidla doplňují dílčí směrnice a návody jakosti k uvedené problematice. Požadavky na jakost ve svařování jsou v PJ uvedeny v kap. Řízení výrobního procesu, kde jsou uvedeny a popsány zvláštní procesy - svařování a tepelné zpracování.

Funkčnost a shoda popsaného systému jakosti ve zpracované Příručce jakosti se ověřuje formou interních prověrek - **auditů** na jednotlivých pracovištích prověřované organizace pracovníky certifikačního orgánu.

Po ověření funkčnosti a shody popsaných prvků zaváděného systému jakosti a pokynů auditorů akreditované certifikační organizace, obdrží prověřovaná organizace certifikát systému jakosti.

2.3 Požadavky na jakost ve svařování a směrnice pro určování stupňů jakosti

Procesy, jejichž výsledky nemohou být plně ověřovány následnou kontrolou a zkoušením řadíme mezi tzv. „**zvláštní procesy**“. Pro splnění stanovených požadavků se vyžaduje soustavný soulad s dokumentovanými procesy. Tyto procesy, mezi které patří i svařování, musí být uznány jako způsobilé a musí být prováděny v řízeném režimu (ČSN EN ISO 9001, kap. 4.9.2). Dodavatel musí vytvořit a udržovat postupy ke zjišťování potřeb přípravy pracovníků, jejichž činnost má vliv na jakost. Způsobilost pracovníků, kteří jsou pověřeni plnit specifické úkoly, se přiznává na základě příslušného vzdělání, přípravy a zkušeností, podle požadavků stanovených v použitém systému jakosti. Pro prokázání této způsobilosti musí být udržovány příslušné záznamy o přípravě pracovníků (ČSN EN ISO 9001, kap. 4.18). Na výrobci je vyžadováno aby měl k dispozici dostatečný počet pracovníků, zajišťujících práce svářečského dozoru a všech činností se vztahem ke svařování (ČSN EN 729-2, kap.6).

Pro výrobce, kteří využívají při výrobě svařování, byly vypracovány normy řady **ČSN EN 729 - 1 až 4**, které jsou směrnicemi pro stanovení vhodných požadavků na jakost. Jsou členěny tak, že mohou být využity pro každý druh svařované konstrukce nebo svarku. Stanovují tři úrovně kvalitativních požadavků na svářečskou výrobu jak v dílnách, tak i na montážích a poskytují návod k zajištění způsobilosti výrobce vyrábět svařované konstrukce v předepsané kvalitě. Obsah této normy je třeba považovat za návod pro přípravu předpisových nebo smluvních požadavků. Pro vedení výrobního podniku slouží ke stanovení nároků na svařování systémy zabezpečení jakosti, odpovídající danému typu svařovaných výrobků.

Tato norma upřesňuje volbu požadavků na jakost při svařování. Při použití této normy mohou být tyto požadavky zvoleny tak, aby odpovídaly danému typu svařovaného výrobku. Podle této normy rozeznáváme tři základní požadavky na jakost:

- vyšší (ČSN EN 729-2),
- standardní (ČSN EN 729-3),
- základní (ČSN EN 729-4).

Je-li podle smlouvy požadován systém zabezpečení kvality podle ČSN EN ISO 9001 nebo ČSN EN ISO 9002, musí být požadavky na jakost při svařování vždy podle ČSN EN 729-2, tj. vyšší požadavky.

Norma **ČSN EN 25817** „Svarové spoje ocelí zhotovené obloukovým svařováním – Směrnice pro určování stupňů jakosti“ se používá jako podklad při sestavování systémů jakosti a požadavků na vyhovující svarové spoje. Podrobnější popis a využití této normy v praxi je uvedeno v kapitole 4 „Postupy svařování a příprava svarových ploch“.

2.4 Svářečský dozor - úkoly a odpovědnosti

Úkoly a odpovědnosti pracovníků působících v činnostech souvisejících se svařováním, jako je plánování, vlastní provedení, koordinace, dozor a kontrola, musí být jednoznačně stanoveny. Odpovědnosti a úkoly týkající se jakosti, které jsou zahrnuty do dozoru nad činnostmi související se svařováním, jsou stanovené normou **ČSN EN 719**. Svářečský dozor může v každé výrobní organizaci vykonávat jeden nebo více pracovníků.

Požadavky na svářečský dozor mohou být stanoveny výrobcem, smlouvou nebo příslušnou normou.

Pracovníci svářečského dozoru jsou pracovníci odpovědní za výrobní svářečské operace a za činnosti se svařováním související, jejichž způsobilost a znalosti jsou prokázány výcvikem, vzděláním a odpovídajícími výrobními zkušenostmi. Svářečský dozor je termín pro osobu vykonávající jeden nebo více úkolů technického dozoru. Pracovníkům svářečského dozoru jsou přidělovány úkoly a odpovědnosti související s jakostí.

Každá činnost může být spojena s větším počtem úkolů a odpovědností, jako jsou:

- technické podmínky nebo příprava,
- koordinace,
- řízení,
- kontrola, prohlídka nebo osvědčení.

Výrobce však musí jmenovat nejméně jednoho odpovědného pracovníka svářečského dozoru, který je považován za součást odpovědnosti výrobní organizace.

Pro některé výrobní činnosti mohou být úkoly a odpovědnosti dozoru vykonávány subdodavatelem. Činnosti subdodavatele však přitom zůstávají podřízeny svářečskému dozoru výrobní organizace.

Všeobecně pro všechny pracovníky svářečského dozoru platí, že musí být schopni **prokázat odpovídající technické znalosti**, které jim umožňují plnit všechny přidělené úkoly. Přitom musí být zvažena následující hlediska:

- všeobecné technické znalosti,
- zvláštní technické znalosti odpovídající přiděleným úkolům.

Tyto znalosti mohou být získány spojením teoretických znalostí, školeními a praktickými zkušenostmi.

Rozsah požadovaných výrobních zkušeností, školení a technických znalostí by měl být stanoven výrobní organizací a je závislý na přidělených úkolech a odpovědnostech. Pověření pracovníci svářečského dozoru se podle druhu a složitosti výroby zařazují do jedné ze tří dále uvedených skupin. Příslušné výrobní zkušenosti nemusí být nezbytně delší než tři roky.

1) Vyšší technické znalosti

Pracovníci svářečského dozoru s úplnými technickými znalostmi v plánování, výrobě, dozoru a zkoušení pro všechny úkoly a odpovědnosti ve svářečské výrobě.

2) Speciální technické znalosti

Pracovníci svářečského dozoru, jejichž znalosti jsou dostačující pro úkoly a odpovědnosti při plánování, výrobě, dozoru a zkoušení, a to ve svářečské výrobě s vybraným nebo omezeným technickým rozsahem.

3) Základní technické znalosti

Pracovníci svářečského dozoru, jejichž technické znalosti jsou dostačující pro úkoly a odpovědnosti při plánování, výrobě, dozoru a zkoušení v omezeném rozsahu zahrnujícím jen jednoduché svařované výrobky.

Evropská svářečská federace (EWF) zpracovala na základě dobrovolnosti doporučení pro minimální požadavky na školení, zkoušky a certifikaci pracovníků svářečského dozoru. Tato doporučení včetně identických podkladů Mezinárodního svářečského institutu (IIW) tvoří základ pro kurzy svářečských techniků, které jsou pořádané ve všech třech kvalifikačních stupních i v České republice ve shodě se systémem České svářečské společnosti ANB, akreditované u EWF.

Pracovníci svářečského dozoru, kteří splňují požadavky těchto dokumentů, mohou být považováni za vyhovující v dané oblasti.

2.5 Sledovatelnost, monitorování a uchování údajů o výrobě

Způsob a rozsah dokladování výrobního procesu u výrobce se řídí požadavky uvedenými ve smlouvě na výrobek a pravidlech systému jakosti, který výrobce používá. Jedná se především o opatření na uložení a výdej základních a přídatných svařovacích materiálů. Evidence a označení materiálu uloženého ve skladu musí vždy umožnit jeho identifikaci. V průběhu mezioperační výroby je nutné přenášet označení materiálu. Přídatné svařovací materiály se ukládají v původních obalech do temperovaného skladu. O příjmu, skladování a výdeji musí být vedena řádná evidence a musí být veden soustavný záznam o teplotě a vlhkosti skladu (např. zápisem do deníku nebo zápisem na registru). Dále musí mít výrobce zpracovanou výrobní dokumentaci, kam patří především plán kontrol a zkoušek (inspekční plán), výrobní technologický postup s výkresem, technologické instrukce, návody a směrnice, materiálové listy, záznamové listy apod.

Monitorování svařovacího procesu se provádí pomocí ručně pořízených písemných záznamů nebo kontinuálním zápisem veličin pomocí analogových nebo digitálních záznamů, případně na základě statistických údajů. Výběr způsobu monitorování závisí na způsobu svařování (ruční – písemný záznam, mechanizované a automatizované – kontinuální zápis apod.), požadavcích výrobce, předpisu nebo normě.

Prokazatelné doložení kvality výrobku vyžaduje zajištění odpovídajícího způsobu provádění identifikace a zpětné sledovatelnosti výrobního procesu. Jakost hotového výrobku se prokazuje na základě provedených záznamů jakosti. Rozsah a obsah potřebných záznamů se řídí požadavky systému jakosti, výrobovými předpisy, předpisy pro použité metody svařování, vládními nařízeními, vyhláškami apod. Mohou mít charakter interního dokladu (písemný záznam z prováděné kontroly) nebo externího dokladu (osvědčení nebo protokol o provedené zkoušce, certifikátu apod.), který vystavuje a schvaluje nezávislá externí organizace.

Záznamy související s jakostí výrobku se musí v souladu s požadavky normy ČSN EN 729 archivovat po dohotovení výrobku minimálně pět let, pokud ji neupravuje požadavek stanovený ve smlouvě nebo výrobová norma. Používá-li výrobce pro kontroly a zkoušky externí organizace, musí mít předem ve smlouvě vyjasněno, které dokumenty bude externí organizace předávat po ukončení práce a které bude sama archivovat.

Literatura

BARTÁK, J.: Zajištění kvality svařovaných konstrukcí. Ocelové konstrukce, č.1/2001.

BARTÁK, J.: Požadavky na jakost ve svařování. WELDING 2000, mezinárodní svářečský kongres, Brno, říjen 2000.

Kolektiv: Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. Učebnice pro kurzy svářečských technologů a inženýrů. Zeross, Ostrava, únor 2000.

Normy řady ČSN EN ISO 9000, ČSN EN 729, ČSN EN 719, ČSN EN ISO 10013.

ČSN EN ISO 9001:2000

3. NORMALIZACE VE SVAŘOVÁNÍ, OZNAČOVÁNÍ SVARŮ NA VÝKRESECH, POLOHY SVAŘOVÁNÍ A JEJICH ZNAČENÍ, ZNAČENÍ TECHNOLOGIÍ SVAŘOVÁNÍ

Pro sjednocení označování svarů na výkresech, poloh svařování a technologií svařování jsou vydány mezinárodní normy. Podle vnitřních předpisů CEN/CENELEC jsou země sdružené v těchto organizacích povinny převzít tyto normy a udělit jim status národní normy. Původní národní normy, pokud jsou s nimi v rozporu, se musí zrušit. Česká republika, která je členem CEN proto musí vydat tyto normy v identickém textu, bez jakýchkoli modifikací.

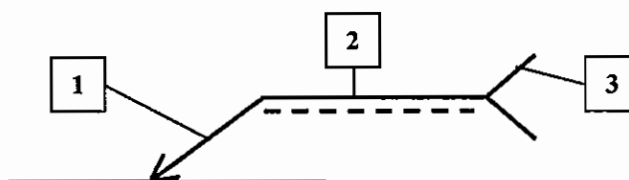
Evropské normy existují ve třech oficiálních verzích - v anglické, německé a francouzské. Verze v každém jiném jazyce předložená členem CEN do jeho vlastního jazyka a kterou notifikuje, má stejný status jako oficiální verze.

3.1 Označování svarů na výkrese

Pravidla pro symbolické označování svarových a pájených spojů na výkrese předepisuje norma ČSN EN 22 553 "Svarové a pájené spoje - Označování na výkresech". Spoje se označují tak, aby označení odpovídalo všeobecným pravidlům, používaným pro technické výkresy. Proto se doporučuje pro zjednodušení používat označení uvedené v této mezinárodní normě. Toto označení musí poskytovat všechny údaje, aby nebylo nutné uvádět na výkresech doplňující poznámky. Označení svaru obsahuje základní značku, doplněnou o doplňkovou značku, údaje o rozměrech svaru a další doplňující údaje.

3.1.1 Umístění značek na výkrese

Označení svaru (obr. 3.1) tvoří odkazová čára se šípkou (1), která směřuje do místa kde je svar. Značky svarů se umísťují na praporek odkazové čáry (2) a další doplňující údaje do vidlice (3).








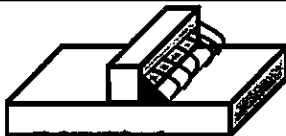
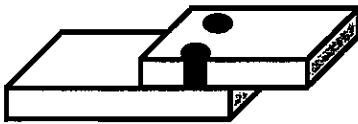
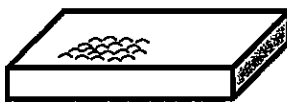



Obr.3.1 Označení svaru

Praporek odkazové čáry je tvořen dvěma rovnoběžnými čarami, z nichž jedna je plná a druhá přerušovaná. Tato přerušovaná čára může být umístěna nad nebo pod plnou čárou. Jednotlivé typy svarových spojů jsou označovány značkou, která obecně vychází z tvaru svarového úkosu. Značka neurčuje způsob svařování. V případě potřeby je možné použít kombinace základních značek. U oboustranných svarových úkosů jsou značky umístěny symetricky k praporku odkazové čáry. Poloha značky vůči praporku odkazové čáry se řídí následujícími pravidly:

- je-li povrch svaru na straně odkazové čáry, umísťuje se značka na stranu plné čáry praporku,
- je-li povrch svaru na straně protilehlé k odkazové čáře, umísťuje se značka na stranu přerušované (identifikační) čáry.

V tabulce 3.1 jsou uvedeny některé základní značky svarů a jejich kombinace včetně pojmenování a zobrazení.

Tabulka 3.1

číslo	Pojmenování spoje	zobrazení	značka
1	I svar		
2	V svar		V
3	1/2 V svar		V
4	Y svar		Y
5	U svar		U
6	Koutový svar		△
7	Bodový svar		○
8	Návar		3
9	Oboustranný V svar (X svar)		X
10	Oboustranný 1/2 V svar (K svar)		K
11	Oboustranný U svar		U

Základní značka může být opatřena doplňkovou značkou charakterizující tvar povrchu spoje. Doporučené doplňující značky jsou uvedeny v tabulce 3.2. Pokud není uvedena doplňková značka, znamená to, že se tvar povrchu nepředepisuje.

Tabulka 3.2

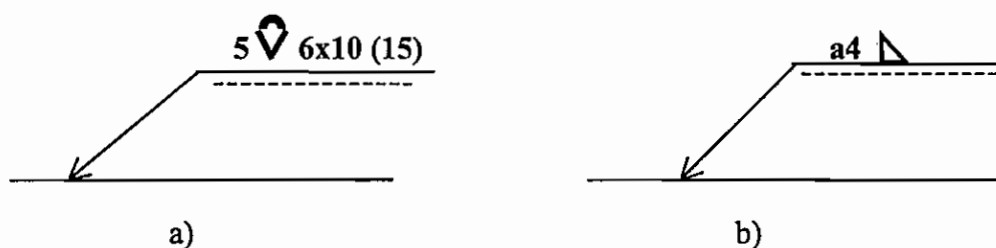
Tvar povrchu spoje	značka
Plochý	—
Převýšený	⌒
Vydutý	⌒
Opracované přechody	⌋
Přivařená podložka	⌈M⌋
Odnímatelná podložka	⌈MR⌋

3.1.2 Rozměry svarů

Ke každé značce svaru může být přiřazen určitý počet rozměrů, které se na odkazové čáře zapisují tak, že vlevo od značky (tj. před značkou) se uvádí hlavní rozměr svaru (vztahuje se k příčnému řezu svaru) a vpravo od značky (tj. za značkou) se uvádějí rozměry týkající se délky svaru. Pokud je to nutné, mohou se zde uvést i další méně důležité rozměry jako např. počet stehů, vzdálenost mezi stehy apod. Vzdálenost svaru od kraje dílu se neuvádí.

Pokud se týká označování rozměrů svarů, platí zásada, že pokud není za značkou uveden rozměr, je svar proveden v celé délce svařovaných dílů. Pokud není u tupého svarového spoje uvedena jeho velikost, je svar proveden v celé tloušťce svařovaných dílů. U koutových svarů můžeme jejich velikost předepisovat dvěma způsoby. Buď výškou svaru (velikost odvěsny) a potom musíme před údajem označujícím velikost svaru uvést písmeno *z* nebo jeho tloušťku (výšku trojúhelníka) a potom musíme uvést písmeno *a*. Na obr. 3.2 potom máme uvedeny příklady značení:

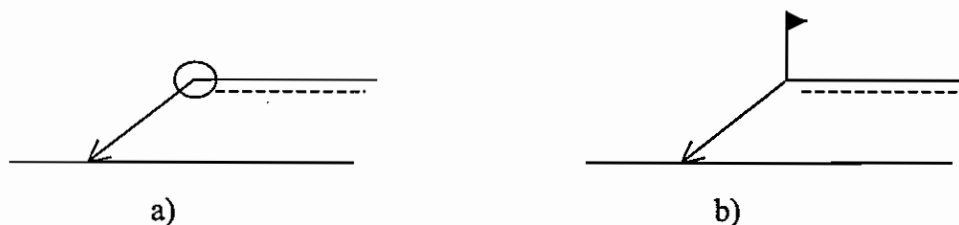
- označení tupého svarového spoje V, o rozměru 5 mm, 6 stehů délky 10 mm a vzdálenost mezi stehy 15 mm,
- označení koutového svaru tloušťky 4 mm provedený po celé délce svařovaného dílu.



Obr. 3.2 Označování rozměrů svaru

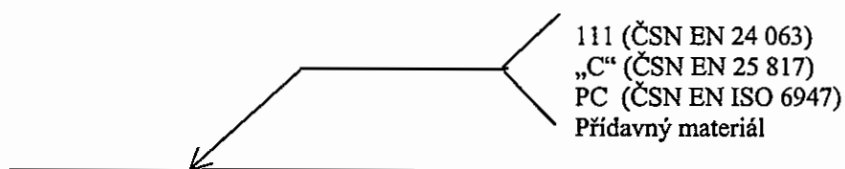
3.1.3 Doplnující značky

Pro upřesnění dalších údajů o svaru mohou být použity další doplňující značky. Patří sem např. označení svaru provedeného po celém obvodu, kdy se použije jako doplňující značka kružnice (obr. 3.3a) nebo označení montážního svaru, kdy se použije jako doplňující značka praporek (obr. 3.3b).



Obr. 3.3 Doplnující značky svaru

Údaje o metodě svařování, stupni jakosti, ve kterém má být svar proveden, poloze svařování a přídavných materiálech se uvádějí v tomto pořadí ve vidlici praporeku odkazové čáry v souladu s příslušnými normami (obr. 3.4).

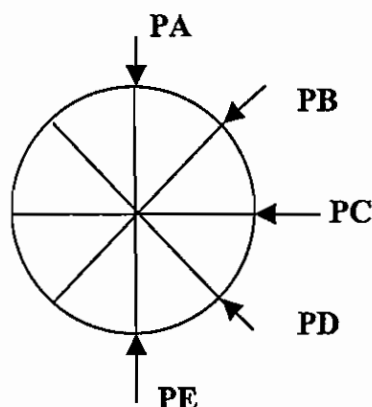


Obr. 3.4 Údaje o svaru

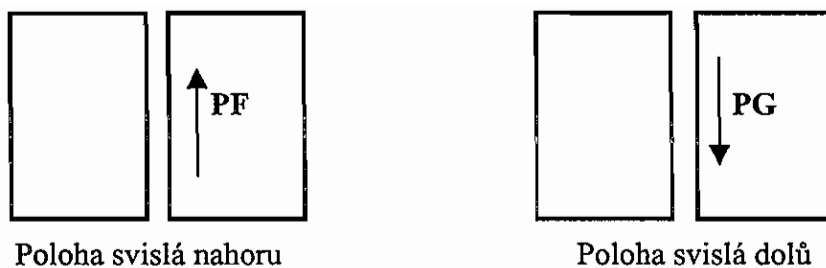
3.2 Polohy svařování

Pro označování poloh svařování byla vypracována mezinárodní norma ČSN EN ISO 6947 "Svařování - Pracovní polohy - Definice úhlů sklonu a otočení". Pro hlavní polohy byly stanoveny symboly, které mohou být jednoduše použity pro daný účel. Tyto symboly byly vybrány nezávisle na již existujících významových zkratkách a to tak, že nebyly odvozeny z žádného konkrétního jazyka. Hlavní polohy pro tupé i koutové svary jsou uvedeny na obr. 3.5 a obr.3.6.

PA vodorovná shora
PB vodorovná šikmo shora
PC vodorovná
PD vodorovná šikmo nad hlavou
PE vodorovná nad hlavou



Obr. 3.5 Polohy svařování



Obr. 3.6 Polohy svařování

Obvodové svary na trubkách s nakloněnou osou musí mít u značky polohy svařování označení sklonu a otočení. Pro zjednodušení je označení otočení nahrazeno písmenem L a úhlem naklonění a označení sklonu podle směru svařování písmenem H pro svařování směrem nahoru, písmenem J pro svařování směrem dolů a písmenem K pro orbitální svařování.

Označení polohy pro svařování na trubce skloněné pod úhlem α je:

- a) **H-L045** svařování nahoru k vrcholu svaru při sklonu trubky 45°,
- b) **J-L060** svařování od vrcholu svaru dolů při sklonu trubky 60°,
- c) **K-L045** orbitální svařování při sklonu trubky 45°.

Aplikace dosud používaných českých pojmenování pro polohy svařování nebyla možná, a proto byla v souladu s překladem této normy zavedena pojmenování nová. Aby se předešlo nedorozuměním je vhodné používat při slovním označení polohy svaru také symboly označení.

3.3 Značení technologií svařování

Rozdělení a číselné označování metod svařování, tvrdého a měkkého pájení a pájení do úkosu uvádí norma ČSN EN 24064 "Svařování, tvrdé a měkké pájení, pájení kovů do úkosu. Přehled metod a jejich číslování pro zobrazení na výkresech".

Každé metodě svařování je přiřazen číselný symbol a v normě je uvedeno jejich názvosloví v českém, anglickém, francouzském a německém jazyce. Číselné označení je třímístné a každá číslice má přiřazen určitý význam:

Metoda svařování $X_1 X_2 X_3$

X_1	základní způsob svařování
X_2	metoda svařování
X_3	upřesnění metody svařování

Základní způsob svařování:

- 1 obloukové svařování
- 2 odporové svařování
- 3 plamenové svařování
- 4 tlakové svařování
- 7 ostatní způsoby svařování
- 9 pájení

Některé příklady označování obloukových metod svařování:

- 11 obloukové svařování tavící se elektrodou bez ochranného plynu
- 111 ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
- 114 obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu (svařování MOG)
- 12 svařování pod tavidlem
- 121 svařování pod tavidlem drátovou elektrodou
- 122 svařování pod tavidlem páskovou elektrodou
- 13 obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu
- 131 obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (svařování MIG)
- 135 obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (svařování MAG)
- 136 obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu
- 137 obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu
- 14 obloukové svařování wolframovou elektrodou v ochranném plynu
- 141 obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (svařování TIG,WIG)
- 15 plazmové svařování
- 151 plazmové MIG svařování
- 18 ostatní metody svařování
- 181 svařování magneticky ovládaným obloukem

Některé příklady označování metod svařování odporem:

- 21 bodové svařování
- 22 švové svařování
- 23 výstupkové svařování
- 24 odtavovací stykové svařování
- 25 stlačovací stykové svařování
- 29 ostatní způsoby svařování

Některé příklady označování svařování plamenového:

- 31 plamenové svařování s kyslíkem
- 311 kyslíko-acetylenové svařování
- 312 kyslíko-propanové svařování
- 313 kyslíko-vodíkové svařování
- 32 plamenové svařování se vzduchem
- 321 vzducho-acetylenové svařování

Některé příklady svařování tlakového:

- 41 ultrazvukové svařování
- 42 třecí svařování
- 43 kovářské svařování
- 44 svařování velkou mechanickou energií
- 441 svařování výbuchem
- 45 difuzní svařování
- 47 tlakové svařování s plamenovým ohřevem
- 48 tlakové svařování za studena

Některé příklady označování ostatních způsobů svařování:

- 71 aluminotermické svařování
- 72 elektrostruskové svařování
- 73 elektroplynové svařování
- 74 indukční svařování

- 75 svařování světelným zářením
- 751 laserové svařování
- 76 elektronové svařování
- 77 svařování rázem
- 78 přivařování svorníků
- 781 obloukové přivařování svorníků
- 782 odporové přivařování svorníků

Některé příklady označování pájení:

- 91 tvrdé pájení
- 912 plamenové tvrdé pájení
- 913 tvrdé pájení v peci
- 92 třecí pájení
- 923 třecí tvrdé pájení
- 93 ostatní způsoby tvrdého pájení
- 94 měkké pájení
- 942 plamenové měkké pájení
- 943 měkké pájení v peci

Literatura

ČSN EN 22553: Svarové a pájené spoje - Označování na výkresech.

ČSN EN ISO 6947: Svařování - Pracovní polohy - Definice úhlů sklonu a otočení.

ČSN EN 24063: Svařování, tvrdé a měkké pájení kovů, pájení do úkosu. Přehled metod a jejich číslování pro zobrazení na výkresech.

4. POSTUPY SVAŘOVÁNÍ, PŘÍPRAVA SVAROVÝCH PLOCH

4.1 Specifikace svařovacího postupu – WPS

V systémech řízení jakosti je na svařování, jak již bylo řečeno, pohlíženo jako na speciální metodu. Normy pro systém řízení jakosti obvykle požadují u speciálních metod provádění podle písemně zpracovaných a odsouhlasených postupů. Specifikace postupů svařování je základem pro přesné stanovení svářečských a kontrolních operací v průběhu svařování.

Vypracování písemných postupů svařování je základním předpokladem, nikoliv však zárukou splnění požadavků. Některé odchylky, především vady a deformace mohou být posouzeny až na základě nedestruktivních zkoušek hotového výrobku. Velmi problémovou skupinu tvoří metalurgické odchylky, protože při současné úrovni nedestruktivních zkoušek není možné na jejich základě provést posouzení mechanických vlastností. To vedlo k vytvoření souboru pravidel pro schvalování postupů svařování před jejich použitím pro danou výrobu.

Požadavky na systém jakosti při výrobě zařízení zahrnuje všechny oblasti a stadia výroby svarů. Rozsah požadavků závisí na náročnosti výroby, důležitosti vyráběných zařízení a možných následcích při poruše během provozu. Dále pak na základě požadavků výrobních norem (např. ČSN 69 0010, ČSN 13 0021) musí mít firma pro výrobu a opravy svařovaných částí vyhrazených zařízení, předem zpracované a schválené postupy svařování - WPS. Evropský normalizační systém pro stanovení a schvalování postupů svařování představuje soubor norem řady ČSN EN 288 "Stanovení a schvalování postupů svařování kovových materiálů". Předpokládá se, že svařování ve výrobě bude prováděno svářeči s oprávněním podle odpovídajících částí ČSN EN 287, resp. ČSN EN ISO 9606. Tato norma platí pro výrobu běžnými svařovacími zařízeními s přímým ovládním svářeči a nemusí postačovat pro automatové metody svařování nebo robotizované svařování. Normy lze využít především v okamžiku, kdy je požadováno schválení postupu svařování, např. smlouvou, normou, předpisy nebo právními požadavky. Dále tato norma určuje několik způsobů schvalování postupů svařování. Proces tvorby a schvalování těchto postupů se řídí souborem norem ČSN EN 288 - 1 až 8.

Vypracovaný a schválený postup svařování - WPS je nedílnou součástí technologického postupu na provedení svářečské operace. Svářeč provádí předepsané svářečské práce podle požadavků, uvedených v technologickém postupu a stanovených parametrů ve WPS.

Požadavky na obsah „Specifikace svařovacího postupu - WPS (Welding procedure specification)“ stanovuje norma ČSN EN 288-2:1995/A1:1998. Tento postup svařování se zpracovává ve formě přehledného formuláře, ve kterém jsou uvedeny všechny podstatné údaje o svařování (dále v textu jen postup svařování nebo WPS). Normalizované údaje uvedené ve formuláři jsou vhodné pro převážnou část svařovacích postupů.

Svářečské proměnné uvedené v této normě jsou veličinami, ovlivňujícími metalurgické a mechanické vlastnosti a geometrii svarového spoje. Zpracovaná WPS platí např. pro určitý rozsah tloušťky spojovaných částí a základních a přídavných materiálů.

Ve specifických případech je možné uvedené údaje ve formuláři doplnit o nové informace a to formou doplňujícího textu nebo odkazem na příslušnou instrukci. Nejsou-li ve formuláři WPS uvedeny příslušné údaje o protokolárním schválení tohoto svařovacího postupu, je třeba tento dokument pokládat za předběžný postup svařování - pWPS.

Zkoušení a schvalování postupu svařování lze provádět jedním ze způsobů uvedených v normě ČSN EN 288 - 3 až 8. Výchozí normou pro schvalování postupů svařování kovových materiálů je norma ČSN EN 288 - 3:1995/A1:1998, která definuje požadavky na provedení zkoušky, její odzkoušení a schválení. Schválení požadovaného postupu svařování se provádí na základě:

- zpracovaného návrhu předběžného postupu svařování - pWPS,
- zhotovení a svaření zkoušky podle vypracovaného návrhu pWPS,
- prohlídky a vyzkoušení svařené zkoušky v předepsaném rozsahu touto normou,
- provedení schválení výsledků této zkoušky ve vztahu k materiálu (jakosti, polotovaru, tloušťky) a procesu svařování (použité metody a polohy svařování, přídavného materiálu a parametrů svařování, předehřevu a tepelného zpracování po svaření) s následným vystavením protokolu o schválení postupu svařování - WPAR (Welding procedure approval - Record).

V případě, že provedená zkouška nevyhoví předepsaným požadavkům lze svařit opakovací zkušební kus, který se podrobí stejným zkouškám. Nevyhoví-li při destruktivních zkouškách některý zkušební vzorek (tyč, kus), odeberou se za vadný vzorek dva nové kusy a vyzkouší se podle původního požadavku. Náhradní vzorky se mohou odebrat z původního (stejného) kusu nebo z nově svařené a nedestruktivně odzkoušeného zkušební kus. Nevyhoví-li nový zkušební kus nebo náhradní vzorky požadavkům opakovací zkoušky, pokládá se provedená zkouška podle navržené pWPS za nevyhovující.

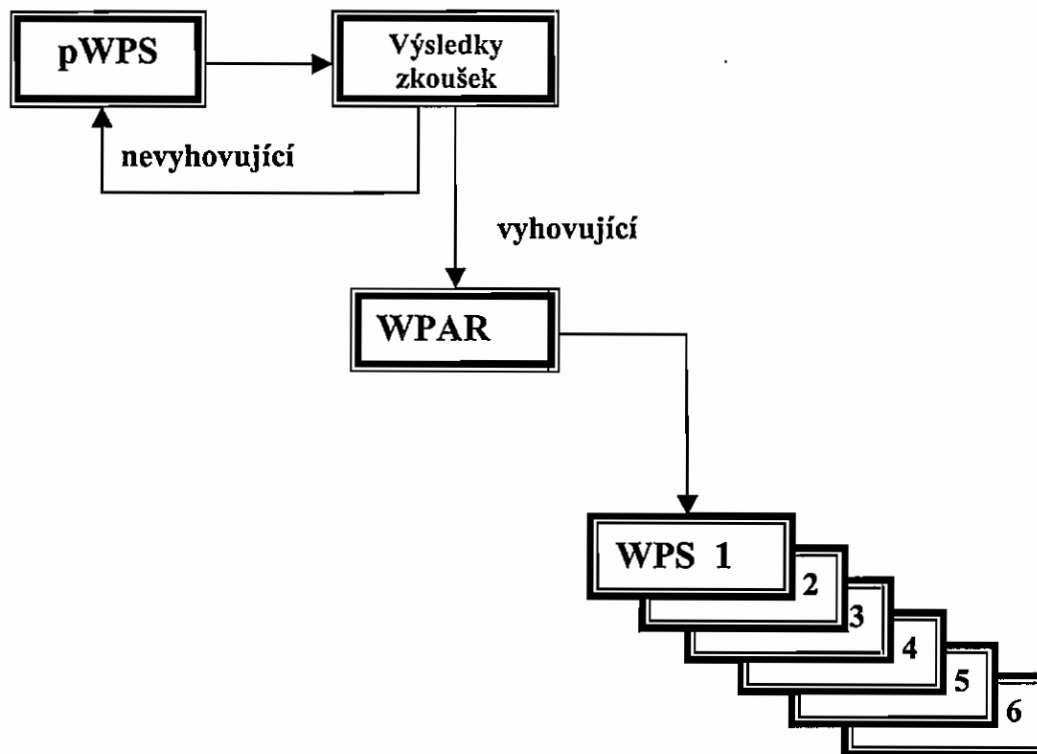
Z důvodu provádění jen nezbytného množství zkoušek postupů svařování jsou v normě oceli uspořádány do jedenácti skupin, a to podle jejich chemického složení a technologických vlastností.

Zkouška postupu svařování provedená na konkrétní oceli platí též pro další oceli v příslušné materiálové skupině, které mají obdobné vlastnosti. Samostatnou zkoušku postupu svařování je nutno provést pro každou ocel nebo svařovanou kombinaci ocelí, která není v souladu s rozsahem ocelí materiálové skupiny uznaným touto normou.

Protokol WPAR je zpracován formou normalizovaného formuláře, který obsahuje v úvodní části (na prvním listě) potřebné informace o uznání nebo zamítnutí provedené zkoušky. V druhé části je uveden postup svařování, který obsahuje předepsané údaje použité při svařování zkušební kus. Závěrečná třetí část tohoto dokumentu obsahuje přehled dosažených výsledků z provedených nedestruktivních a destruktivních zkoušek na zkoušeném kusu. Přílohou zpracovaného protokolu WPAR jsou i příslušné dílčí protokoly z provedených zkoušek.

Pokud nebyly nalezeny žádné vady nebo nevyhovující výsledky zkoušek, je „Protokol o schválení postupu svařování - WPAR“ (dále v textu jen Protokol o schválení postupu svařování - WPAR nebo jen WPAR) s uvedenými výsledky zkoušek schválen a potvrzen datovaným podpisem zkušební orgánu nebo zkušební organizace.

Příslušný zkušební orgán nebo zkušební organizace je zpravidla stanoven v požadavcích smlouvy nebo výrobkové normy. Na obr. 4.1 je schematicky znázorněn postup při vytváření výrobních svařovacích postupů.



Obr. 4.1 Svařovací postupy pro výrobu

Schválení postupu svařování je možné také získat:

- **na základě schválených přídavných materiálů.** Některé základní materiály nezhorší významně svoje vlastnosti v tepelně ovlivněné oblasti za předpokladu, že vnesené teplo zůstává v určitých mezích. Pro tyto materiály lze postupy svařování schválit na základě, že jsou schváleny přídavné materiály i všechny základní proměnné v rámci příslušného rozsahu platnosti, s omezením na obloukové svařování s použitím přídavných materiálů. Za všechny činnosti související se svařováním, zkoušením a dohledem nad zkušebním kusem, odpovídá zkušební orgán nebo technická dozorcí organizace, kteří musí stanovit přípustný rozsah platnosti s ohledem na základní proměnné pro schválené přídavné materiály.

ČSN EN 288-5 Část 5: Schvalování na základě schválených přídavných materiálů pro obloukové svařování

Norma zjednodušuje schvalování postupů svařování pro opakované operace. Předpokládá použití základních materiálů, u nichž nevznikají nepřipustné mikrostruktury a u nichž vlastnosti v tepelně ovlivněné oblasti neomezují zásadně jejich funkci. Tuto normu nelze použít, pokud jsou stanoveny požadavky na tvrdost nebo vrubovou houževnatost, přehřev, vnesené teplo, interpass teplotu a následné tepelné zpracování.

Schvalování postupů svařování musí být provedeno nezávislým zkušebním orgánem. Základními dokumenty při schvalování jsou:

- specifikace základních materiálů,
- protokol o schválených přídavných materiálech pro svařování,
- pWPS vhodná pro dané použití.

Schválení WPS udělené výrobci platí pro svařování v dílnách nebo na montážích, a to při stejné technické a kvalitativní kontrole tohoto výrobce.

Tato norma je vhodná pro určité skupiny materiálů při splnění níže uvedených podmínek:

- norma výrobku nebo kontrakt nestanovuje požadavky na zkoušku rázem, v ohybu nebo na tvrdost v tepelně ovlivněné zóně,
 - svařováním nebudou ovlivněny jiné mechanické vlastnosti (např. mez kluzu R_e), odolnost proti korozi a jiné podstatné vlastnosti materiálu v TOO,
 - kombinace základních a svařovacích materiálů musí být voleny tak, aby byla dosažena shoda mezi vlastnostmi svarového spoje a čistého svarového kovu.
- **na základě předchozích svářečských zkušeností.** Výrobce může získat schválení postupu svařování na základě předchozích svářečských zkušeností v případě, že se může prokázat skutečnými a ověřenými podklady, že již dříve takové spoje a materiály úspěšně svařoval. Rozsah platnosti v tomto případě je omezen na normalizované materiály, metody svařování a na rozsah základních proměnných, které mohou být doloženy příslušnými doklady o výrobní kvalitě a zkušenosti.

ČSN EN 288-6 Část 6: Schvalování na základě předchozích zkušeností.

Výrobci, kteří mají velkou zkušenost s výrobou svařovaných konstrukcí a mají tuto zkušenost náležitě zdokumentovanou, mohou si nechat schválit nezávislým orgánem podle této normy postupy svařování. Hlavními dokumenty při schvalování postupu svařování jsou:

- pWPS,
- dokumentace o předchozí zkušenosti.

Prokazování předchozí zkušenosti se provádí na základě dokumentovaných kontrol, a to buď údaji o zkouškách s přehledem předchozí svářečské výroby nebo o vyhovujícím výrobním provozu. Musí obsahovat v každém případě uspokojivou dokumentaci o zkouškách (destruktivních, nedestruktivních, tlakových, těsnosti apod.) a přehled výroby, při níž bylo použito svařování (za dobu min. 1rok) nebo prokazování vlastností svarových spojů v provozu během 5 let, pokud není normou výrobku nebo dohodou mezi smluvními stranami stanoveno jinak.

Výrobce může získat schválení WPS pouze v případě, že je schopen se prokázat skutečnými a ověřenými podklady, že dříve takové spoje a materiály úspěšně svařoval. Rozsah schválené WPS je omezen na normalizované materiály, metody svařování a na rozsah základních proměnných, které mohou být dokumentovány na základě předchozích zkušeností.

- **na základě normalizovaných postupů svařování.** Postupy svařování připravené výrobcem, jsou schváleny za předpokladu, že všechny proměnné jsou v příslušném rozsahu normalizovaného postupu svařování, který musí být připraven a schválen zkušebním orgánem nebo technickou dozorcí organizací. Ti ověří vypracování předběžného postupu svařování, svaření a zkoušení zkušebních kusů a schvalují definitivní

postup svařování v souladu s požadavky normy pro tento postup svařování. Zvláštní pozornost musí být věnována správnému stanovení základních proměnných, aby schválený postup svařování nebyl závislý na zvláštnostech svařovacího zařízení nebo dalších zvláštních podmínkách během svařování zkušebních kusů. Po schválení zkušebním orgánem nebo technickou dozorcí organizací stává se tento definitivní postup svařování normalizovaným postupem, použitelným pro každého výrobce.

ČSN EN 288-7 Část 7: Schvalování na základě normalizovaných způsobů svařování

Použití normalizovaného postupu svařování může být omezeno normou výrobku nebo v kontraktu. Schválení svařovacího postupu vychází z pWPS, kde je stanoven rozsah všech proměnných veličin, provádí jej nezávislý zkušební orgán. Prohlídky a zkoušky musí být prováděny podle části ČSN EN 288 pro zkoušku postupu svařování. Změny mimo rozsah schválené normy zkoušky postupu svařování vyžadují nové schválení WPS. Normalizovaný postup svařování platí pro tloušťky základního materiálu 3 až 40 mm, pro koutové svary nad 3 mm, trubky a trubkové odbočky s větším průměrem nad 25 mm.

Normalizovaný postup může být bez dalších zkoušek použit pouze při splnění těchto požadavků a omezení:

- uživatel normalizovaného postupu je odpovědný za výběr a použití postupu,
- použití tohoto postupu vyžaduje ustavení svářečského dozoru podle ČSN EN 719,
- uživatel postupu svařování musí splnit požadavky na jakost při svařování podle ČSN EN 729,
- normalizovaný postup je schválen do výroby společně se svařovacími zdroji a zařízeními, u nichž elektrické a mechanické vlastnosti dosahují ověřených hodnot, které byly zjištěny při zkoušce svaru pro schválení normalizovaného postupu,
- normalizovaný postup svařování mohou používat pouze svářeči, kteří jsou kvalifikováni podle ČSN EN 287,
- při svařování musí být dodrženy stanovené podmínky pro prostředí (teplota, vlhkost, tlak apod.).

Normalizovaný postup zůstává v platnosti po dobu, pokud smlouva nestanoví jinak. Uživatel musí tento postup udržovat v evidenci po celou dobu jeho užívání.

- **na základě předvýrobní zkoušky.** Toto schválení postupu svařování může být použito v případech, kdy tvar a rozměry požadovaných kusů neodpovídají spoji, který má být svařen. V takových případech musí být vyroben jeden nebo více zkušebních kusů, které napodobují požadované konečné svarové spoje ve všech základních charakteristikách (rozměrech, pnutí, vlivu ochlazování apod.). Zkouška musí být provedena před zahájením výroby a za podmínek reprodukovatelných ve výrobě. Tento postup musí být schválen zkušebním orgánem nebo technickou dozorcí organizací.

ČSN EN 288-8 Část 8: Schvalování na základě zkoušky před začátkem výroby

Tohoto způsobu schvalování WPS se používá v případě, kdy tvar a rozměry normalizovaných zkušebních kusů dostatečně nepředstavují výrobní spoj. V těchto případech může být vyroben jeden nebo více zvláštních zkušebních kusů, které napodobují předpokládaný výrobní spoj ve všech podstatných znacích, např. rozměry, namáhání, odvod tepla, omezený přístup apod. Norma stanoví podmínky pro schvalování postupu svařování a udává rozsah i dobu platnosti. Používá se pro tavné svařování kovových materiálů, na základě smluvních stran může být schváleno použití normy i pro jiné metody svařování.

Použití normy je omezeno normou výrobku nebo požadavky dohodnutými při kontraktu. Schválení postupu vychází z pWPS, kde musí být stanoven rozsah všech základních proměnných a provádí jej nezávislý zkušební orgán v souladu s odpovídající normou nebo dohodou. Příprava a svařování zkušebních kusů pro předvýrobní zkoušku musí být provedeny za obvyklých výrobních podmínek. Tvar i rozměr zkušebních kusů musí odpovídat skutečným podmínkám při svařování výrobních dílů, včetně poloh svařování, omezené přístupnosti, použitých přípravků apod.

Při schvalování postupu svařování musí být provedeny minimálně tyto zkoušky: vizuální kontrola (100 %), kontrola povrchových trhlin, zkouška tvrdosti a zkouška makrostruktury. Schválení postupu podle této normy je omezeno na druh svarového spoje, který byl použit při předvýrobní zkoušce. Rozsah platnosti se může vztahovat jak na tloušťku každého z dílů spoje, tak i na velikost svaru. Schválená WPS platí pro svařování v dílnách nebo na montážích, a to po zajištění stejného technického i kvalitativního dozoru bez omezení, pokud není ve smlouvě stanoveno jinak.

4.2 Směrnice pro určování stupňů jakosti

K vytvoření společné základny pro srovnatelné vyhodnocování tavných svarových spojů, a tím i požadavků na svarové spoje, jako spojovací prvky jakož i na provádějící výrobní závody, bylo zapotřebí v zájmu nalezení koncenzu určitých kompromisů, které nemohly zahrnout každý jednotlivý případ. Byla vytvořena norma, která byla zavedena i u nás jako **ČSN EN 25817 "Svarové spoje ocelí zhotovené obloukovým svařováním - Směrnice pro určování stupňů jakosti"**. Tato norma slouží jako podklad pro vytváření pravidel nebo norem a může být využita jako podklad při sestavování systému jakosti a požadavků na vyhovující svarové spoje.

Podle této normy jsou určeny tři stupně jakosti, které se přiřazují svarovým spojům podle jejich provozního použití. Určujícími faktory mohou být např. namáhání, pracovní teplota, prostředí, ve kterém svarový spoj pracuje apod. Stupně jakosti pro jednotlivé případy mohou být stanoveny buď v normě výrobků nebo ve výkresové dokumentaci odpovědným konstruktérem, společně se svářečským dozorem, výrobcem, uživatelem event. jiným zainteresovaným partnerem. Stupeň jakosti musí být určen před zahájením výroby, zejména ve stadiu nabídky a poptávky a musí být předmětem kvalitativního požadavku smlouvy. Ve zvláštních případech mohou být požadovány doplňující údaje.

Stupně jakosti stanovené v této normě určují základní doporučené údaje, nespécifikují však žádné podrobnosti pro použití. Vztahují se na druhy svarových spojů, nikoliv však na celý výrobek nebo na jeho část. Proto je možné podle této normy předepsat po jednotlivé svarové spoje na jednom výrobku různé stupně jakosti.

Norma rozlišuje tři stupně jakosti:

"B" - vysoký stupeň jakosti

"C" - střední stupeň jakosti

"D" - nízký stupeň jakosti

Toto označení stupňů jakosti umožňuje rozšířit praktické využití.

Při volbě stupňů jakosti pro předepsané použití musí být zohledněn typ konstrukce, navazující technologické operace (např. opracování vnějšího povrchu výrobku), druhy

namáhání (statické, dynamické), pracovní podmínky (např. teplota okolí, pracovní teplota) a důsledky vad. Důležitá je i hospodárnost výroby (náklady na svařování, kontrolu, zkoušky a opravy svarů).

Vhodnost výrobku pro dané použití je dána tím, že uspokojivě (spolehlivě, bezpečně) plní svou funkci po dobu jeho předepsané životnosti. Výrobek může degradovat svoje vlastnosti, ale nesmí dojít následkem vady k porušení. Při výrobě se předpokládá, že skutečné podmínky během provozu výrobku souhlasí s podmínkami danými v projektu (provozní dokumentaci), včetně známého kolísání, např. provozního zatěžování. Nesprávné provozování a přetěžování výrobku je dle provozní dokumentace nepřipustné, neboť kvalita svarového spoje je limitována dovoleným (předepsaným) provozováním (pracovními podmínkami).

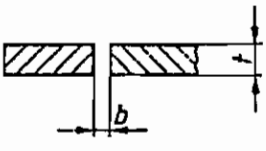
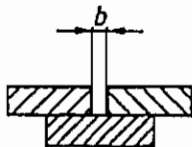
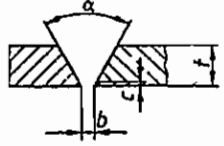
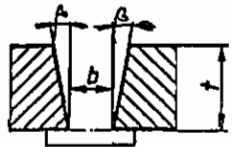

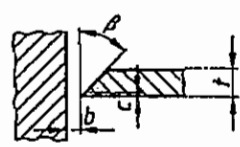
4.3 Příprava svarových ploch

Charakteristické hodnoty pro přípravu svarových ploch a soubor jejich osvědčených tvarů a rozměry pro ruční obloukové svařování, svařování v ochranných plynech a plamenové svařování pro všechny druhy ocelí jsou uvedeny v mezinárodní normě ČSN EN 29692 „Ruční obloukové svařování, svařování v ochranných plynech a plamenové svařování – Příprava svarových ploch pro svařování ocelí“. Tato norma byla vytvořena na základě dlouholetých zkušeností a obsahuje rozměry svarových úkosů, které zpravidla vytvářejí nejpříznivější podmínky pro svařování. Vzhledem k rozsahu použití mají konkrétní číselnou hodnotu pouze mezní rozměry.

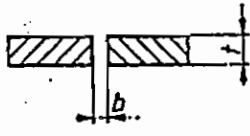
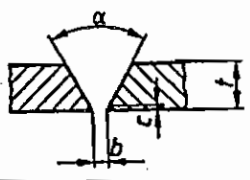
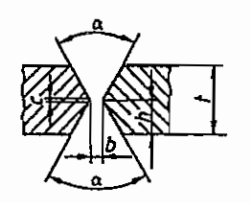
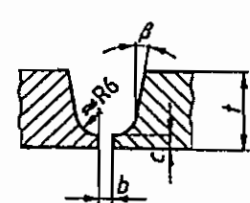
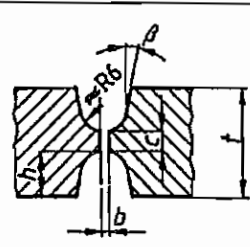
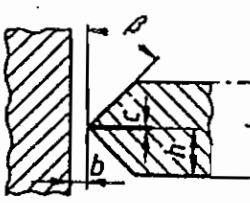
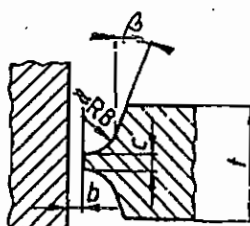
Tato norma je doporučením a pro různé oblasti výroby (potrubí, některé svařované konstrukce), mohou být vytvořeny zvláštní normy. Norma platí, až na malé výjimky, pro plně provařené tupé spoje, koutové a rohové spoje. V případě, že tupý svar není možné provést, je nutná zvláštní dohoda.

Pro svary s neúplným průvarem mohou být použity svarové plochy, které tato norma neuvádí. V tabulce 4.1 jsou uvedeny některé charakteristické tvary svarových ploch pro tupé jednostranné svary, v tabulce 4.2 pro oboustranné tupé svary a v tabulce 4.3 pro koutové a rohové svary.

Tabulka 4.1

tloušťka materiálu	Značka svaru	Řez	Úhel α, β	Mezera b	Otupení c	Výška úkosu h	Doporučená metoda svařování
$t \leq 4$	II		-	t	-	-	311 111 141
$3 < t \leq 8$			-	6 až 8	-	-	131 135 141
$3 \leq t \leq 10$	V		40° až 60°	4	2	-	111 131 135 141
$t > 16$	\sphericalangle		5° až 20°	5 až 15	-	-	111 131 135
$t > 12$	U		8° až 12°	1 až 4	3	-	111 131 135 141
$3 < t \leq 10$	\sphericalangle		35° až 60°	2 až 4	1 až 2	-	111 131 135 141

Tabulka 4.2

Tloušťka materiálu	Značka svaru	Řez	Úhel α, β	Mezera b	Otupení c	Výška úkosu h	Doporučená metoda svařování
$t \leq 8$	II		-	$t/2$	-	-	111 141
			-	$t/2$	-	-	131 135
$3 \leq t \leq 40$	VD		60°	3	2	-	111 141
			40° až 60°				131 135
$t > 10$	X		60°	1 až 4	2	$= t/2$	111 141
			40° až 60°				131 135
$t > 12$	UD		8° až 12°	1 až 3	5	-	111 131 135 141
$t \geq 30$	UD		8° až 12°	3	3	$\frac{1}{2}(t-c)$	111 131 135 141
$t > 10$	K		35° až 60°	1 až 4	2	$\frac{1}{2}t$ nebo t	111 131 135 141
$t > 30$	K		10° až 20°	3	2	-	111 131 135 141

Tabulka 4.3

Tloušťka materiálu	Značka svaru	Řez	Úhel α, β	Mezera b	Doporučená metoda svařování
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	△		70° až 100°	2	311 111 131 135 141
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$			-	2	
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$			60° až 120°	2	
$2 \leq t_1 \leq 4$ $2 \leq t_2 \leq 4$	▷		-	2	
$t_1 > 4$ $t_2 > 4$			-	-	

Literatura

BARTÁK, J.: Odborná způsobilost pro svařování z pohledu českých a evropských norem.

Seminář: „Evropské normy v technické praxi ČR“. Znojmo, říjen 2000.

BARTÁK, J.: Svařované konstrukce a evropské normy. Seminář EDUKA, Praha, 27. únor 2001.

ČSN EN 288: Stanovení a schvalování postupů svařování kovových materiálů.

ČSN EN 29692: Ruční obloukové svařování, svařování v ochranných plynech a plamenové svařování – Příprava svarových ploch pro svařování ocelí.

5. VÝROBNÍ ZAŘÍZENÍ A UPÍNACÍ PŘÍPRAVKY

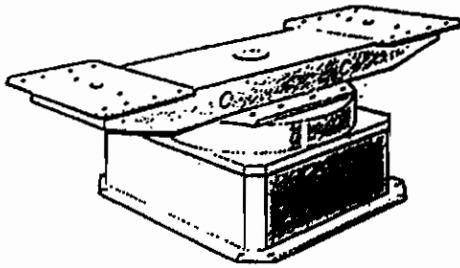
5.1 Výrobní zařízení

Nezbytným doplňkem svařovacích pracovišť jsou výrobní zařízení, umožňující polohování svarků, jejich ohřev, případně odsávání vzniklých zplodin.

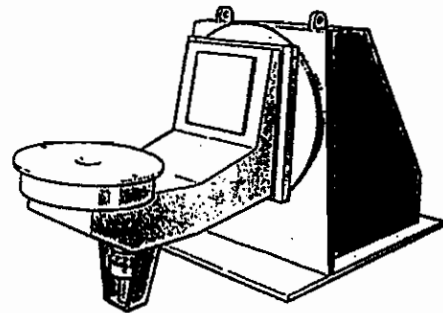
5.1.1 Polohovadla a manipulátory

Automatizace svařovacích procesů vyžaduje další pomocná zařízení. Patří sem především polohovadla, která slouží pro nastavení svarku do polohy potřebné pro svařování. Pro volbu typu polohovadla je rozhodující rozměr svarku, jeho hmotnost, počet a velikost svarů, technologie svařování a počet svařovaných kusů.

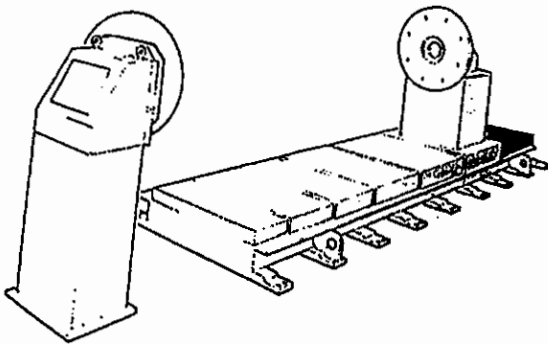
Podle konstrukce a použití máme polohovadla stolová ruční nebo strojní (obr. 5.1), polohovadla naklápěcí (obr. 5.2), polohovadla desková (obr. 5.3) a polohovadla kladková (obr. 5.4). Pohon polohovadel může být ruční nebo strojní (elektromotorem, hydraulický) s konstantními nebo nastavitelnými otáčkami.



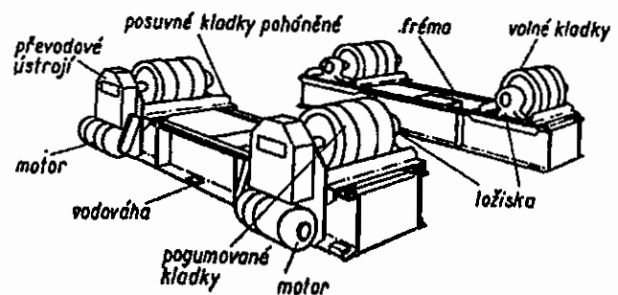
Obr. 5.1 Polohovadlo stolové



Obr. 5.2 Polohovadlo naklápěcí



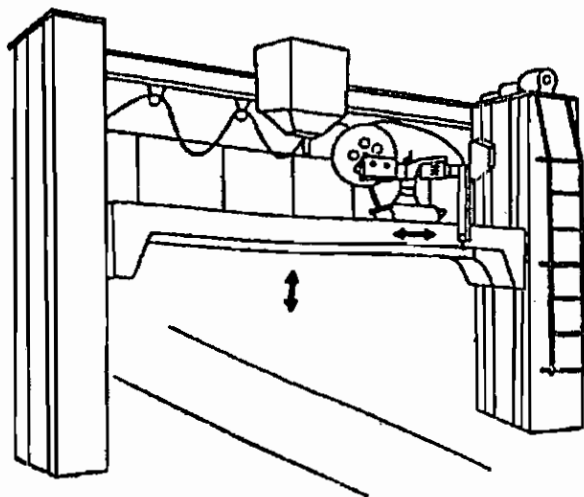
Obr. 5.3 Polohovadlo deskové



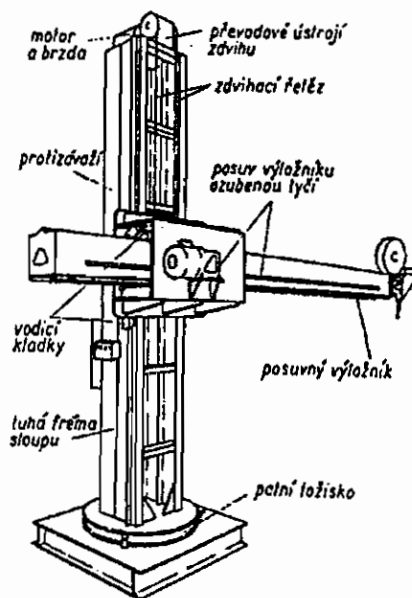
Obr. 5.4 Polohovadlo kladkové

Pro upevnění, případně pojezd svařovacích jednotek slouží manipulátory. Ty mohou být mostové, portálové (obr. 5.5), sloupové a výložníkové (obr. 5.6). Používají se především

pro automatické svařování podélných a příčných spojů válcových nádob a nosníků převážně doplněné polohovadly.



Obr. 5.5 Polohovadlo mostové



Obr. 5.6 Polohovadlo výložníkové

5.1.2 Zařízení pro předehřev

Při svařování některých materiálů je vyžadován předehřev, případně dohřev. K tomuto účelu slouží zařízení, která můžeme rozdělit:

podle použité energie:

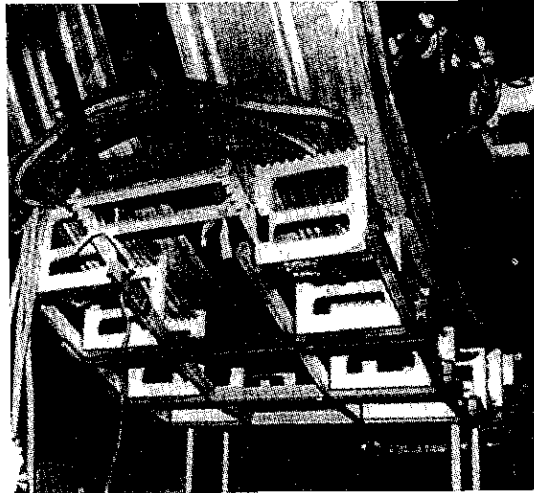
- ohřev pomocí plynových hořáků,
- elektrický odporový ohřev,
- indukční ohřev

podle způsobu použití:

- ohřev v peci,
- ohřev na místě svařování,

podle tvaru a zařízení pro předehřev:

- elektrickými rohožemi
- odporovými pásy,
- odporovými řetězy,
- vinutými induktory,
- tvarovými induktory (obr. 5.7).



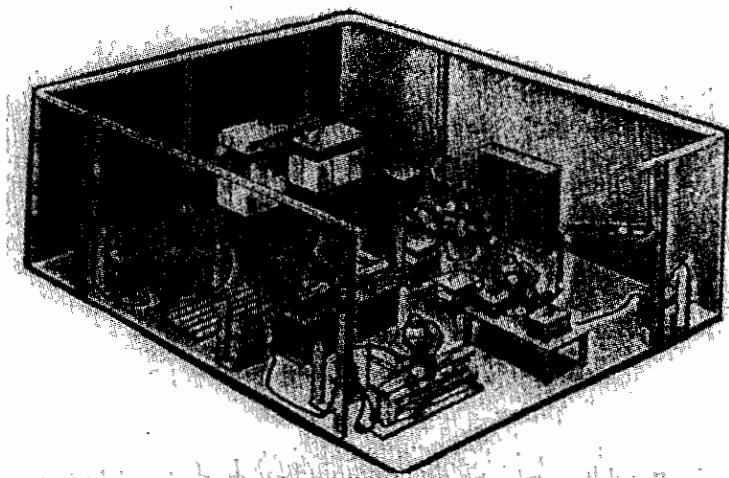
Obr. 5.7 Tvarový induktor

5.1.3 Odsávací zařízení

Při procesech svařování vznikají plyny, dýmy, aerosoly a tuhé složky, které mohou pronikat do dýchacího ústrojí a ohrožovat lidské zdraví. Proto je nutné u všech svařečských prací zajistit odpovídající ochranná opatření, zabezpečující kvalitu ovzduší pod limitními hodnotami nejvyšších přípustných koncentrací, stanovených hygienickými předpisy. Konkrétní složení jednotlivých škodlivin je závislé na technologii svařování, provozních podmínkách, základním a přídavném materiálu. Optimální ochranu vytváří pouze místní odsávání škodlivin v místě jejich vzniku. Toto odsávání je nejefektivnější ochranou ovzduší na svařečském pracovišti a mělo by patřit ke standardnímu vybavení.

Odsávací zařízení mohou být buď místní s odsávacími hubicemi, které mají tvar většinou přizpůsobený vytvářenému svarovému spoji. Bývají otočné, někdy vybavené osvětlením. Jsou upevněny na odsávací ramena, která mohou být v hadicovém nebo trubkovém provedení, připojena k vysávací jednotce. Pro provozy, kde je zapotřebí intenzivního odsávání na více místech se převážně využívají centrální odsávací a filtrační zařízení (obr. 5.8). Škodliviny jsou zachycovány odsávacími hubicemi přímo v místě vzniku a potom potrubním systémem přiváděny k filtračnímu zařízení. Vzduch, který prošel filtračním zařízením a byl zbaven nečistot se buď vrací zpět do pracovního prostoru nebo se vyfukuje do okolní atmosféry.

Důležitou částí odsávacích zařízení jsou filtry, které musí zachytit jak pevné tak plynné částičky. Pro tyto účely se používají filtry pevné, elektrostatické nebo speciální filtrační patrony. Někteří výrobci uvádějí stupeň odlučivosti až 99,9 %.



Obr. 5.8 Centrální odsávací a filtrační zařízení

5.2 Upínací přípravky

Dodržování výrobních tolerancí a zamezení deformací při svařování, snižování únavy svářeče při intenzivním svařování, zvyšování bezpečnosti a produktivity práce při současném snižování výrobních nákladů, lze jen pomocí vhodně volených přípravků. Potřeba svařovacích přípravků stoupá s požadavkem na zvyšování mechanizace a automatizace svařovacích procesů. Konstrukce svářečských přípravků je ve srovnání s jinými přípravky značně odlišná. Při konstrukci svářečských přípravků musíme počítat s tím, že bude během svařování vystaven velkým teplotám, rozstříku svarového kovu, působení tavidel, povede přes něj svařovací proud značné intenzity a v řadě případů bude společně se svarkem žihán.

Svařovací přípravky jsou většinou svařované, pracovní plochy se opracovávají až po svařování. Přípravky pro velké série, případně přípravky, na které jsou kladeny požadavky na dodržení přesných tolerancí se ve většině případů žihají na snížení pnutí. Přípravky pro odporové svařování, kde se používá velkých svařovacích proudů se vyrábějí z nemagnetických, tepelně dobře vodivých materiálů (měď, bronz, někdy slitiny hliníku). Teplo z místa svaru odvádíme měděnými příložkami.

Nejjednoduššími svařovacími přípravky jsou svěrky a upínky. Používají se šroubové svěrky a upínky, které jsou sice univerzální, ale pro svařování nejsou ideální. Větší uplatnění našly rychloupínky, jejich přítlačná síla je vyvinuta ručně, hydraulickým, pneumatickým nebo elektrickým systémem. Velmi často jsou využívány různé další přípravky, např. pro svařování pravoúhlých rámců, plechových hranatých nádrží, válcových nádob a plášťů a různých konstrukcí.

Literatura

BARTÁK, J., KÖNIGSMARK, J.: Mechanizovaná a automatizovaná pracoviště v závodě Energetické strojírenství k.p. ŠKODA, Technika ŠKODA, 1988.
Firemní literatura

6. MĚŘENÍ, REGULACE A ZÁZNAMY PŘI SVAŘOVÁNÍ

6.1 Měření veličin při svařování

Při svařování provádíme měření různých fyzikálních veličin za účelem dodržení kontroly a registrace hodnot daných výrobním postupem, požadavkem kontroly, případně technologie. Měříme především hlavní svařovací parametry, jako jsou svařovací proud, svařovací napětí a rychlost svařování. Dále pak vedlejší parametry, jako např. odpor, výkon, teplota, množství ochranného plynu apod.

Měření svařovacího napětí (V) se provádí univerzálními měřicími přístroji – voltmetry. Přístroje mohou být analogové nebo digitální a připojují se ke spotřebiči paralelně. Měření provádíme buď na primární části, kdy ověřujeme napětí sítě nebo na sekundární části, kdy můžeme měřit napětí naprázdno, pracovní napětí apod.

K měření svařovacího proudu (A) používáme měřicích přístrojů – ampérmetrů, které zapojujeme do série se spotřebičem. Velmi vhodnými přístroji pro měření proudu jsou klešťové ampérmetry, které se nemusí zapojovat do měřeného obvodu. Čelistmi klešťového ampérmetru obemkneme měřený vodič a můžeme přímo odečíst velikost proudu.

Měření rychlosti svařování (m/min) se většinou provádí změřením zavařeného úseku za jednotku času. Mohou být však využívány běžné tachometry nebo cejchované otáčkoměry.

Měření elektrického odporu (Ω) se provádí buď přímo a nebo se spočítá z naměřeného proudu a napětí v daném obvodu ($R = U/I$). Významnou úlohu hraje elektrický odpor při odporovém svařování, kdy se využívá tepla, vznikajícího přechodovým odporem mezi svařovanými díly. Důležitou úlohu také hraje izolační stav svařovacího zařízení. Velikost izolačního odporu je dána normou a měří se při pravidelných revizích každého svařovacího zařízení. Izolační odpor je elektrický odpor mezi kostrou a sekundárním vodičem v zapnutém stavu.

Výkon a příkon (watty [W], voltampéry [V.A]) měříme wattmetry a je vlastně součinem proudu a napětí ($U \times I$). Tuto hodnotu potřebujeme znát jednak pro dimenzování a jistění sítě a dále se využívá při zjišťování vneseného tepla do svarového spoje.

Měření průtoku ochranného plynu (l/min) se provádí nejčastěji průtokoměry, u některých redukčních ventilů pro svařování v ochranných plynech bývá odvozeno od tlaku. Nejpřesnější měření je na výstupu ze svařovací hubice. Průtokoměry jsou cejchovány na jeden plyn, případně určitou směs, a proto je třeba při použití jiného plynu či směsi vypočítat opravný koeficient.

6.2 Měření teploty ($^{\circ}\text{C}$)

Měření teploty se provádí mnoha různými způsoby při využití různých fyzikálních jevů. Měření teploty provádíme jednak při operaci svařování (teplota předehřevu, dohřevu, apod.) a dále pak při tepelném zpracování.

Měření pomocí **termokříd** se využívá pro orientační měření teploty. Dosaženou hodnotu teploty signalizuje buď změna barvy nebo roztavení stopy. Měření je velmi rychlé,

zjistíme pouze dosažení teploty, ale neznáme údaj o případném překročení. Pro každou teplotu musí být zvláštní křída.

Dále používáme různé typy **teploměrů** dotykových i bezdotykových. Klasický *teploměr rtuťový*, využívá tepelné roztažnosti rtuti. *Teploměry odporové*, využívající skutečnosti, že zvětšováním teploty se zvětšuje odpor kovu (např. pro rozsah teplot -200 až $+500$ °C se používá platina, pro rozsah -50 až $+180$ °C měď apod.). Používají se také *termistorové teploměry*, které jsou založeny na teplotní závislosti polovodičových prvků a používají se v rozsahu teplot -60 až $+200$ °C. Pro *bezdotykové měření teplot* se využívá např. infračervené oblasti záření, kdy každý objekt s teplotou nad absolutní nulou emituje energii, která se stoupající teplotou zvyšuje. Dále lze využít optické pyrometry apod.

Velkou skupinu tvoří **termočlánky** (termoelektrické teploměry) využívající bimetalů (dvou nestejných materiálů), kdy při ohřívání jednoho spojeného konce začne tímto termoelektrickým obvodem protékat proud. Termoelektrické napětí je přímo úměrné rozdílu teplot mezi oběma konci bimetalu (měřící – teplý, srovnávací - studený).

Některé typy používaných termočlánků:

- měď / konstantan, rozsah teplot -200 až $+350$ °C,
- chromel / alumel případně niklchrom / nikl, rozsah teplot -200 až $+1250$ °C,
- nikrosil / nisil (NiCrSi / NiSiMg), rozsah teplot -270 až $+1300$ °C,
- železo / konstantan, rozsah teplot 0 až 750 °C,
- platinarhodium / platina (PtRh/Pt), rozsah teplot 0 až $+1450$ °C,
- wolfram/ wolframrhenium (W / WRe), rozsah teplot 0 až 2320 °C.

6.3 Kalibrace a validace

Kalibrace a validace jsou jedním z kroků pro standardizaci dat, užívaných ve svařovacích procesech. *Kalibrací* rozumíme určení velikosti chyby měřícího zařízení, zatím co *validace* je ověření toho, zda zařízení splňuje podmínky stanovené pro jeho provoz v souladu s národními nebo mezinárodními normami a předpisy. Souběžně se stoupajícím počtem akreditovaných systémů jakosti roste i počet požadavků na kalibraci a validaci, aby byly naplněny všechny požadavky na zajištění kvality svarků. Pro dodržování standardizovaných svařovacích postupů a zajištění opakovatelnosti výroby se musí používat svařovací zařízení, zajišťující dostatečně přesné nastavování svařovacích parametrů, popř. měření dalších veličin. Nedílnou součástí těchto postupů je vedení příslušné dokumentace o prováděné kalibraci nebo validaci.

6.4 Monitorování a záznam veličin svařovacího procesu

Výrobní normy, předpisy případně zákazníci požadují zejména u náročnějších svarků záruky, že byly dodrženy požadavky svařovacích postupů (WPS) a vyžadují rovněž dokladování. K těmto účelům slouží monitorování a záznam svařovacího procesu.

Monitorovací systémy svařovacího procesu jsou buď univerzální zařízení, která se připojí ke svařovacímu zařízení, snímají a zapisují požadované veličiny. Takovým univerzálním monitorovacím zařízením je např. monitorovací systém LINWELD v.2.0, který lze vedle dokumentace a dokladovatelnosti svarových spojů využít i pro některé další činnosti. Patří sem např. optimalizace ručního a mechanizovaného svařování z hlediska kvality, produktivity, nákladů apod., využití při výuce svářečského personálu apod.

Druhou možností jsou monitorovací a registrační zařízení, která jsou přímo součástí svařovacího zařízení. Přední výrobci svařovacích zařízení jako jsou ESAB, Migatronic, KEMPPI, Fronius vybavují svá zařízení monitorovacími systémy, které buď přímo nebo pomocí externího PC zaznamenávají okamžité hodnoty proudu, napětí, podávací rychlost drátu apod. s možností nastavení limitů odchylek svařovacích parametrů a jejich případné překročení. Záznamy lze potom využít přímo jako doklad o dodržení svařovacího postupu.

Zavedení těchto monitorovacích systémů nám umožní vedle dokladování průběhu vlastního svařování i vyhodnocení využití daného zařízení, případně zpracování shromážděných dat statisticky a získání tak celé řady nesmírně cenných technických a ekonomických informací.

Literatura

Kolektiv autorů: Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. Učebnice pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. ZEROSS, Ostrava, únor 2000.

Firemní literatura

7. NEDESTRUKTIVNÍ KONTROLA SVARŮ

Úvod

Nedestruktivní zkoušky představují důležitý článek při zajišťování jakosti ve všech etapách výroby a provozní spolehlivosti. Význam nedestruktivní kontroly spočívá v zajištění kvality výrobku, jeho technické způsobilosti a funkční bezpečnosti.

Klasifikaci vad obecně se vyskytujících ve svarových spojích při tavném svařování uvádí norma ČSN ISO 6520 a dále pak norma ČSN EN 25817, kde jsou uvedeny tolerované velikosti vad v souladu s předepsaným stupněm jakosti.

Přípustnost vad ve svarech je obecně stanovena druhem, velikostí a četností vyskytujících se vad v závislosti na typu svaru a způsobu namáhání. Stanovuje ji konstruktér na základě předpokládaného provozního namáhání. Pracovník nedestruktivní kontroly potom pomocí příslušných kontrolních metod ověřuje, zda svar stanoveným kritériím vyhovuje. Pracovník provádějící nedestruktivní kontrolu musí být příslušně kvalifikován podle ČSN EN 473.

Základní nedestruktivní metody používané pro kontrolu jakosti svarů dělíme podle toho, zda identifikujeme vady na povrchu svaru nebo uvnitř svaru. K zjišťování povrchových vad se používají metody:

- vizuální,
- penetrační (kapilární),
- magnetická prášková,

vnitřní vady se zjišťují metodami:

- prozářením,
- ultrazvukem.

7.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola patří mezi nejjednodušší defektoskopické kontroly, která slouží pro zjišťování povrchových defektů a ověřuje splnění podmínek pro další eventuální nedestruktivní kontrolu. Podle přístupnosti kontrolovaného povrchu máme **vizuální kontrolu přímou**, prováděnou pouhým okem nebo při použití jednoduchých optických pomůcek (lupy 3 až 6x zvětšující) nebo **vizuální kontrolu nepřímou**, prováděnou pomocí optických přístrojů (např. endoskop). Provádění vizuální kontroly se řídí normou ČSN EN 970 Nedestruktivní zkoušení svarových spojů – Vizuální zkouška.

7.2 Penetrační (kapilární) zkouška

Tato metoda umožňuje s poměrně velkou citlivostí zjišťovat povrchové vady, které však musí souviset (komunikovat) s povrchem, to značí, že musí být na povrchu otevřené, aby do nich mohla vniknout detekční tekutina. Využívá kapilárních jevů, především smáčivosti a vztlávanosti. Podle použitých detekčních prostředků rozeznáváme:

- **metodu barevné indikace** – přítomnost vady se projeví vznikem kontrastní barevné indikace. Hodnocení se provádí na denním světle,
- **metodu fluorescenční** – vada se projeví světélkující indikací při černém ultrafialovém světle,

- **metodu dvouúčelovou** – použitý penetrant obsahuje fluorescenční látku, která je zároveň barvivem. Může být použita jako barevná i fluorescenční.

K provádění zkoušek se používají penetrační prostředky:

- **penetranty** – detekční kapaliny (barevné, fluorescenční, dvouúčelové),
- **vývojky** – činidla sloužící k vyvolání indikace. Základem je bílý prášek (např. oxid zinečnatý) nejčastěji suspendovaný v těkavém rozpouštědle (aceton). Napomáhá jednak vzlínání detekční kapaliny z vady a zajišťuje lepší viditelnost vady,
- **odmašťovače a čističe** – odmašťovače slouží k odstraňování mastnoty s povrchu před nanášením penetrantu a dosažení dobré smáčivosti, čističe slouží k odstranění přebytečného penetrantu z povrchu. Používají se převážně organická rozpouštědla jako benzín a aceton.

Vlastní zkušební postup má tyto operace:

- **přípravu povrchu** pro zkoušku očištěním, odmaštěním a osušením,
- **nanesení penetrantu** na zkoušený povrch natíráním nebo nastříkáním. Doba penetrace (působení) cca 10 až 15 minut,
- **odstranění přebytku penetrantu** povrchu pomocí čističe a osušení,
- **vyvolání indikace** nanesením vývojky,
- **vyhodnocení indikace.**

Hodnocení indikací je subjektivní a vyžaduje zkušenosti. Provedení kapilárních zkoušek se řídí normami ČSN EN 571-1 Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady a ČSN EN 1289 Nedestruktivní zkoušení svarových spojů – Kapilární zkouška svarových spojů – Hranice přípustnosti

7.3 Metoda magnetická prášková

Magnetická metoda umožňuje zjišťovat povrchové vady nebo vady těsně pod povrchem. Neklade vysoké nároky na přípravu zkoušeného povrchu a jeho čistotu. Určitým omezením je skutečnost, že metodu můžeme využít pouze pro materiály feromagnetické. Nehodí se např. pro vysokolegované oceli austenitické, hliník, měď apod.

Princip metody je založen na zjišťování rozptylu magnetického toku, který vznikne ve zmagnetovaném feromagnetickém materiálu v místě necelistvosti (např. trhлина) nebo náhlé změny magnetických vlastností (např. struska). Na zkoumaný povrch je nanesen prášek (ocelový) rozptýlený ve vhodné kapalině (např. petrolej) nebo suchý. V místě vzniklého rozptylového pole je prášek přitahován a vytváří zřetelnou stopu, která je obrysem vady.

Pro vytvoření magnetického pole je třeba zkoušený předmět zmagnetovat tak, aby směr magnetického pole byl orientován kolmo na předpokládanou necelistvost. Používají se poměrně jednoduché magnetizační přístroje, umožňující magnetování buď pólové (výrobek se vkládá mezi dva póly magnetu) nebo proudové (zkoušeným výrobkem prochází střídavý nebo stejnosměrný proud a využívá se jeho magnetického účinku).

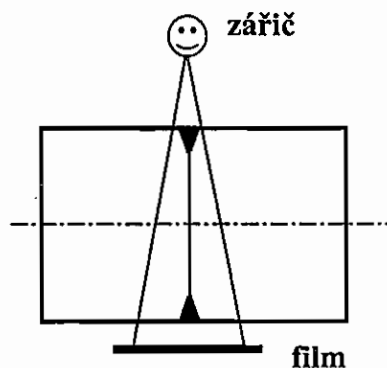
Detekční prášky se vyrábějí z feromagnetického materiálu (oxidy železa, čisté železo). Prášky se používají buď barevné (v původní barvě šedé, černé, červené) nebo fluorescenční (opatřené luminoforem, který světélkuje v ultrafialovém světle).

Provádění magnetických zkoušek se řídí normami ČSN EN 1290 Nedestruktivní zkoušení svarových spojů – Magnetická prášková zkouška svarových spojů a ČSN EN 1291 Nedestruktivní zkoušení svarových spojů - Magnetická prášková zkouška svarových spojů – Stupně přípustnosti.

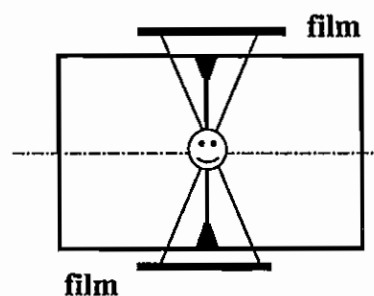
7.4 Metoda prozáření

Jedná se o nejstarší metodu nedestruktivního zkoušení a její princip spočívá v pohlcování ionizačního záření v kontrolovaném výrobku a z následného zviditelnění prošlého záření vhodným detektorem a lze tak stanovit místa ve kterých, se vyskytují vady. V těchto místech je záření pohlcováno méně a na filmu se potom jeví jako tmavší místa. Jako zdroje záření se používají **rentgenové lampy** (záření X – rentgenové), **radioizotopy** (záření gama – iridium, kobalt) nebo **lineární urychlovače** (záření XX - urychlené elektrony). Jako detektor záření se používá radiografický film.

Prozařování můžeme provádět přes jednu stěnu (obr. 7.1) nebo přes dvě stěny (obr. 7.2). Aby byla zajištěna identifikace zkoušky, musí být každá oblast zkoušeného předmětu před ozářením označena značkami (písmena, číslice, symboly). Jasnost radiogramu se kontroluje radiografickými měrkami. Nejčastěji se používají měrky drátkové (ČSN EN 462-1). Výsledkem zkoušky je radiogram, na kterém je pomocí různého zčernání zviditelněn rozdíl pohlcení ionizujícího záření při průchodu kontrolovaným kusem. Při hodnocení se potom určuje druh, velikost, četnost a vzájemná poloha vad zobrazených na radiogramu. Vyhodnocování radiogramů mohou provádět pracovníci s potřebnou kvalifikací.



Obr. 7.2



Obr. 7.1

Ionizující záření je lidskému organismu nebezpečné. Pracoviště pro provádění zkoušek prozářením patří mezi riziková pracoviště a platí pro ně zvláštní hygienické a bezpečnostní předpisy. V současné době platí Atomový zákon č.18/97 Sb. a Vyhláška č. 146/97 Sb., které upravují pracovní podmínky těchto pracovišť. Pracoviště s ionizujícím zářením mohou být stálá, stavebně upravená pro bezpečnou práci a pracoviště přechodná v montážních halách na staveništích apod., kde bezpečnost provozu je zajišťována vymezením ochranného pásma. Provozování těchto pracovišť podléhá schvalování a dozoru Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB).

Provádění zkoušek prozářením se řídí normami ČSN EN 1435 Zkouška svarových spojů prozářením, ČSN EN 12517 Zkouška svarových spojů prozářením – Stupně přípustnosti a ČSN EN 25817 Svarové spoje ocelí zhotovené obloukovým svařováním – Směrnice pro určování stupňů jakosti.

7.5 Metoda ultrazvuková

Zkoušení materiálů ultrazvukem je založeno na principu šíření akustického vlnění zkoušeným předmětem, jeho reakci na změny ve zkoušeném předmětu a následnou registraci. Máme-li ve zkoušeném díle vady (bubliny, póry, vměstky, trhliny), vznikají prostředí s rozdílnými akustickými vlastnostmi a na jejich rozhraní pak dochází k interakci (odraz, částečné pohlcení) ultrazvukového vlnění. Tyto změny se následně zobrazují na obrazovce. Při zkoušce ultrazvukem používáme buď metodu **průchodovou**, kdy základem metody je měření hodnoty ultrazvukové energie, která projde zkoušeným předmětem. Používají se dvě sondy umístěné souose na protilehlých površích, z nichž jedna pracuje jako vysílač a druhá jako přijímač. Vhodné pro zkoušení výrobků menších tloušťek s rovnoběžnými povrchy přístupnými z obou stran. Nebo se používá metoda **odrazová impulzová**, která je nejrozšířenější. Princip metody spočívá ve vysílání krátkého ultrazvukového impulzu, který se odráží od všech rozhraní (vad i povrchů), vrací se zpět do sondy a časový průběh je zobrazován na obrazovce. Výhodou této metody je možnost vysílat i přijímat jednou sondou a lze tedy kontrolovat výrobky přístupné pouze z jedné strany.

Zdroje ultrazvukových impulzů jsou ultrazvukové zkušební sondy, jejichž základním prvkem je elektroakustický měnič. Tyto měniče mění elektrický signál na mechanický a nejčastěji se používají měniče piezoelektrické. Podle druhu vln, které sonda vysílá a přijímá, se dělí sondy na přímé a úhlové. Jako indikátoru se používá obrazovka, na jejímž stínítku se zobrazují vysílané a přijímané impulzy. V okamžiku vysílání se na obrazovce objeví vysílací impulz (počáteční echo) a koncové echo. Mezi nimi jsou potom případná echa signalizující vadu v kontrolovaném výrobku. Vzdálenost mezi počátečním a koncovým echem je přímo úměrná tloušťce základního materiálu.

Ultrazvukovou metodou lze poměrně dobře zjišťovat vnitřní prostorové vady a velmi dobře vady plošné, kolmé k ose ultrazvukového svazku. Ultrazvukem nemůžeme zjišťovat jednotlivé druhy vad a od sebe je rozlišovat (např. trhliny od studených spojů nebo neprůvarů). Vzhledem k charakteru metody, můžeme ji také používat pro měření tloušťek, případně ke zjišťování úbytku tloušťky (eroze nebo koroze u potrubí).

Provádění ultrazvukové kontroly svarových spojů se řídí normami ČSN EN 1712 Ultrazvuková kontrola – Stupně přípustnosti a ČSN EN 1714 Ultrazvuková kontrola – Charakteristika necelistvostí ve svarových spojích.

Literatura

- KOVAŘÍK, R., ČERNÝ F.: Technologie svařování. ZČU, Plzeň 1993.
Kolektiv autorů: Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. Zeross, Ostrava 2000.
ČSN EN 1714: Ultrazvuková kontrola – Charakteristika necelistvostí ve svarových spojích.
ČSN EN 1712: Ultrazvuková kontrola – Stupně přípustnosti.
ČSN EN 1435: Zkouška svarových spojů prozářením.
ČSN EN 12517: Zkouška svarových spojů prozářením – Stupně přípustnosti.
ČSN EN 25817: Svarové spoje ocelí zhotovené obloukovým svařováním – Směrnice pro určování stupňů jakosti.
ČSN EN 1290: Nedestruktivní zkoušení svarových spojů – Magnetická prášková zkouška svarových spojů.

- ČSN EN 1291: Nedestruktivní zkoušení svarových spojů - Magnetická prášková zkouška svarových spojů – Stupně přípustnosti.
- ČSN EN 571-1: Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady.
- ČSN EN 1289: Nedestruktivní zkoušení svarových spojů – Kapilární zkouška svarových spojů – Stupně přípustnosti.
- ČSN EN 970: Nedestruktivní zkoušení svarových spojů – Vizuální zkouška.

8. TYPY VAD, PŘÍČINY JEJICH VZNIKU A HODNOCENÍ

Úvod

Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami případně smluvním vzorkem. Vady výrobku mohou být **zjevné**, které lze zjistit při prohlídce výrobku pouhým okem nebo jednoduchými pomůckami nebo **skryté**, které obvykle zjistíme pomocí přístrojů nebo laboratorními zkouškami. Podle ustanovení příslušných předpisů, mohou být vady přípustné, nepřípustné, opravitelné nebo neopravitelné. Vady přípustné jsou takové, které normy, technické podmínky nebo smluvní vzorek dovolují a jejich odstranění není nutné. Vady nepřípustné jsou takové, které neodpovídají povoleným hodnotám. Tyto vady mohou být opravitelné nebo neopravitelné.

8.1 Typy vad při svařování

Problémy vznikající u všech procesů svařování se převážně týkají necelistvostí. Defekty vyskytující se ve svarových spojích a návarech můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin. Jsou to jednak plošné vady a dále vady objemové. Do první skupiny zařazujeme vady typu trhlin, neprůvarů a studených spojů. Ve druhé skupině jsou především vady typu pórů, bublin, kovových a nekovových vměstků, ale také zápaly, vruby, nedodržení rozměru (hubený kořen, krápníky, převýšený svar, propadlý svar) a nepravidelný povrch svaru.

8.2 Příčiny vzniku vad

Vady typu **trhlin** se mohou vyskytovat jako:

- horké trhliny,
- studené trhliny,
- žihací trhliny,
- lamelární trhliny,
- kráterové trhliny.

Příčinou vzniku horkých trhlin je především chemické složení základního materiálu (vysoký uhlík, mangan a další legury) případně vyšší obsah síry. Vznikají při teplotách mezi 450 až 600 °C (trhliny precipitačního charakteru) nebo pod teplotou T_S – solidu (trhliny likvačního charakteru).

Studené trhliny vznikají především působením difuzního vodíku, také u ocelí s vyšším obsahem uhlíku nebo ocelí legovaných. Vznikají obvykle po zakončení svařování při teplotách pod 300 °C.

Žihací trhliny vznikají buď v nízkotepele oblasti (do 300 °C) v důsledku velkého teplotního gradientu mezi povrchem a středem svarového spoje nebo v oblasti dolních žihacích teplot (500 – 600 °C) především u ocelí na bázi chromu a vanadu.

Lamelární trhliny mohou vznikat jak v základním materiálu, tak v tepelně ovlivněné oblasti především za vysokých teplot, ale šířit se mohou i za studena. Vznikají za spolupůsobení napjatosti v místech, kde jsou u plechů rozválcovány nečistoty typu sírníkových nebo oxidických vměstků.

Kráterové trhliny jsou specifickým druhem horkých trhlín, vznikajících při náhlém a rychlém ukončení svařování. Vznikají v dutině kráteru a jsou zapříčiněny smršťováním při tuhnutí svarového kovu.

Neprůvary jsou defekty vznikající v důsledku neúplného natavení základního materiálu nebo přilehlých svarových housenek. Nejčastěji se objevují při svařování MIG/MAG při zkratovém procesu. Mezi hlavní příčiny patří především vysoká svařovací rychlost, nízký svařovací proud, nevhodná příprava svarových úkosů, předběhnutí svarové lázně, příliš vysoká housenka nebo velký průměr obalené elektrody.

Studené spoje jsou zapříčiněny nedokonalým tavným spojením svarového kovu se základním materiálem nebo navařenou housenkou. Mezi hlavní příčiny patří nízký svařovací proud, nesprávné vedení elektrody, velká rychlost svařování případně nevhodně volený průměr elektrody (malý).

Póry a bubliny jsou objemové vady kulovitého nebo protáhlého tvaru, vyplněné plynem. Příčinou vzniku může být špatně vysušená elektroda, vlhkost v plynu, nečistoty na svarových hranách, příliš dlouhý oblouk, vysoká rychlost svařování nebo rychlé tuhnutí lázně v důsledku nízkého svařovacího proudu a vysoké rychlosti svařování.

Vměstky neboli inkluze mohou být různého typu. Především jsou to struskové vměstky, které vznikají především nedokonalým odstraňováním strusky mezi jednotlivými svařovanými vrstvami, když struska předbíhá oblouk nebo je špatně položena svarová housenka. Oxidické vměstky vznikají především v důsledku nedokonalého čištění povrchu. Vyskytují se především u oxidů hliníku a hořčíku (mají vysoký bod tání). Kovové vměstky (především wolframové) vznikají v důsledku vysokých proudů, dotyku elektrody s tavnou lázní nebo porušením plynové ochrany.

Zápaly jsou ostrá natavená prohloubení na hranicích svarové housenky a základního materiálu. Častěji se vyskytují u koutových svarů. Mezi hlavní příčiny patří příliš velký svařovací proud, dlouhý oblouk, nevhodný průměr elektrody případně její špatné vedení.

8.3 Hodnocení vad

Pro hodnocení přípustnosti určitého typu vady se vychází z přístupu „vhodnosti pro daný účel“, tj. principu přípustné vady, kdy se vychází ze zkušenosti, že vada ovlivňuje nejvíce porušování křehkým lomem a únavové porušení. To se týká především nejnebezpečnějších vad, tj. trhlín. Jejich hodnocení přípustnosti vychází z teorie lomové mechaniky, jako základního nástroje posouzení vlivu těchto vad na životnost svařovaných konstrukcí.

Hodnocení přípustnosti některých dalších druhů vad ve svarech vychází z možné interakce následujících faktorů:

- geometrie svařované konstrukce (uzlu) a z ní vyplývajícího stavu napjatosti (rozložení napěťových špiček a stav zbytkových napětí),
- typu, orientace a velikosti vady,
- mechanických vlastností svarového spoje (mez kluzu, vrubová houževnatost, únavové, korozní a jiné vlastnosti),
- pracovní prostředí svařované konstrukce (charakter namáhání, teplota, pracovní prostředí).

Literatura

KOVAŘÍK, R. , ČERNÝ, F.: Technologie svařování, ZČU Plzeň, 1993.
Firemní literatura.

9. OPRAVY VAD A RENOVACE

Úvod

Tavné svařování případně navařování umožňuje opravovat poškozené součástky, zmetky a nedokonalé výrobky, případně renovaci výrobků, vyrobených z nejrůznějších kovových materiálů. Problematika opravného svařování a renovací je velice různorodá, závislá především na druhu a tvaru opravovaného případně renovovaného dílu, rozsahu opravy či renovace a zejména na materiálu dílu. Nezanedbatelným faktorem je vybavenost pracoviště, odbornost a zkušenost personálu.

V úvodu je nutné definovat rozdíl mezi opravou a renovací. **Opravou** rozumíme obnovení funkce výrobku poškozeného havárií, nepřipustnou vadou, provozním opotřebením, vlivy prostředí, chybou ve výrobě apod., **renovací** pak obnovení, respektive zlepšení, původních užitečných vlastností a funkce nepoškozeného výrobku.

9.1 Opravy vad svařováním

V současné době je vypracována řada postupů na svařování a opravy takových materiálů, které byly donedávna považovány prakticky za nesvařitelné. Tato skutečnost umožňuje nyní zabývat se opravami svařováním v daleko větší míře. Náklady na opravu jsou vyváženy cenou zachráněné součásti nebo stroje. Někdy bývá důvodem k provedení opravy i doba potřebná k vyrobení nové součásti, zejména při havárii úžinových nebo unikátních strojů. Převyšuje-li cena opravy výrobní náklady na novou součást, je třeba zvážit, zda čas získaný opravou a tím kratší čas, kdy zařízení je mimo provoz, vzniklý rozdíl nahradí případně převýší. Oprava by měla být vždy ekonomicky účelná.

9.1.1 Stanovení míry poškození

Stanovení míry poškození, respektive rozsahu defektu se provádí nedestruktivními metodami. Především je to vizuální kontrola, dále pak kapilární případně magnetická zkouška, zkouška prozářením nebo ultrazvukem. Podle typu prováděné zkoušky se identifikují vady povrchové nebo vnitřní.

9.1.2 Identifikace materiálu opravovaného dílu

V případě, že není k dispozici příslušná dokumentace, případně chemické složení materiálu, bývá tato část jedním z rozhodujících momentů opravy. Musíme dost často provádět identifikaci materiálů nepřímými metodami, jako např. jiskrová zkouška, zkouška magnetem, posouzení povrchu kovu, vzhledu lomu, tvrdosti, funkce či tvaru součástky. U lehkých kovů můžeme použít i tzv. kapkovou zkoušku.

Na základě specifikace materiálu opravovaného dílu se usuzuje i na jeho svařitelnost, která určuje podmínky opravy. Dále je nutné zvážit podmínky provozu dílu, protože může dojít k degradaci materiálu, která následně může ovlivnit kvalitu provedené opravy. Typickými příklady může být např. radiační poškození materiálů jaderných zařízení, stárnutí uhlíkových konstrukčních ocelí, vypálení některých prvků při působení vysokých teplot apod.

9.1.3 Volba přídavných materiálů

Přídavné materiály se volí na základě identifikace opravovaného materiálu a použité technologie, podle stejných principů jako pro běžné svařování. Opravy některých dílů však mají svá specifika a bude o nich zmínka v dalších kapitolách.

9.1.4 Volba technologie svařování

Nejčastěji využívanými technologiemi pro opravy jsou obloukové metody svařování a jejich aplikace je dána především rozsahem a přístupností opravy. Z rozsáhlého spektra obloukových technologií je nejčastěji používáno ruční obloukové svařování obalenou elektrodou. Tato technologie díky své univerzálnosti, jednoduchosti a velkému výběru přídavných svařovacích materiálů je použitelná prakticky pro všechny kovové materiály, různorodé typy konstrukcí a ve složitých podmínkách (např. na montážích). Dále jsou to technologie obloukové svařování v ochranných plynech tavící nebo netavící se elektrodou. Tyto technologie nacházejí uplatnění především při opravách vysokolegovaných ocelí a neželezných kovů. Při opravách velkého rozsahu, převážně v poloze vodorovné shora, se někdy využívá technologie svařování (navarování) pod tavidlem. S výhodou se používá při opravách austenitických návarů, popř. při renovaci navařováním. Při opravách velkých tlouštěk se někdy využívá technologie elektrostruskového svařování, která však není typicky obloukové svařování.

Mezi bezobloukové metody opravného svařování můžeme zařadit především plamenové svařování s modifikací práškového navařování, třecí svařování (opravy hřídelů), odporové svařování bodové nebo stykové a aluminotermické svařování (především opravy kolejnic).

Pro renovaci se využívá řada speciálních metod jako je vibrační navařování, plazmové navařování, žárové nástříky apod.

9.1.5 Kontrolní operace

Součástí oprav je také program kontrol, které musí potvrdit jejich úspěšné dokončení a kvalitu provedení. Mezi nejdůležitější patří kontrola v průběhu svařování, při které se dbá na optimální skladbu svarových housenek a jejich tvar. Po zakončení opravy se vedle vizuální kontroly, využívají i další defektoskopické kontroly, které dovolují objektivní identifikaci případných defektů, a tím i posouzení kvality opravy. S výhodou se např. kombinuje zkouška prozářením se zkouškou ultrazvukovou.

9.2 Opravy odlitků

Vady odlitků mohou být způsobeny jednak při jejich odlévání (vadným modelem, chybnou konstrukcí, chybou lití apod.) a dále pak vady způsobené při konečných operacích obrábění. U kusové výroby se zpravidla uvažuje o opravě a záchraně odlitku. U sériové výroby se však velké vady neopravují.

Při opravách odlitků dochází často ke střetu protichůdných požadavků. Je požadována kvalita a rychlost opravy, její jednoduchost a zachování rozměrů a v neposlední řadě i nízké náklady na její provedení. Proto je nutná součinnost svářečského specialisty s konstruktérem a pracovníkem kontroly, kteří musí v první řadě zjistit příčinu defektu (poddimezování,

přetížení, způsob namáhání, vnitřní pnutí, vnitřní vady apod.) a dále zvážit další faktory mající vliv na provedení opravy (tloušťka stěn, váha, materiál, přístupnost, spěšnost a cena opravy atd.). Na základě zvážení všech těchto činitelů pak rozhodnou zda odlitek zmetkovat nebo opravit.

9.2.1 Opravy odlitků ze šedé litiny

Šedá litina je obtížně svařitelná. Byla vypracována celá řada více či méně úspěšných metod, technologických postupů svařování a pájení. Základním předpokladem úspěšnosti opravy je dokonalá příprava svarových úkosů. Ta je podmíněna přesným a bezpečným identifikováním především všech trhlin a jejich ukončení (nejlépe magnetickou kontrolou).

Technologie svařování při opravách šedé litiny

a) svařování bez předehřevu (za studena) - provádí se hlavně v případech, kde není možnost demontáže. Oprava je levná, rychlá, ale riskantní. Svařuje se buď zcela bez předehřevu nebo se volí nízký předehřev do 150 °C. Svařuje se plamenovým svařováním nebo ručním obloukovým svařováním obalenou elektrodou.

- *plamenové svařování*: je výhodné při opravách drobných součástí jednoduchých tvarů. Jako přídavný materiál se používají litinové tyčinky. Oprava je ekonomicky výhodná - svary jsou spolehlivé s minimálními náklady. Úkos pro svar se volí většinou oboustranný, s úhlem otevření 50 až 60°, s mezerou v kořeni 1 až 3 mm. Opravy těžších a rozměrnějších odlitků svařováním plamenem za studena se nedoporučuje.

- *obloukové svařování obalenou elektrodou*: používá se v případech oprav méně namáhaných odlitků, které nelze demontovat nebo jsou pro své rozměry a tvar nevhodné pro svařování jinými metodami. Jako přídavný materiál se využívá uhlíková ocel, bronz, nikelit nebo bimetál. Svarový kov nezelezných elektrod je plastický a uhlík příliš nedifunduje ze základního materiálu, proto jsou svary dobře obrobitelné a odolávají vnitřním napětím, vznikajícím při svařování. Svařování se provádí krátkými housenkami, aby se opravovaný díl neohřál vlivem svařování na teplotu vyšší jak 80 °C. Typ elektrody se volí podle důležitosti a rozsahu opravy (nezelezné elektrody jsou drahé, a proto se používají u větších tloušťkách pouze na polštářování návarových ploch, přechody a krycí vrstvy). Svařuje se stejnosměrným proudem, nepřímou polaritou. Svařovací proud se doporučuje pro elektrody s ocelovým jádrem 30 až 35 A/mm průměru, pro elektrody s nezelezným jádrem 25 až 30 A/mm průměru.

b) svařování s mírným předehřevem (za nižších teplot) - předehřev opravované součásti se pohybuje na teplotách 250 až 450 °C, dosahují se poměrně kvalitní svary a svářeč není obtěžován sálavým teplem jako při vysokých teplotách předehřevu. Při svařování lze využít všech známých způsobů svařování a hlavně *pájení mosazi plamenem*, které je vhodné zejména pro opravy menších litinových součástí. Předehřev provádí svářeč přímo hořákem, který používá k vlastnímu pájení, na teplotu 400 až 450 °C. Při pájení se nesmí základní materiál natavovat, pouze ohřívat na teplotu asi 650 °C, což je teplota umožňující dobrou smáčivost tekutou pájkou.

c) svařování s vysokým předehřevem (za vysokých teplot) - předehřívací teploty opravovaného odlitku se pohybují v rozmezí 500 až 650 °C. Opravy při těchto teplotách jsou velmi náročné, dosahují však vysoké kvality a mají vlastnosti materiálu původního odlitku. Teplota při opravě nesmí přesáhnout 650 °C, protože dochází ke změně struktury a vzniku

okují. Ohřev i chladnutí musí být rovnoměrné, rychlost 50 až 100 °C/hod. (podle tvaru, rozměru a hmotnosti opravovaného odlitku). U důležitých oprav je nutno kontrolovat jak rychlost ohřevu tak teplotu přehřevu. Provádí se kyslíko-acetylenovým svařováním nebo obloukovým svařováním.

- *kyslíko-acetylenové svařování* se provádí postupem doleva. Přídavným materiálem jsou litinové přídavné tyčinky a používá se neutrální svařovací plamen. Svařují se převážně tenkostěnné odlitky do tloušťky stěny 12 mm za použití tavidla,
- *obloukové svařování* opláštěnými nebo holými litinovými tyčinkami. Používá se stejnosměrný proud nepřímé polarizace (+ pól na elektrodě) s napětím na oblouku dvojnásobným oproti běžnému svařování oceli a vysokým svařovacím proudem (pro průměr elektrody 20 mm, 1000 až 1200 A). Nutno dávat pozor na "foukání oblouku" které se znásobuje velkým proudem a neklidné hoření holé elektrody.

Po ukončení svařování se teplota odlitku v peci vyrovná na 550 až 600 °C a provede se žihání na snížení vnitřního pnutí. Tepelný režim musí být pečlivě kontrolován, nejlépe termočlánky s automatickou registrací teploty. Je třeba zajistit rovnoměrnost ohřevu v celém odlitku, aby nevznikala přídavná pnutí. Je třeba pamatovat i na změny rozměrů vlivem vysoké teploty ohřevu.

9.2.2 Opravy ocelových odlitků

Lité oceli mají obdobnou svařitelnost jako oceli kované a válcované. Podmínkou je, aby materiál odlitku byl bez ředin, lunkrů a zapečeného písku. Chemické složení materiálu ocelových odlitků nemá většinou směrné chemické složení, a proto je nutné při opravách provést chemický rozbor. Opravu můžeme zahájit až po tepelném zpracování odlitku (normalizační žihání, případně zušlechťení), kdy materiál je zbaven zákalných a hrubých licích struktur, místních pnutí a má vysokou tažnost.

Úprava svarových ploch se provádí vysekáním nebo opracováním na čistý kov. Používá se i drážkování elektrickým obloukem uhlíkovou elektrodou za pomoci stlačeného vzduchu, případně drážkování kyslíkem. Drážkovaný povrch je nutné před svařováním obrousit. Tvar úkosu je přizpůsoben tvaru a průběhu vady.

Pro opravy se používá především ruční svařování obalenou elektrodou. Pro běžné oceli se doporučuje používat bazické elektrody, které jsou méně citlivé na segregace síry v odlitku. V poslední době se při opravách odlitků používá ve velké míře obloukové svařování v ochranném plynu CO₂, při použití drátu MnSi o průměru 1,2 až 2,0 mm. Při této technologii je zvýšení produktivity práce až 100% a snížení nákladů na přídavný materiál až 50 %.

Při opravách ocelových odlitků používáme ve většině případů přehřev. Při zjištěném obsahu C > 0,3 % je nutno přehřívát i menší odlitky. Velké odlitky přehříváme již při obsahu C > 0,25 %. Při opravách malých vad bez přehřevu (svařování za studena) vznikne tvrdé přechodové pásmo. V každém případě je vždy výhodné přehřívát na 100 až 300 °C. Přehřívací teplota se musí udržovat po celou dobu opravy. Některé speciální slitinové oceli vyžadují i několikahodinový dohřev. Vady hlubší jak 50 mm se musí svařovat s mezižiháním při teplotě 600 až 650 °C, vady hlubší ve složitých odlitcích se mezižihají i několikrát. Po úplném zavaření je nutné provést žihání při teplotě min. 600 až 650 °C,

v některých případech (složité odlitky nebo odlitky s vysokým obsahem uhlíku nebo legujících prvků) i vyšších.

9.3 Opravy ocelových konstrukcí

U ocelových konstrukcí se mohou vyskytovat vady jak v základním materiálu, tak ve svarech. Objemové vady ve svarech, jako jsou póry, struskové vměstky apod. se opravují vysekáním, vybroušením na čistý kov a oprava se provede svařováním. Trhliny v základním materiálu, přechodové oblasti nebo svarovém kovu se musí pečlivě identifikovat a zjistit příčina jejich vzniku. Musí se zjistit druh oceli, technologický postup a způsob výroby svarku, dále pak provozní podmínky (způsob namáhání, provozní teplota, stáří, prostředí apod.). Často se stává, že konstruktér z neznalosti předepíše ocel nevhodnou pro svařování.

Mezi velmi problémové a nebezpečné patří opravy křehkých lomů, zejména dynamicky namáhaných konstrukcí (konstrukce vystavené chvění a rázům). Zde je nebezpečí náhlé destrukce nebo úplného zhroucení konstrukce, zejména za nižších teplot. Oprava takových vad by se měla provádět až po důkladných zkouškách svarového spoje (mechanických, metalografických a tepelného zpracování).

Vady, které se vyskytnou u válcovaných svařitelných ocelí se mohou opravovat i u dynamicky namáhaných konstrukcí. V případě defektů vyhodnocených jako trhlina je velmi důležité bezpečné zjištění průběhu a zejména ukončení trhliny. Pro opravy se doporučují oboustranné úkopy (i pro tenké plechy), zajištění dokonalého provaření kořenové části a opatření k vyloučení deformací. Předehřev volíme s ohledem na svařovanou tloušťku a použitou ocel. Pro opravy používáme zásadně bazické elektrody.

9.4 Opravy strojních součástí

Opravy strojních součástí svařováním můžeme rozdělit na dvě základní skupiny:

- 1) opravy součástí z ocelí o nízkém obsahu uhlíku,
- 2) opravy součástí z ocelí o vyšším obsahu uhlíku a legované oceli.

Zatím co u první skupiny svařování nečiní žádné vážnější problémy, u druhé skupiny je oprava vždy složitější. Opravy jsou často provázány i dalšími problémy jako je nemožnost dodržení potřebné výše předehřevu a následného tepelného zpracování. Při opravách součástí z obtížně svařitelných ocelí se doporučuje dodržování následujících zásad:

- přídatelný materiál svým složením musí odpovídat základnímu materiálu a svarový kov má být kvalitnější než základní materiál,
- dávat přednost svařování elektrickým obloukem a odporovému svařování na tupo,
- při vícevrstvě svařování pracovat bez přestávek, aby se tak využilo teplo předchozích housenek ke zpomalení chladnutí,
- svařovat v poloze vodorovné shora,
- polštářování návarové plochy u obtížně svařitelných ocelí před svařováním houževnatým kovem,
- dodržovat všechny zásady vedoucí ke snižování pnutí.

9.5 Opravy a renovace navařováním

Pro opravy, ale zejména pro renovace se v poslední době využívá navařování. Při navařování můžeme použít buď materiál stejného složení jako základní (převažuje

u oprav) nebo odlišného složení (převažuje u renovací). Způsob opravy případně renovace se volí podle druhu a povahy opotřebení, okolností a provozních možností. Využívají se prakticky všechny obloukové technologie vhodné pro navařování, dále pak navařování plamenem (omezeně) a vibrační (zejména u rotačních dílů).

Volba návarových elektrod (drátů) se řídí požadavky na navařovaný povrch. V případě opravy jsou většinou používány přídavné materiály shodné se základními, při renovacích záleží, jaké požadavky jsou na návar kladeny (tvrdost, odolnost proti opotřebení, odolnost proti prostředí apod.). Pro ruční obloukové svařování se používají elektrody bazické, svařovací zdroje pro stejnosměrný proud a svařování nepřímou polaritou (elektroda na + pólu). Doporučuje se provádět návary v poloze vodorovné shora. Navařený kov je velice jakostní, s malým obsahem vodíku, kyslíku a dusíku. Při příliš dlouhém oblouku, příliš rychlém ochlazení nebo nedokonalém vysušení obalu elektrody se v návarech vytvářejí póry. Stejně tak příliš vysoký proud způsobuje pórovitost návary a také nadměrný rozstřík.

Technologie opravy navařováním se využívá především při opravách nákolků železničních kol a jeřábových kol, dále u vodních turbín, kde v důsledku kavitace a dalších nepříznivých účinků dochází k častému vyřazení z provozu. Také ozubená kola bývají často vyřazena z provozu z důvodu opotřebení zásuvné hrany nebo vylomení jednoho nebo více zubů. U lisovadel, nožů a nástrojů dochází velmi často k opotřebení hran a navaření bývá jedinou cestou k obnovení funkce.

Vedle návarových materiálů ocelových, používají se k navařování i neželezné kovy. Tímto způsobem se renovují např. kluzné plochy ložisek, šneková ozubená kola, různá smykadla apod.

9.6 Pracoviště pro opravy a renovace

Opravy svařováním mohou probíhat buď ve svařovnách nebo přímo v provozu, případně ve venkovním prostředí. V každém případě je nutné zajistit bezpečnost svářeče i dalších pracovníků. Každé prostředí má své specifické problémy a je nutné se jim z hlediska bezpečnosti práce přizpůsobit.

Zásady, které je nutné vždy dodržovat:

- 1) Zajistit přímé spojení zemního kabelu se svařovanou součástí. Proud nesmí procházet ložisky, ozubenými převody, dosedacími plochami, přes konstrukce budov, jeřábových drah a strojů.
- 2) Svařovací kabely musí být vždy řádně izolované.
- 3) Svařovací kabely se nesmí pokládat přes koleje.
- 4) Svařovací zdroje se musí chránit proti prachu, nečistotám a vodě.
- 5) Svařovací zdroje se musí umisťovat v bezpečné vzdálenosti od hořlavín.

Literatura

KUNCIPÁL, J. a kol.: Svařování ve strojírenství. SNTL Praha, 1967.

KRŇÁK a kol.: Kapesní příručka svařování, řezání a pájení. SNTL Praha, 1973.

Kolektiv: Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. ZEROSS Ostrava, 2000.

10. EKONOMIKA VE SVAŘOVÁNÍ

Úvod

Svářečská výroba tvoří více jak 10 % z celkového objemu výroby průmyslu v České republice a řadí tak tuto technologii na 4. místo ve strojírenství, což dostatečně vyzdvihuje její důležitost. V posledních letech nastal silný pokles ručních způsobů svařování a výrazný přesun k mechanizovaným obloukovým metodám. Podíl se zvětšil cca 6x tj. přibližně na 30 % z celkového objemu. Dále také můžeme pozorovat nárůst ostatních metod, kam patří především plazmové a laserové technologie. Nejvyšší tempo růstu zaznamenává svařování v ochranných plynech, především díky vysoké produktivitě svařování, dostatku vhodných a cenově dostupných zdrojů, potřebných technických plynů a jejich směsí a snadné možnosti mechanizace a automatizace.

V poslední době se zlepšuje i věková skladba svařovacích zařízení, zejména podstatně vzrostl počet zdrojů pro mechanizované způsoby svařování. Využívání technologie svařování je porovnatelné úrovni s vyspělými průmyslovými státy evropského společenství. Využití pracovního času svářečů na efektivní svařování je relativně nízké a pohybuje se okolo 30 %. Celková produktivita svářečských prací je nízká také proto, že není v dostatečné míře využíváno moderních vysoce výkonných metod svařování.

10.1 Analýza nákladů na svařování

Při navrhování konkrétní technologie svařování pro daný druh výrobku a při sledování otázek spojených se zvyšováním efektivnosti svářečských prací je nutné znát pro každou technologii její nejvýhodnější použití. Odpověď na otázku, která technologie je optimální nelze dát paušálně pro všechny případy a je nutný komplexní pohled, jako jsou možnosti organizace, možnosti použití dané technologie apod.

Vzhledem k tomu, že podmínky jsou v každé organizaci jiné, je nutné znát základní zásady efektivnosti svářečské výroby, tj. problematiku pracnosti, investičních a výrobních nákladů jednotlivých svářečských technologií. Snižování výrobních nákladů a zvyšování produktivity práce nelze stanovit bez porovnávání efektivnosti různých výrobních variant. Při tom stanovíme optimální technologii, která zajistí při vysoké kvalitě výrobku nejvyšší produktivitu práce při nejmenších výrobních a investičních nákladech. Provedení efektivnosti výrobní technologie bychom měli provádět vždy, když zavádíme novou výrobu, případně rozšiřujeme stávající kapacity nebo budujeme nové. I v zaběhnuté výrobě by se měly provádět prověrky efektivnosti periodicky, zejména s přihlédnutím k existenci nových zařízení a progresivních technologií, vliv tlaku konkurenčních výrobků apod.

10.1.1 Vlivy působící na vlastní náklady svařování

Hospodárnost a efektivnost to jsou rozhodující faktory úspěšnosti firmy. Abychom mohli tyto faktory ovlivňovat, musíme provádět kalkulaci neboli alokaci nákladů. Jedním z hlavních důvodů kalkulace je řízení nákladů. Abychom mohli vlastní náklady svařování porovnávat, je třeba je přepočítat na porovnatelnou jednotku, neboli kalkulační jednici, která v našem případě je *1 bm svaru* nominálního rozměru. Tato jednotka byla vybrána proto, že je třeba vyrobit určitý počet svarů tj. metrů svarů a ne svařovat měsíc nebo rok, tedy určitý čas.

Nejdůležitější vlivy pro volbu technologie svařování jsou především druh, rozměr, délka svaru, celkový počet svarů na výrobku, svařovaná tloušťka, přístupnost svarů, sériovost apod. Zvážením těchto faktorů můžeme přibližně určit, které z uvažovaných technologií jsou vůbec použitelné pro daný výrobek. Tyto faktory jsou jak technologické tak ekonomické.

Ekonomické vlivy, které především umožňují snižovat pracnost a ostatní vlastní náklady, jsou zejména tyto:

* seriovost výrobku

Stoupající sériovost umožňuje zkracovat především samotný produktivní čas, tj. dobu hoření oblouku použitím výkonnějších a mechanizovaných svařovacích zařízení. Současně lze zkracovat i časy vedlejší, tj. časy pravidelné a nepravidelné jednotkové práce (t_{A1}), časy nutných přestávek (t_{A3}) a časy dávkové (t_B).

* technické vybavení pracoviště

Je prakticky důsledkem sériovosti a snižování pracnosti. Je přibližně na stejné úrovni.

* technologičnost výrobku

Může v některých případech snížit vlastní náklady svarků o více jak 30 %. Technologičností rozumíme takové vlastnosti a tvarová řešení, která umožní při volbě zásadní výrobní technologie dosažení předpokládané kvality, nejefektivnější a nejlevnější výroby. Snižování pracnosti lze dosáhnout úpravou tvaru svarku, snížením počtu a unifikací dílů. Svářečskou pracnost snížíme zmenšením počtu svarů, zmenšením celkové délky svarů s maximálním prodloužením délky jednoho spoje, snížením objemu svarového kovu na 1m svaru, volbou malého počtu různých typů a velikostí svarů, orientací pokud možno jedním směrem, rozložením v jedné rovině, dobré přístupnosti apod.

* organizace práce

Je velmi složitým a přitom důležitým faktorem. Plynulý tok a rytmus výroby, práce bez zbytečných prostojů, zbytečných a opakovaných pracovních operací může zajistit pouze dokonalá organizace práce.

10.1.2 Rozbor normativního času

Abychom mohli zachytit všechny tyto různorodé a při tom obtížně definovatelné vlivy, rozdělíme celkový normativní čas na dvě složky:

a) čas hoření oblouku nebo strojní čas - t_{A131} , resp. t_s

Tento čas je jediný produktivní a nutný pro bezprostřední zhotovení svaru. Je dán pro určitou velikost svaru a technologii svařování, vlastnostmi svařovacích zdrojů a přídavného materiálu, proudovým zatížením apod. Čas hoření oblouku se ve výpočtech považuje za konstantní.

b) ostatní složky normativního času potřebné pro svaření 1 bm svaru

Jedná se o čas vedlejší a podílí se rozhodující mírou na pracnosti, je dán součtem

$$t_A + t_B + t_C$$

- t_A **čas jednotkové práce** - je složen z času práce za chodu zařízení (čas manipulační + čas ručně strojní) + čas oddychový + čas čekací,
- t_B **čas dávkový**,
- t_C **čas směnový** - je složen z času potřebného na úpravu pracoviště + oddychový čas + čas pro fyziologické potřeby + čas na přestávku v práci + čas čekací.

Všechny různorodé, proměnlivé a nedefinovatelné podmínky, které jsou v každé firmě odlišné, avšak aktivně ovlivňují čas potřebný na zhotovení 1 bm svaru zachytí tzv. koeficient času hoření oblouku k_o .

$$k_o = \frac{t_{A131}}{t_{AC}}$$

Koeficient času hoření oblouku k_o je tedy poměr času hoření oblouku k celkovému času svařování. Tímto koeficientem zachytíme všechny rozmanité, proměnné i nedefinovatelné podmínky, které jsou v každém závodě jiné, ale aktivně ovlivňují čas potřebný na zhotovení jednoho běžného metru svaru. Koeficient času hoření oblouku je rozhodujícím činitelem produktivity a efektivnosti svařování.

Tento koeficient je různý podle metod svařování. U ručních metod se pohybuje v rozmezí 26 až 61 %, u metod poloautomatických 24 až 52 % a u automatového svařování 5 až 26 %. Z uvedených hodnot vidíme, že tento koeficient klesá s rostoucí automatizací. Je to dáno tím, že čas hoření oblouku se zkracuje, zatímco vedlejší přípravné časy se prodlužují.

10.1.3 Náklady na 1 bm svaru

Náklady na zhotovení 1 bm svaru se skládají ze tří hlavních složek:

- 1) **náklady mzdové** – závisí především na hodinové mzdě svářeče,
- 2) **náklady na přídatné materiály** – jsou pro daný typ svaru a technologii konstantní,
- 3) **režijní náklady**

- **režijní náklady přímé:**

Náklady na elektrickou energii. Jsou závislé na parametrech svařování (proud, napětí), na účinnosti použitého zařízení a koeficientu času hoření oblouku. Dále se předpokládá, že svařovací zdroj běží na prázdko po celý vedlejší čas.

Náklady na údržbu a opravy strojů a zařízení. Jsou závislé na typu zařízení a jeho využívání. Je třeba stanovit náklady na opravárenský cyklus, včetně generální opravy a přepočítat na 1 bm svaru. Součástí výpočtu musí být i náklady na výměnu opotřebovaných dílů, které se stanovují na základě jejich životnosti.

Náklady na odpisy strojů a zařízení. Jsou závislé na používaném zařízení a způsobu jejich odpisu, který je dán vyhláškami MF ČR. Jsou stanoveny pevnou částkou za jednotku

času (1 rok), bez ohledu na vytížení zařízení. Z tohoto důvodu je nutné lepší využívání zařízení, aby se zmenšily náklady na 1 bm svaru.

- režijní náklady nepřímé:

Jsou to náklady, jejichž výška jen velmi málo ovlivňuje objem vlastních nákladů pro zvolenou technologii svařování, ale značně ovlivňuje celkovou režii. Patří sem především:

- odpisy budov,
- mzdy nevýrobních dělníků,
- náklady na pomocné a režijní materiály,
- náklady na zmetky,
- náklady na dopravu,
- náklady na služební cesty,
- náklady na přípravu a náběh výroby,
- ostatní náklady.

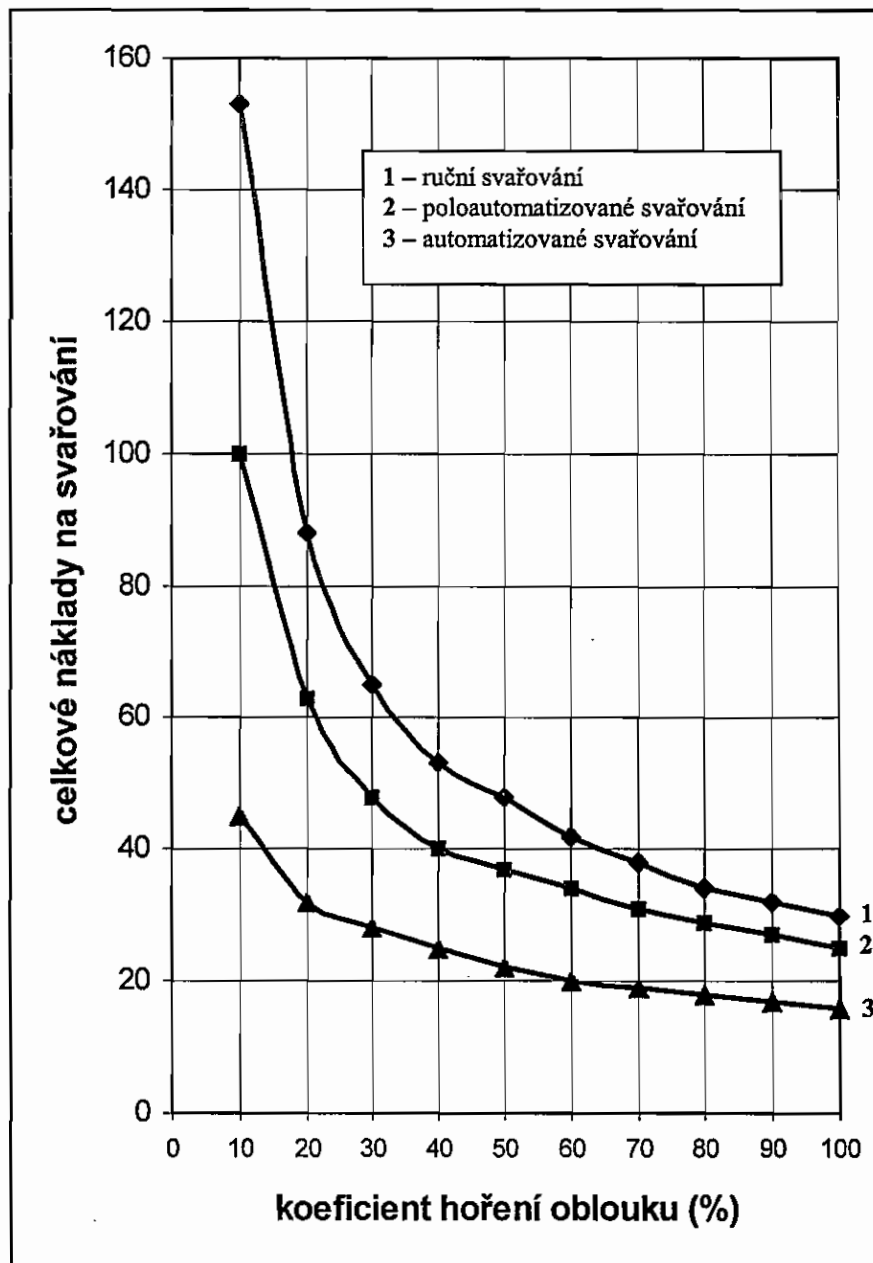
10.1.4 Závěr

Součtem všech složek nákladů přepočtených na 1 bm svaru dostaneme potom náklady celkové. Provedeme-li rozbor jednotlivých nákladových položek, zjistíme, že konstantní jsou pouze náklady na přídatné svařovací materiály. Všechny ostatní náklady jsou přímo závislé na využívání svařovacích zařízení a úměrně zvyšování využití klesají. Na obr. 10.1 je potom znázorněn vliv vlastních nákladů ve svařování v závislosti koeficientu hoření oblouku pro některé technologie svařování. Jednoznačně se ukazuje, že přes nižší koeficient hoření oblouku pro mechanizované a automatizované metody svařování, náklady na 1 bm svaru jsou nižší.

10.2 Použití softwaru a programy pro kalkulaci

Díky počítačům a moderním počítačovým programům, můžeme dnes velmi rychle řešit i složité úlohy spojené s vyhodnocováním hospodárnosti a efektivnosti výroby. Kalkulace nákladů je jedním z prostředků jak řídit náklady a ovlivňovat úspornost a účinnost výroby a její efektivnost. K tomuto účelu se v současné době využívají standardní tabulkové procesory, které mají velké množství funkcí. Mohou se vytvářet pracovní formuláře, databáze, grafy a tyto programy současně umožňují jejich vzájemné propojování. Získáváme tak možnost zpracovávání velkého množství informací v relativně krátkém časovém rozmezí, a tím i možnost rychlého rozhodování.

Mezi základní tabulkové procesory využívané pro kalkulaci jsou LOTUS, EXCEL a QUATTRO Pro. Pomocí těchto programů lze velmi rychle zpracovat základní nákladové údaje, rozhodnout o optimálním postupu a současně získat přehled o možnostech snižování nákladů a případných ztrátách ve výrobě. Existují i speciální programy pro kalkulaci, ale ty jsou vesměs jednoúčelové. Zmíněné základní tabulkové procesory jsou pro řešení ekonomiky svařování zcela postačující.



Obr. 10.1

10.3 Opatření pro snižování nákladů na svařování

10.3.1 Volba technologie podle vlastnosti svarku

Mezi nejdůležitější vlastnosti svarků, ovlivňující volbu technologie svařování patří především:

- druh základního materiálu,
- tloušťka svařovaného materiálu,

- rozměr koutového svaru,
- průřez svaru,
- poloha svařování,
- průměrná délka svaru,
- pracnost.

10.3.2 Úspory ve svařovnách

K dosažení nejvyšší efektivity svařování je nemyslitelné bez důkladné prověrky samotné svářečské výroby ve svařovně. Z předchozích kapitol vyplývá, že výrobní náklady se skládají ze tří hlavních složek:

- náklady mzdové,
- náklady materiálové,
- náklady režijní.

* snižování mzdových nákladů

Jednou z možností jak snížit mzdové náklady je náhrada ručních metod svařování metodami mechanizovanými, případně automatizovanými. Dále pak zavádění vysokovýkonných metod svařování, případně moderní technologie, jako např. Rapid proces, př. T.I.M.E proces. Vždy je však nutné velmi pečlivě zvážit eventuální zvýšení nákladů, např. na přípravu, opracování apod.

Další možností u ručních metod svařování obalenou elektrodou, MIG, MAG i TIG, je svařování v optimální poloze (poloha vodorovná shora), což předpokládá používání polohovadel. To přinese vedle větší možnosti použití mechanizovaných metod, větší možnosti při používání různých druhů obalovaných elektrod.

Jedna z možností snižování mzdových nákladů je také zvyšování směnné intenzity práce. Je to otázka zvyšování koeficientu hoření oblouku k_0 zejména zlepšováním organizace výroby, snižování vedlejších časů, snižování poruchovosti zařízení, dostatečným množstvím materiálu a pod.

* snižování materiálových nákladů

Jedna z cest jak snížit materiálovou náročnost výrobku je náhrada odlitků a výkovek svařky. Tyto úspory dosahují výrazný efekt v malosériové a kusové výrobě, zejména při použití ručních metod svařování, tj. metod s nízkou produktivitou práce. Při použití progresivních automatových metod svařování lze efekt snížení hmotnosti výrobku dosáhnout i u velkých sérií. Použití svařování v těchto případech však velmi často brání netechnologické důvody, jako např. využití kapacity slévárny, nedůvěra techniků k novému, malý objem výroby a tím malé využití výkonných a drahých svařovacích zařízení.

Při využívání automatových metod svařování (např. svařování pod tavidlem) lze dosáhnout úspory materiálu vlivem vysokého koeficientu svaru (až 1). To je ovšem podmíněno vysokou odbornou připraveností jak technického personálu, tak svářečů. Také materiály s vyšší pevností přinášejí snížení hmotnosti výrobku, ale neznamená to vždy snížení výrobních nákladů.

U přídavných materiálů je nejjednodušší cestou úspory materiálu dodržování předepsaných rozměrů svarů. Dále pak úprava svarových ploch, případně koutového svaru, může přinést úspory jak na přídavném svařovacím materiálu, tak na svařovacím čase.

*** snižování režijních nákladů**

U této skupiny nákladů má největší význam zlepšování organizace výroby, využívání drahých svařovacích zařízení ve vícesměnném provozu, používání svařovacích zařízení s nízkou spotřebou elektrické energie (využití měničů apod.), která se současně vyznačují malou poruchovostí a tím nízkými náklady na opravy. Dále pak využívání různých polohovadel, otočných stolů a pod., umožňujících lepší využívání pracovního fondu stroje.

10.3.3 Závěr

Zásady pro snižování nákladů na výrobu svarků jsou celkem známé a závisí pouze na odpovědnosti a technické zdatnosti pracovníků ve výrobních organizacích, jak se s touto skutečností vypořádají. Problematika snižování nákladů je jedním z rozhodujících ukazatelů ke zvyšování produktivity práce. Je prokázáno, že účelným využitím všech známých skutečností, lze bez větších nároků na investice dosáhnout snížení nákladů až o 30 %.

Literatura

Kolektiv autorů: Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. ZEROSS, Ostrava 2000.
Firemní literatura

11. PŘÍPRAVA SVÁŘEČSKÉHO PERSONÁLU

Úvod

Svařování je fenomén, který je ve velkém rozsahu rozšířen prakticky v celém spektru strojírenské výroby a v řadě firem zaujímá klíčové postavení mezi používanými technologiemi. Je nutné ho chápat jako komplexní problém, kde vedle špičkových svařovacích materiálů a špičkových svařovacích zařízení musí být i kvalitní personál. Česká republika se připravuje ke vstupu do Evropského společenství, a to sebou přináší nutnost zavádění evropských norem, předpisů a zvyklostí. Hlavním požadavkem zákazníka je kvalita. Jakost je souhrn vlastností, které vyjadřují způsobilost výrobku plnit funkce, pro které je určen. Dosažení požadované jakosti vyžaduje zapojení a účast všech pracovníků organizace, přičemž odpovědnost za řízení jakosti má vrcholové vedení organizace (ČSN EN ISO 9000, kap. 3.2). Za výrobek odpovídá vždy výrobce, a proto i prokázání shody výrobků s požadavky je jeho úkolem (zákon 22/1997 Sb. - o technických požadavcích na výrobky).

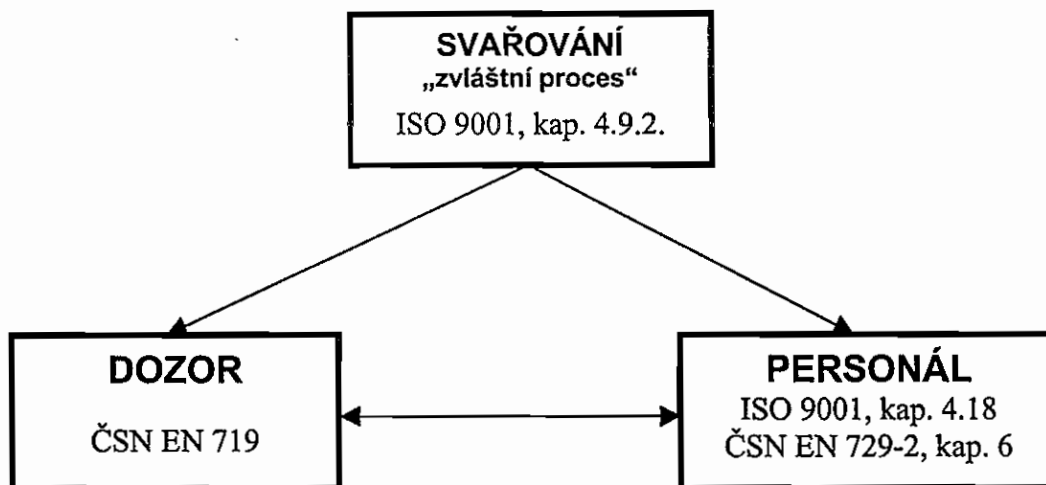
Zavádění systémů řízení jakosti ve smyslu norem ČSN EN ISO 9000 vyžaduje respektování podmínek, souvisejících s požadavky na kvalifikaci odborníků v určitých oblastech, které jsou přímo specifikované. Týká se to profesí, u kterých kvalifikační úroveň jednoznačně ovlivňuje jakost finálního výrobku. Procesy, jejichž výsledky nemohou být plně ověřeny následnou kontrolou a zkoušením, se řadí mezi „**zvláštní procesy**“. Takovou oblastí je i výroba svarků bez ohledu na to, zda jde o svarky jako finální výrobek nebo svarky jako polotovary pro další výrobu.

Pro splnění stanovených požadavků se vyžaduje sledování a soustavný soulad s dokumentovanými procesy. Tyto procesy musí být uznány jako způsobilé a musí být prováděny v řízeném režimu a musí být o nich podle potřeby udržovány příslušné záznamy (ČSN EN ISO 9001, kap. 4.18). Je vyžadován dozor nad svářečskou činností, aby se vytvořila důvěra ke spolehlivosti výrobku a je nutné respektovat podmínky přímo související zejména s kvalifikací pracovníků.

Dodavatel musí vytvořit a udržovat postupy ke zjišťování potřeb přípravy pracovníků, jejichž činnost má vliv na jakost výrobku. Způsobilost pracovníků, kteří jsou pověřeni plnit specifické úkoly, musí být přiznána podle požadavků na základě příslušného vzdělání, přípravy a zkušeností. Výrobce musí mít k dispozici dostatečný počet pracovníků, zajišťujících práce svářečského dozoru a všech činností se vztahem ke svařování (ČSN EN 729-2 kap. 6.). O přípravě pracovníků musí být udržovány příslušné záznamy.

11.1 Vzdělávání, zkoušky a certifikace personálu podílejícího se na výrobě svařovaných konstrukcí

Při výrobě svařovaných konstrukcí je vyžadován dozor nad svářečskou činností, aby se vytvořila důvěra ke spolehlivosti výrobku a je nutné respektovat podmínky přímo související zejména s kvalifikací pracovníků (obr.11.1).

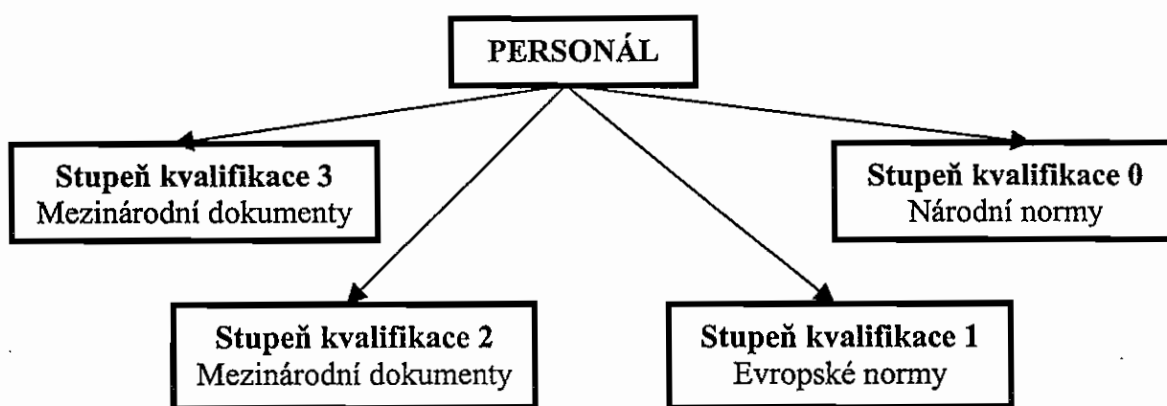


Obr. 11.1

Výrobce musí vytvořit a udržovat postupy ke zjišťování potřeb přípravy pracovníků, jejichž činnost má vliv na jakost výrobku. Způsobilost pracovníků, kteří jsou pověřeni plnit specifické úkoly, musí být přiznána podle požadavků na základě příslušného vzdělání, přípravy a zkušeností. Výrobce musí mít k dispozici dostatečný počet pracovníků, zajišťujících práce svářečského dozoru a všech činností ze vztahem ke svařování. (ČSN EN 729-2, kap. 6.).

11.2 Stupně kvalifikace svářečských pracovníků a jejich odborná způsobilost

Pro účely svářečské praxe se rozlišují stupně kvalifikace svářečského personálu uvedené na obr. 11.2. Tato kvalifikace je mezinárodně uznávána a její dosažení potvrzuje národní autorizované místo (ANB), akreditované v souladu s EOTC/AG-15/97/001/416 a autorizované pro tuto činnost na základě příslušné národní a mezinárodní akreditace.



Obr. 11.2

Stupeň kvalifikace 0:

Uznávací dokumenty:

Odborná způsobilost:

národní normy (ČSN 05 0705)

Svářeč, zaškolený pracovník

Uznání EWF: není
Vydané dokumenty: Osvědčení

Stupeň kvalifikace 1:

Uznávací dokumenty: evropské normy (ČSN EN 287, ČSN EN ISO 9606, ČSN EN 1418)
Odborná způsobilost: Svářeč, operátor
Uznání EWF: ano
Vydané dokumenty: Osvědčení + certifikát

Stupeň kvalifikace 2:

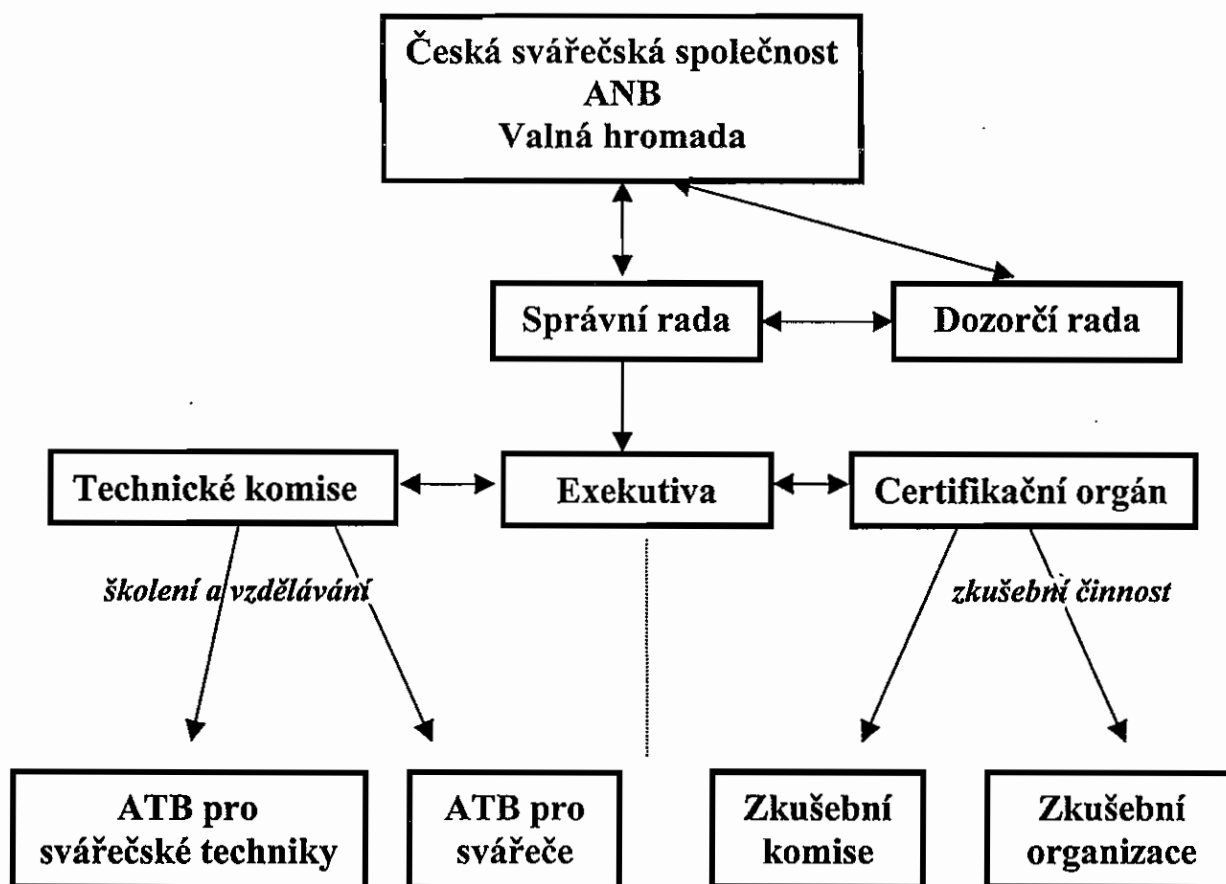
Uznávací dokumenty: evropské normy (ČSN EN 287, ČSN EN ISO 9606, ČSN EN 1418)
Evropské dokumenty (Doc. EWF)
Odborná způsobilost: Evropský svářeč, operátor
Uznání EWF: ano
Vydané dokumenty: Diplom (ANB) + Osvědčení + certifikát

Stupeň kvalifikace 3:

Uznávací dokumenty: evropské normy (ČSN EN 719)
Mezinárodní dokumenty (Doc. EWF a IIW)
Odborná způsobilost: Vyšší svářečský personál (EWE, EWT, EWS, EWP)
Uznání EWF: ano
Vydané dokumenty: Diplom (ANB) + certifikát

11.3 Systém vzdělávání svářečského personálu v České republice

Vzděláváním svářečského personálu se v České republice zabývá řada institucí na různé odborné úrovni. Téměř 95 % svářečských odborníků (svářečů a svářečských techniků) se připravuje ve vzdělávacích zařízeních, sdružených pod **Českou svářečskou společností ANB**. Toto sdružení je akreditováno jak Evropskou svářečskou federací (EWF), tak Českým akreditačním institutem (ČIA) a dohlíží na to, aby personál byl připravován a zkoušen v souladu s evropskými předpisy a normami. V souladu s Evropským standardem je vzdělávací a zkušební činnost od sebe přísně oddělena (obr. 11.3). Vzdělávání probíhá na autorizovaných výukových místech (ATB), kterými jsou pro pracovníky svářečského dozoru autorizovaná školící pracoviště a pro svářeče svářečské školy. Pro zkoušky svářečského technického personálu je jmenována národní zkušební komise, zkoušky svářečů zajišťují zkušební organizace.



Obr. 11.3

11.4 Vzdělávání a zkoušky svářečů

Svářeči a zaškolení pracovníci, pro jejichž činnost postačuje **odborná způsobilost ve stupni 0**, se připravují na národní úrovni a jsou zkoušeni v souladu s normou ČSN 05 0705. Tato norma se v současné době přepracovává a provedené změny byly provedeny za účelem harmonizace národní normy s nově přijatými normami EN a ISO, s přihlédnutím k připravované směrnici IIW, zpracované komisí XIV „International Welder – Requirements for Education, Examination and Qualification“ a směrnici EWF „Course Schedule for European Thermoplastics Weder“. V normě jsou stanoveny požadavky pro základní teoretickou a praktickou přípravu svářeče, způsoby provádění a hodnocení zkoušky svářeče a vydávání „Osvědčení o vykonané zkoušce“. Je určena pro uvedené metody tavného svařování a dělení kovů a svařování plastů. Stanovuje zásady pro přípravu a zkoušení svářečů v rozsahu základního kurzu nebo zaškolení pracovníka na určitou jednoduchou svářečskou práci. Při závěrečné zkoušce svářeč musí prokázat, že má základní odborné a praktické znalosti o způsobu svařování, značení a používání základních a přídatných materiálů, vadách svarů a příčinách jejich vzniku a platných bezpečnostních předpisech. Tato norma stanovuje základ pro vzájemné uznávání odborné způsobilosti svářečů zkušebními organizacemi v rozdílných oblastech jejich uplatnění, je platná pouze na území ČR a není uznatelná podle mezinárodních pravidel a předpisů. Osvědčení o zkoušce se vystavuje na základě výhradní zodpovědnosti zkušebnímu orgánu nebo zkušební organizace. Odborná způsobilost svářečů, kteří získali osvědčení podle této normy, je neopravňuje provádět svary, na něž jsou kladeny požadavky na bezpečnost svařovaných

konstrukcí a výrobků a které jsou zatěžovány vnitřním přetlakem, dynamickým zatížením apod.

Příprava a zkoušky svářečů a operátorů, která se provádí v souladu s normami ČSN EN 287-1, 2, případně ČSN EN 1418 zajišťuje **odbornou způsobilost ve stupni 1**. Hlavním cílem přípravy a zkoušek pracovníků podle norem ČSN EN je vypěstování dokonalé zručnosti, zodpovědnosti a samokontroly činnosti a tím dosahování trvale dobrých pracovních výsledků. Evropské normy řady EN 287 případně EN ISO 9606 uvádějí pouze schéma pro provádění zkoušek svářečů, jejich hodnocení a vystavení Osvědčení pro stanovené rozsahy svařovacích podmínek. Slouží k zajištění kvality pro speciální práce, ale neposkytují žádný učební a výcvikový program.

Zavedením této normy se také částečně mění jak stávající podmínky pro přípravu svářečů, tak rozsahy platnosti jednotlivých zkoušek. Nová norma dává možnost užší specializace tím, že používá větší počet zkušebních kusů a různých poloh svařování, které jsou seřazeny podle obtížnosti provedení a je důsledně uplatňována zásada, že zkouška provedená na určitém zkušebním kusu zahrnuje všechny méně obtížné typy svarů a polohy pro zvolenou metodu. Schopnost svářeče plnit ústní nebo písemné návody, ale i zkouška jeho zručnosti jsou důležitými podmínkami pro zajištění jakosti svařovaných výrobků. Zkouška zručnosti podle této normy závisí také na metodách svařování a je třeba dodržet jednotná pravidla a podmínky zkoušení, včetně používání předepsaných zkušebních těles. Tato norma platí pro všechny metody svařování, kde rozhodující vliv na jakost svaru má zručnost svářeče. Tato norma vytváří základ pro vzájemné uznávání způsobilosti svářečů v rozdílných oblastech jejich uplatnění. Zkouška svářeče prováděná podle této normy může sloužit rovněž jako podklad pro schvalování postupů svařování nebo prokázání způsobilosti svářeče za předpokladu, že byly splněny všechny příslušné požadavky (viz např. ČSN EN 288 - 3).

Vykonávání zkoušek podle normy ČSN EN 287 musí probíhat v souladu s normou (obr. 11.4). Pro zabezpečení opakovatelnosti svařovacího procesu, s cílem naučit svářeče pracovat podle písemného zadání, vypracují svářečské školy technologickou návodku pro svařování (WPS), obsahující nutné údaje o parametrech svařování, použitých materiálech, tloušťce, eventuálně průměru svařovaného vzorku a další nutné veličiny. Budou zpracovány na typových formulářích v souladu s normou a odsouhlaseny zkušební organizací. Výsledky zkoušek se zapisují do zkušebního protokolu, který je nedílnou součástí Osvědčení o provedené zkoušce. Při stanovování rozměru zkušebního vzorku je nezbytně nutná úzká spolupráce se zákazníkem, aby byla vzhledem k rozsahu platnosti zkoušky zvolena jeho optimální hodnota. Svářeči se připravují ve čtyřech úrovních:

- svářeč koutových svarů (všechny polohy),
- svářeč plechů (všechny polohy),
- svářeč trubek I. (trubky s osou vodorovnou a svislou),
- svářeč trubek II. (trubky s osou šikmou).

podle toho v jaké metodě svařování výcvik probíhá. Svářeči, kteří úspěšně dokončí tento program, získají široké spektrum autorizací podle ČSN EN 287 resp. EN ISO 9606 a mají zajištěnou **odbornou způsobilost ve stupni 2**.

Minimální požadavky na vzdělání, zkoušky a kvalifikaci určují jednotlivé dokumenty EWF, které byly vydány také jako technická pravidla CWS ANB:

- 1) Evropský svářeč - ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (111)
EWF doc. 01-452-94 resp. TP A 010
- 2) Evropský svářeč – plamenové svařování (311)
EWF doc. 480 – 01 resp. TP A 011
- 3) Evropský svářeč - obloukové svařování v ochraně inertního plynu TIG
EWF doc. 481 – 01 resp. TP A 012
- 4) Evropský svářeč - obloukové svařování v ochraně aktivního plynu MIG/MAG
EWF doc. 467 – 01 resp. TP A 013

11.5 Vzdělávání svářečského technického personálu

V oblasti výchovy technických pracovníků ve svařování s **odbornou způsobilostí ve stupni 3**, se při jejich přípravě, zkoušení a certifikaci jednotlivé národní instituce řídí dokumenty Evropské svářečské federace. Pro svářečský dozor je to doc. EWF 03-416-96 a pro svářečský inspekční personál doc. EWF 450-02.

V obou skupinách je technický personál připravován ve čtyřech úrovních, a to: inženýr, technolog, specialista a praktik. Aby byly zajištěny jednotné podmínky pro přípravu, zkoušení a certifikaci, jsou vydávány jednotné předpisy. Kurzy EWF jsou zajišťovány a řízeny autorizovanými národními institucemi (ANB). Absolventi, kteří úspěšně složí závěrečnou zkoušku po absolvování kurzu schváleného národním ANB, obdrží od ANB EWF evropský diplom s odpovídajícím titulem. Aby však dotyčný pracovník mohl vykonávat funkci ve smyslu normy ČSN EN 719 – Svářečský dozor, založila EWF systém certifikačního řízení. Kandidáti, kteří projdou tímto řízením, získají pak certifikát platný dva roky, který lze obnovovat.

Kurz svářečského inženýra poskytne absolventům vyšší, prakticky orientované znalosti svářečské technologie na úrovni graduovaných inženýrů. To zahrnuje evropské a národní normy, bezpečnostní předpisy, systémy zajištění jakosti, výrobní metody a postupy a aplikované inženýrství. Účastník kurzu musí mít před nástupem do kurzu ukončeno inženýrské vzdělání. Absolvent kurzu, který úspěšně složí závěrečnou zkoušku, obdrží diplom svářečského inženýra.

Kurz svářečského technologa poskytne absolventům obecné pokrokové znalosti svářečské technologie o jeden stupeň nižší než u inženýra. Absolvent je schopen vykonávat vysoce kvalifikovanou funkci v průmyslu, např. v oblasti konstrukce, návrhu výroby, svářečského dozoru, v systémech zajišťování jakosti, výzkumu a vývoji. Účastník kurzu musí mít před nástupem ukončené technické vzdělání s maturitou. Absolvent, který úspěšně složí závěrečnou zkoušku, obdrží diplom svářečského technologa.

Svářečský specialista je žádán v průmyslu pro svoje teoretické znalosti kombinované s praktickými dovednostmi, které mu poskytne kurz svářečského specialisty. Je schopný vést skupinu svářečů, stejně jako se zabývat otázkami zajišťování jakosti a svářečské výroby. Ve velkých firmách pracuje jako asistent svářečského inženýra nebo technologa. Pro uchazeče

není předepsáno žádné speciální vzdělání. Absolvent kurzu, který úspěšně složí závěrečnou zkoušku, obdrží diplom svářečského specialisty.

Svářečský praktik plní ve firmě funkci předního svářeče, který se podílí na přípravě pracovních zkoušek a jejich realizaci, při tvorbě technologických postupů (pWPS) a po doplnění pedagogického minima může zastávat funkci svářečského instruktora (učitele svařování) především ve svářečských školách.

11.6 Vzdělávání svářečského inspekčního personálu

Vzdělávání pracovníků zodpovědných za inspekční činnost na různých úrovních je prováděno podle dokumentu EWF (Doc. EWF 450-02). Toto pravidlo je navrženo tak, aby poskytlo základ jak pro vzdělání svářečské tak inspekční technologie. Zahrnuje minimální požadavky na vzdělání a výcvik, schválené všemi národními svářečskými společnostmi, sdruženými v EWF.

Inspekční personál je připravován ve čtyřech úrovních:

- a) Evropský svářečský inspektor – inženýr (EWI-E)
- b) Evropský svářečský inspektor – technolog (EWI-T)
- c) Evropský svářečský inspektor – specialista (EWI-S)
- d) Evropský svářečský inspektor – praktik (EWI-P)

Získání předepsané kvalifikace je možné dvěma způsoby:

- 1) Při splnění vstupních podmínek pro příslušnou úroveň, absolvování modulu technologie svařování s průběžnou zkouškou, absolvování modulu inspekce svařování a závěrečnou zkoušku.
- 2) Držitelé kvalifikace EWF (diplom EWE, EWT, EWS nebo EWP) mohou postoupit přímo do modulu inspekce svařování příslušné úrovně).

Kurzy a zkoušky svářečského inspekčního personálu jsou řízeny národními autorizovanými institucemi (ANB) a zajišťovány v akreditovaných výukových místech (ATB), splňujících podmínky uvedené směrnice. Absolventi, kteří úspěšně složí zkoušku, obdrží od ANB EWF evropský diplom s odpovídajícím titulem.

Do konce roku 2001 platí přechodová ustanovení k udělení diplomu Evropského svářečského inspekčního personálu. Žadatel musí ANB prokázat, že kombinace jeho vzdělání, výcviku a praxe poskytuje úroveň znalostí ekvivalentní znalostem předepsaným v příslušné směrnici. Pokud, dle úsudku ANB, nemá žadatel odpovídající úroveň formálního výcviku v oblasti technologie nebo inspekce svařování, bude od něj požadováno, aby se podrobil profesnímu přezkoumání.

Profil absolventů jednotlivých úrovní vzdělání:

- 1) *Evropský svářečský inspektor – praktik* je způsobilý provádět inspekční činnost na úrovni dílny, např. jako dílenský svářečský kontrolor.
- 2) *Evropský svářečský inspektor – specialista* je způsobilý provádět inspekční činnost na úrovni provozu, např. jako vedoucí svářečský kontrolor.
- 3) *Evropský svářečský inspektor – technolog* je způsobilý provádět inspekční činnost na úrovni podniku, jako inspekční orgán při schvalování WPS, průkazů způsobilosti apod.

- 4) *Evropský svářečský inspektor – inženýr* je způsobilý vést inspekční týmy a provádět inspekční činnost na nejvyšší úrovni.

Literatura

Zákon 22 /1997 Sb.

ČSN EN 719 (05 0330): Svářečský dozor - Úkoly a odpovědnosti.

ČSN EN 288: Stanovení a schvalování postupů svařování kovových materiálů.

ČSN EN 25 817: Svarové spoje ocelí zhotovené obloukovým svařováním – Směrnice pro určování stupňů jakosti

ČSN EN 287 – 1:1995/ A1:1998 (05 0711) Svařování - Zkoušky svářečů - Tavné svařování - Část 1: Ocel

ČSN EN 1418 (05 0730): Svářečský personál – Zkoušky svářečských operátorů pro tavné svařování a seřizovačů odporového svařování pro plně mechanizované a automatizované svařování kovových materiálů

Nařízení vlády č.: 170/1997 Sb., 173/1997 Sb., 175/1997 Sb., 177/1997 Sb., 178/1997Sb., 174 /1998 Sb., 15/1999 Sb., 78/1999 Sb., 80/1999 Sb., 81/1999 Sb.

Směrnice EWF a IIW

BARTÁK, J.: Vzdělávání, zkoušky a certifikace personálu, podílejícího se na výrobě svařovaných konstrukcí v České republice. Zváranie 48, č.6/99.

Poznámky: