



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ ŽÁRUPEVNÝCH OCELÍ METODOU APT

WELDING OF HEAT RESISTING STEELS BY SMAW

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Markéta ŽEMLOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav DANĚK, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Markéta Žemlová

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Svařování žárupevných ocelí metodou APT

v anglickém jazyce:

Welding of heat resisting steels by SMAW

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Žárupevné oceli používané v energetickém strojírenství jsou svařitelné většinou jen při dodržení předepsaných technologických podmínek závislých na jejich chemickém složení a svařované tloušťce. Práce se bude zabývat především stanovením teploty předehřevu a výběrem přídatných materiálů.

Cíle bakalářské práce:

Rozdělení žárupevných ocelí podle pracovní teploty. Mechanizmy zvýšení žárupevnosti. Svařitelnost jednotlivých typů ŽP ocelí. Svařování APT, specifické vnesené teplo. Svařování do úzké mezery. Porovnání svařování APT se svařováním svazkem elektronů.

Seznam odborné literatury:

Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Ostrava : Zeross, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.

Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. 1. vyd. Ostrava : Zeross, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.

Příručka pro svařování pod tavidlem. ESAB Vamberk, spol. s r.o. 2009. 94 s.

Katalog přídavných materiálů pro svařování. 4. přepracované a doplněné vydání.

Vamberk: ESAB Vamberk, květen 2011.

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

ŽEMLOVÁ Markéta: Svařování žárupevných ocelí metodou APT

Bakalářská práce se zabývá problematikou žárupevných ocelí. Následně rozebírá metodu automatického svařování pod tavidlem a teplotní vlivy během svařování. V praktické části se řeší návar z oceli 26NiCrMo14 – 5, který je navařen s předehřevem elektrickým obloukem pod tavidlem OP 121 TTW drátem TOPCORE 745 B. Následně je návar porovnán s návarem bez předehřevu.

Klíčová slova: ocel 26NiCrMo14 – 5, mechanismy zpevnění, svařovací parametry, tavidlo OP 121 TTW, drát TOPCORE 745 B

ABSTRACT

ŽEMLOVÁ Markéta: Welding of heat resisting steels by SMAW

The bachelor thesis deals with heat resistant steels. Then analyzes the method of automatic submerged arc welding and thermal impacts during welding. In the practical part solves weld overlay of steel 26NiCrMo14 - 5, which is welded with preheating arc under flux OP 121 TTW wire TOPCORE 745 B. Then the weld deposit compared with no preheating weld.

Keywords: steel 26NiCrMo14 – 5, strengthening mechanisms, welding parameters, flux OP 121 TTW, wire TOPCORE 745 B

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽEMLOVÁ, Markéta. *Svařování žárupevných ocelí metodou APT*. Brno, 2014. 34s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Svařování žárupevných ocelí metodou APT** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

30.5.2014

Datum

Bc. Markéta Žemlová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat panu docentu Daňkovi za věcné připomínky při konzultacích a za vyčerpávající odpovědi na mé zvědavé otázky.

Dále bych chtěla poděkovat nejbližším nejen za finanční, ale hlavně za psychickou oporu. A doufám v jejich podporu i v navazujícím studiu.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
Úvod	9
1 Žárupevné materiály	10
1.1 Procesy tečení	10
1.2 Mechanismy zpevnění	10
1.2.1 Precipitační zpevnění	11
1.2.2 Substituční zpevnění	12
1.3 Degradací procesy	13
1.4 Rozdělení žárupevných ocelí podle pracovních teplot	14
1.4.1 Nelegované, uhlíkové oceli	14
1.4.2 Nízkolegované oceli	14
1.4.3 Feritické Cr oceli	15
1.4.4 Austenitické oceli	15
1.5 Svařitelnost jednotlivých typů žárupevných ocelí	15
2 Svařování metodou APT	17
2.1 Technologické parametry svařování	17
2.2 Přídavné materiály pro svařování	20
2.2.1 Tavidla	20
2.2.2 Svařovací dráty	21
2.3 Varianty svařování pod tavidlem	23
2.4 Porovnání svařování APT se svařováním svazkem elektronů	27
3 Teplotní vlivy během svařování	28
3.1 Tepelně ovlivněná oblast	28
3.2 Specifické vnesené teplo	28
3.3 Předehřev materiálu	29
4 Praktická část	31
4.1 Porovnání návaru s předehřevem a bez předehřevu	33
Závěry	34
Seznam použitých zdrojů	35
Seznam použitých symbolů a zkratk	37
Seznam obrázků	39
Seznam tabulek	39

ÚVOD [1]

Strojírenství jako celek zahrnuje řadu rozmanitých oborů. Názorně lze jimi projít pomocí cesty výrobku celý procesem. Zrod výrobku začíná v ruce konstruktéra, jež se společně s průmyslovým designérem podílejí na prvních virtuálních či vizuálních modelech. Virtuální modely se následně testují pomocí různých výpočtových analýz v ruce matematických a konstrukčních inženýrů. Následně se ve společných rukou technologů a vývojářů virtuální modely mění na první prototypy výrobku. Právě díky technologům dostává výrobek první reálné tvary. První krůčky ke konečné výrobě začínají právě u nich. Ve výrobě jsou též důležité ruce odborníků z kvality, kteří kontrolují správné parametry výrobku a tak pomáhají technologům v optimalizaci výroby.

Technologové mají k dispozici různé technologie výroby. Mezi hlavní výrobní technologické celky patří odlévání, svařování, tváření a obrábění. Jednou z výrobních technologií je svařování, kterým se zabývá tato bakalářská práce.

Problematika svařování je řešena již od 19. století. Od té doby až po současnost prošlo svařování dynamickým rozvojem. V současnosti dělíme svařovací způsoby na tavné a tlakové. Mezi tavná svařování řadíme svařování elektrickým obloukem. A jedním ze způsobů svařování elektrickým obloukem je právě automatické svařování pod tavidlem (APT). Tento způsob je vhodný i pro svařování žárupevných ocelí, které mají svá specifika, co se týče dodržení svařovacích parametrů.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou žárupevných ocelí, jejich svařitelností, teplotami předehřevu a výběrem přídavných materiálů.



Obr. 1 - Ukázky svařování [25][27][30]

1 ŽÁRUPEVNÉ MATERIÁLY [1][4][21][22][23][33]

Žárupevné materiály jsou materiály odolné vůči namáhání za vysokých teplot, tzv. pevnost při ceepeovém namáhání.

Žárupevné materiály se používají k práci za vysokých a zvýšených teplot. Tyto teploty se řadí do oblasti creepového namáhání. Využití těchto materiálů je mimo jiné v tepelné energetice, pro výrobu membránových stěn kotlů, potrubních systémů, těles turbín a navařování nátrubků na komory.

1.1 Procesy tečení [1][4][33]

Proces tečení se u kovových materiálů projeví při působení konstantního napětí při konstantní teplotě T_c , která přesahuje 40% teploty tavení. [1]

Proces tečení neboli creep se dělí na tři stadia, jak lze vidět na obrázku 2. První stádium se projevuje nárůstem deformací při zatížení za krátké časové období. Ve druhém stadiu dislokace rostou lineárně, ale jejich nárůst je pomalejší a výrazně delší než u prvního stádia. V posledním, tedy třetím, stadiu dochází k intenzivnímu poškozování vnitřní struktury kovu, které vede k prudkému nárůstu deformace a následnému lomu.

Pro technickou praxi je podstatné především druhé stadium tečení, které se používá jako doba provozu navrhovaného zařízení a je základním ukazatelem žárupevnosti u konkrétního materiálu. Předpokladem žárupevných materiálů je spolehlivý provoz zařízení, při dané mezi kluzu po dobu 10^4 , 10^5 až $2 \cdot 10^5$ provozních hodin. [1]

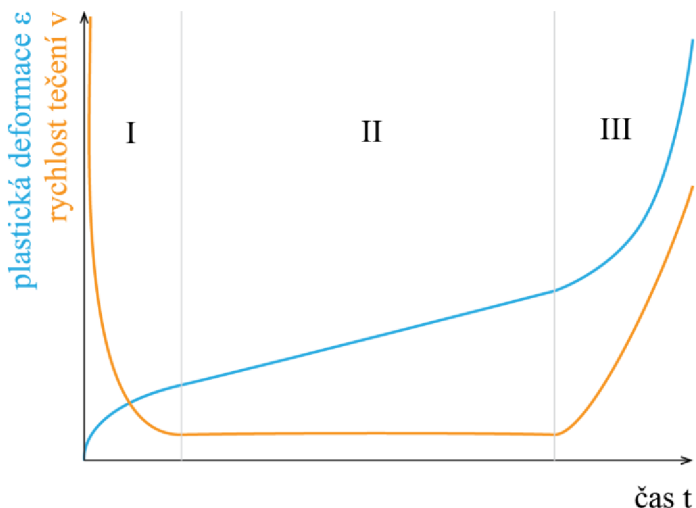
Obrázek 2 zobrazuje zkušeni tyč namáhanou stálým napětím, u tyče zatěžované stálým zatížením se druhé stadium může projevit pouze jako inflexní bod. Deformaci v okolí inflexního bodu, tedy i deformaci v celé oblasti druhého stadia tečení, lze popsat vztahem (1.1).

$$\varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1.1)$$

kde je ε [-] deformace,
 $d\varepsilon$ [-] přírůstek deformace,
 dt [-] časový interval.

1.2 Mechanismy zpevnění [1][21][22][23]

Odolnost proti tečení v žárupevných ocelích způsobují mechanismy zpevnění. Mezi druhy zpevnění při teplotách nad 20°C patří dislokační zpevnění R_D , precipitační zpevnění R_P , zpevnění tuhého roztoku neboli substituční zpevnění R_S a třecí napětí mřížky R_{P-N} (Pierls-Nabarrovo napětí). Největší vliv na žárupevné oceli mají faktory precipitačního a substitučního zpevnění. [22] Ve vzorcích (1.2), (1.3), (1.4) a (1.5) jsou znázorněna jednotlivá zpevnění. Respektive jsou v nich znázorněny veličiny, na nichž závisí funkce jednotlivých zpevnění.



Obr. 2 - Graf tečení[33]

$$R_D = f_1 \left(\rho^{\frac{1}{2}} \right), \quad (1.2)$$

$$R_p = f_2 \left(l_1^{-1} \right), \quad (1.3)$$

$$R_s = f_3 \left(x_\alpha \right), \quad (1.4)$$

$$R_{p-N} \approx 40 \text{ MPa}, \quad (1.5)$$

kde je ρ [m^{-2}] střední hustota dislokací,
 l_1 [mm] střední vzájemná vzdálenost částic vytvrzujících fází,
 x_α [%] obsah legujících prvků rozpuštěných v tuhém roztoku.

U oceli 0,5 Cr – 0,5 Mo – 0,3 V (15128) působí ke krátkodobé mezi kluzu precipitační zpevnění z cca 44%, dislokační zpevnění asi z 30% a substituční zpevnění tuhého roztoku asi z 15%. [22]

1.2.1 Precipitační zpevnění [1][21][22]

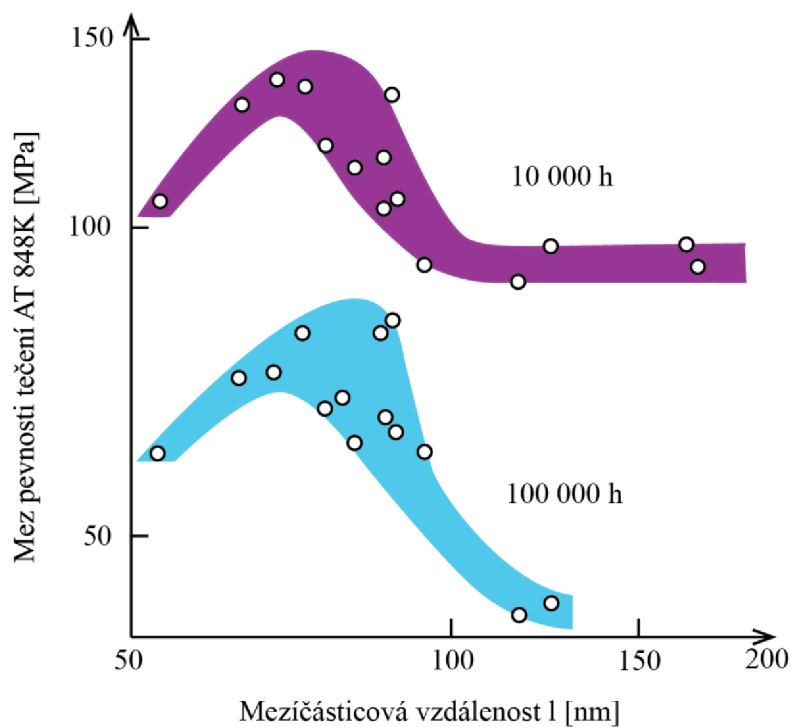
Precipitačního zpevnění se dosahuje pomocí částic velmi jemnozrnného precipitátu ve struktuře. Precipitáty jsou karbidy, karbonitridy, nitridy prvků chromu, molybdenu, vanadu a niobu. U nízkolegovaných ocelí (CrMo, CrMoV) a feritických Cr ocelí se takto využívají tvrdé karbidy Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , Mo_2C , V_4C_3 , NbC. U austenitických ocelí se tvoří jemné disperze karbidu a karbonitridů (při jejich legování dusíkem). Tyto částice brání v pohybu dislokací pomocí tak zvaného Orowanova mechanismu.

U precipitačního zpevnění se hodnotí vzájemná vzdálenost částic precipitátu. Pokud je vzájemná vzdálenost jednotlivých částic precipitátu l_{ef} menší než velikost subzrn, je rychlost tečení přímo úměrná třetí mocnině vzdálenosti částic ($\epsilon_s \sim l_{ef}^3$). [22] Když však vzájemná vzdálenost jednotlivých částic je rovna nebo větší, jak velikost subzrn, pak rychlost tečení je nezávislé na vzájemných vzdálenostech částic a žárupevnost oceli je závislá pouze na substitučním zpevnění tuhého roztoku.

V případě, že je precipitační zpevnění určeno jednou fází, lze vzdálenost jednotlivých částic určit pomocí vztahu (1.6). [21][22]

$$l_2 = \frac{1}{2} (n_v \cdot d)^{\frac{1}{2}} - \sqrt{\frac{2}{3}}, \quad (1.6)$$

kde je l_2 [mm] vzdálenost jednotlivých částic,
 n_v [-] počet částic v jednotce objemu,
 d [mm] střední průměr částic.



Obr. 3 - Vliv vzájemné střední vzdálenosti [1]

Pojem efektivní vzájemná vzdálenost l_{eff} je zavádí v případě, že je precipitační zpevnění určeno pomocí dvou fází, které mají rozdílně veliké částice (např. v oceli 9Cr 1Mo 0,3V 0,003N částice $M_{23}C_6$ a VN). Její výpočet se provádí pomocí vztahu (1.7). [21][22]

$$\frac{1}{l_{eff}} = \frac{1}{l_e} + \frac{1}{l_s}, \quad (1.7)$$

kde je l_{eff} [mm] efektivní vzájemná vzdálenost,
 l_s [mm] vzájemná vzdálenost malých částic (př. VN částice),
 l_e [mm] vzájemná vzdálenost velkých částic (př. $M_{23}C_6$ částice).

Zmenšením vzájemné vzdálenosti precipitačních částic dojde ke zvýšení pevnosti při tečení a tím ke snížení rychlosti creepové deformace i ke zvýšení mezek kluzu za normální teploty. Vliv vzájemné vzdálenosti částic na mez pevnosti při tečení nízkolegované CrMoV žárupevné oceli 15 128 můžeme vidět na obrázku 3.

1.2.2 Substituční zpevnění

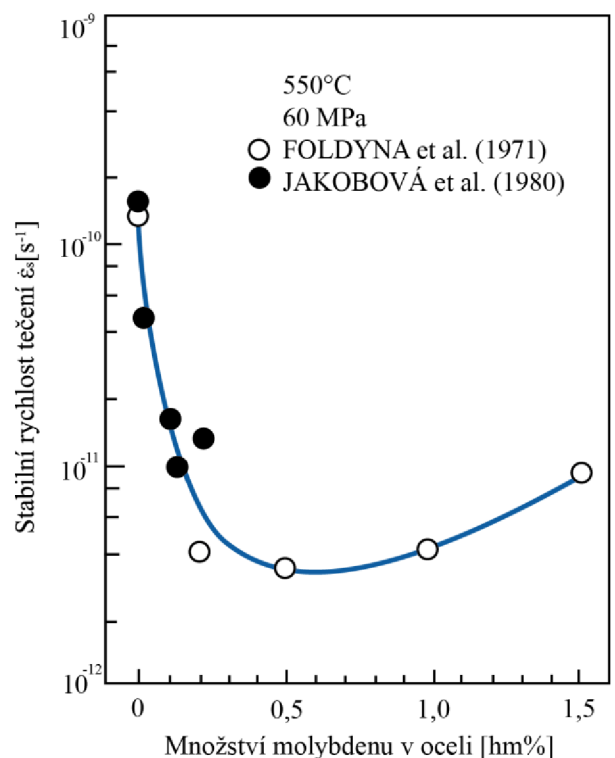
Jedná se o zpevnění struktury materiálu pomocí prvků s velkým atomovým poloměrem. Creepové deformaci brání v pohybu dislokací právě deformace mřížky se substitučními atomy. V žárupevných ocelích se využívá molybden a wolfram. Množství legujícího prvku by však nemělo překročit mez rozpustnosti při pracovní teplotě. V případě, že se tato mez překročí, dochází k vylučování prvků do formy karbidů nebo interkrystalických fázích, které následně odolnost vůči tečením snižují.

U 9% Cr ocelí modifikovaných molybdenem je na obrázcích 4 a 5 vidět, že obsah molybdenu do 1% příznivě ovlivňuje creepovou pevnost při teplotách 550°C a časech 10^5 hodin. Obsahuje-li ocel wolfram i molybden současně, je zpevnění tuhého roztoku závislé na molybdenovém ekvivalentu Mo_{eq} .

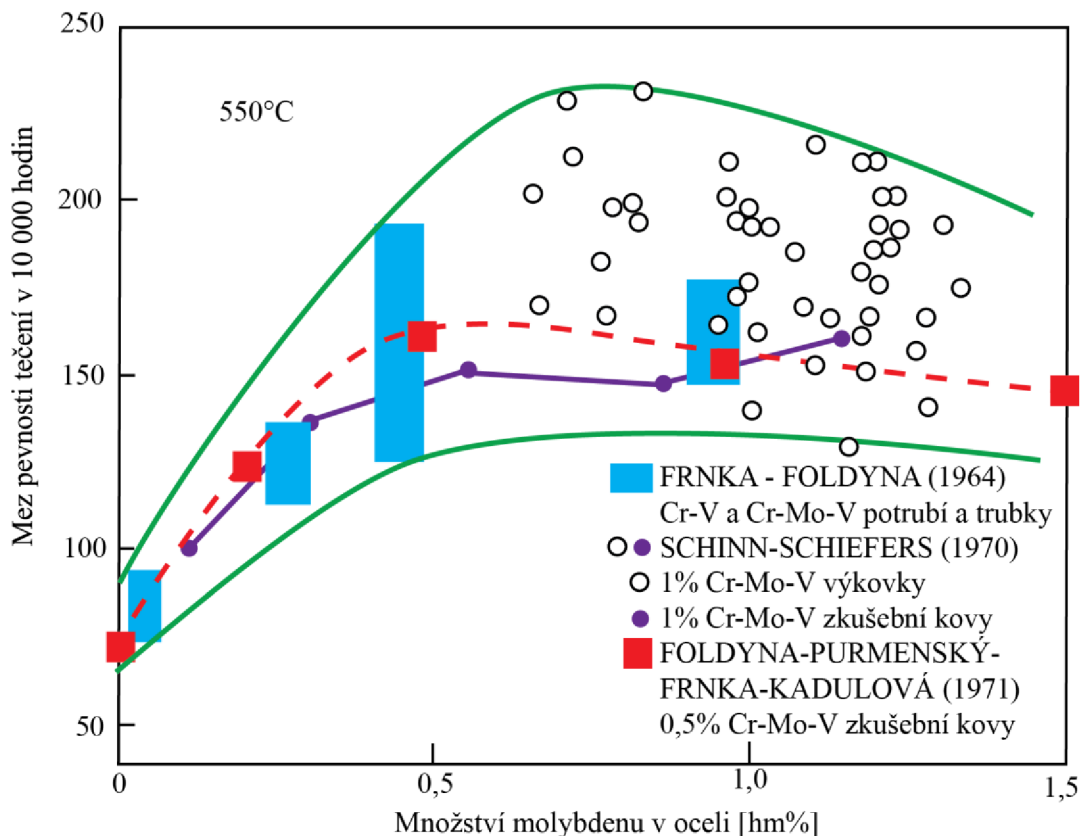
$$Mo_{eq} = Mo + 0,5 \cdot W, \quad (1.8)$$

kde je Mo_{eq} [%] molybdenový ekvivalent.

Lepší žárupevné vlastnosti jsou u chromové oceli (9% až 12%) legované dusíkem. [22] Mez pevnosti při tečení závisí na obsahu volného dusíku, jenž není vázán na atomy hliníku, titanu či niobu a tvoří částice nitridu vanadu VN.



Obr. 4 – Vliv obsahu Mo na rychlost tečení [22]



Obr. 5 – Vliv Mo na mez pevnosti při tečení u CrMoV ocelí [22][23]

1.3 Degradační procesy [10][21][22][23]

Dlouhodobé působení vysokých teplot při napět'ovém či silovém zatížení vede k difúzním pochodům ve struktuře žárupevných ocelí a tím vznikají degradační procesy, které způsobuje snížení mechanismů zpevnění.

Snížení precipitačního zpevnění způsobuje hrubnutí sekundárních fází nebo pokles počtu jemných částic disperzních fází, které se ovšem rozpouští v jiných sekundárních fázích. Hrubnutí karbidu, karbonitridu či nitridu se projevuje rozpouštěním malých částic ve prospěch růstu částic velkých v matici tuhého roztoku. Tím dochází k prodlužování vzdáleností mezi jednotlivými částicemi a k poklesu precipitačního zpevnění.

Konstanta rychlosti hrubnutí sekundárních fází je určena vztahem 1.9. [21][22]

$$K_d = \frac{d^3 - d_0^3}{t}, \quad (1.9)$$

kde je K_d [-] konstanta rychlosti hrubnutí sekundárních fází,
 d [mm] střední průměr částic v čase t ,
 d_0 [mm] střední průměr částic v čase $t = 0$.

Teplotní závislost konstanty K_d se vyjadřuje vztahem 1.10. [21][23]

$$K_d = K_o \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right), \quad (1.10)$$

kde je Q [J] aktivační energie hrubnutí.

V žárupevných ocelích se pro zlepšení žárupevných vlastností používají výše zmiňované prvky molybden a wolfram. Při pracovní teplotě však žárupevné oceli obsahují těchto prvků mnohem více, než je obsah daných prvků v tuhém roztoku v rovnovážném stavu při pracovní

teplotě. To vede k vylučování molybdenu a wolframu do formy karbidů, a tím i ke snižování substitučního zpevnění tuhého roztoku.

Energetické zařízení stráví většinu své životnosti (100 000 až 200 000 hodin) s menším obsahem Mo a W v tuhém roztoku. [22] Na základě zkoušek prováděných v rozsahu do 10 000 hodin nelze vnímat naměřené hodnoty jako konečné. Při dlouhodobějších zkouškách mez pevnosti při tečení klesá.

1.4 Rozdělení žárupevných ocelí podle pracovních teplot [1][11][23]

Žárupevné oceli se mimo jiné využívají ke stavbě energetických zařízení, kde musejí vydržet v oxidačním prostředí vodních par a spalín. Žárupevné oceli můžeme dělit podle tabulky 1.

Pro vhodnou volbu žárupevné oceli do tohoto prostředí se musí zvážit teplota prostředí, pevnostní charakteristiky při zvýšených teplotách a žáruvzdornost oceli. Měla by se brát v úvahu i dostupnost oceli, množství a druh (tvar) požadovaného výrobku. Při zvolení legovanější oceli je nutné počítat se zvýšenou cenou a náročnějším zpracováním.

Tabulka 1 - Rozdělení žárupevných ocelí dle teplot [1][23]

Druh oceli	Třída oceli	Maximální teplota využití
Nelegovaná uhlíková ocel	10, 11, 12	480°C
Nízkolegovaná ocel	15	580°C
Feritická Cr ocel	17	650°C
Austenitická CrNi ocel	17	750°C

Pro teploty vyšší jak 750°C (800°C) se již nepoužívají slitiny železa. Pro teploty do 900°C se využívají slitiny na bázi niklu, pro vyšší teploty slitiny na bázi wolframu, molybdenu a při teplotách nad 1200°C slitiny niobu.

1.4.1 Nelegované, uhlíkové oceli

Nelegované oceli jsou oceli s obsahem uhlíku do cca 2%. Mají jemnozrnnou strukturu a obsahují nízké procento hliníku. Používají se do teplot 450°C. Dobré příklady těchto ocelí jsou oceli: 11 483, 12 021, 12 022. Zajímavá je pak ocel 12 025, která je legovaná 0,02 až 0,05 hmotnostními procenty niobu a vydrží teploty až 500°C.

1.4.2 Nízkolegované oceli

Skupina nízkolegovaných ocelí je nejrozšířenější skupinou žárupevných ocelí. [11] Její využití je zejména v trubkových a směšovacích systémech do teplot 580°C a z hlediska hmotnostního představují největší podíl ve výrobě žárupevných ocelí jako celku.[1]Žárupevnost nízkolegovaných ocelí záleží na míře legujících prvků Mo a V. Tyto prvky ji příznivě ovlivňují zejména vysokým precipitačním zpevněním struktury a částečně i substitučním zpevněním. Při dlouhodobé vysokoteplotní expozici má však na žárupevnost vliv její strukturální stabilita, zejména termodynamická i rozměrová stálost přítomných karbidových částic.

Nízkolegované oceli jsou na bázi CrMo nebo CrMoV. Nejvíce rozšířenou nízkolegovanou ocelí na bázi CrMo se stala ocel 15 313 (2,25Cr – 1Mo), která se původně využívala v chemickém a následně i v energetickém průmyslu. Díky vysokému obsahu legujících prvků byla však drahá, a proto byla nahrazena CrMoV ocelmi. Největší zástupce CrMoV ocelí je ocel 15 128 (0,5Cr – 0,5Mo – 0,25V), která je vhodná pro technologie svařování i pro technologie tepelného zpracování. Dalšími ocelmi této skupiny jsou vodíku vzdorné 15 313 a 15 421 (3Cr – 0,5Mo – 0,5V). Ocel 15 236 (1,5Cr-0,5Mo-0,6V) používaná např. na svorníky a rotory turbín, ocel 15 320 (1,5Cr – 0,5Mo – 0,6V) používaná mimo jiné na rotory a skříně turbín a ocel 15 423 (3Cr – 0,5Mo – 0,5V), která nahradila těžkoobrobitelné oceli s wolframem.

1.4.3 Feritické Cr oceli

Oceli se zvýšeným obsahem chrómu jsou známy jako feritické Cr oceli. Zmíněný obsah chrómu v nich začíná na obsahu 5 hm. % (např. u oceli 17 102). Pro řádově vyšší žárupevnost se používá legování 9-12 hm. % Cr s malými obsahy Mo (do 1 hm. %) a V (do 0,5 hm. %).

Důležitými ocelmi této skupiny jsou vodíku vzdorné oceli 17 116 (9Cr – 1Mo) a 17 117 (9Cr - 1Mo – 0,5 V). Typickými feritickými ocelmi jsou ocel 17 134 (12Cr - 1Mo – 0,5V) a ocel 17 119 (9Cr – Mo – V – Nb – N) známá pod názvem P91. Ocel P91 má díky molybdenu dobré vytvrzení tuhého roztoku a precipitačně je zpevněna pomocí jemného precipitátu na bázi karbonitridů vanadu a niobu. Díky těmto vlastnostem může konkurovat výrazně dražším austenitickým CrNi ocelím. Efektivní využití této oceli je do teplot 600°C a příkladem využití jsou tepelné bloky s výstupní teplotou páry 593°C.

1.4.4 Austenitické oceli

Austenitické oceli jsou oceli na bázi železa s nejvyšší odolností vůči tečení za vysokých teplot. Žárupevnost u těchto ocelí je na principu snadné tvorby tzv. vrstvených chyb, které znemožňují dislokacím skluzový pohyb a zúžení. Pro další pohyb dislokací je třeba výrazně navýšit napětí. Nevýhoda austenitických ocelí je vyšší cena nejen díky vysokým obsahům Cr a Ni, ale také kvůli následnému obtížnému technologickému zpracování.

Základní austenitickou ocelí je CrNi ocel 18/8 bez dodatečného legování. Příkladem je 17 246 (1Cr 18Ni 8Ti), tato ocel má využití do teplot 620°C. Dalšími příklady jsou komplexně legované vytvrzitelné oceli s legujícími prvky Mo, Nb, N a se zvýšenými obsahy 21 hm. % Cr a 13 hm. % Ni, př. 17 246 (1Cr 17Ni 13Mo). Teplotní využití těchto ocelí je až 650 – 700°C. Posledními typy jsou oceli s různými dalšími legujícími prvky, například V, W, B, Nb, Al, Ce a dalšími, pomocí těchto prvků můžeme dosáhnout teplot až 750°C. Vysoká žárupevnost je docílena pomocí speciální technologie výroby, spočívající nejprve v rozpouštěcím žitání, následném ochlazení ve vodě a konečném vytvrzování při teplotách 700-780°C, při němž vznikají interkrystalické fáze (př. Ni₃, Al, Ti), speciální karbidy a karbonitridy vanadu, wolframu a niobu. Příkladem může být ocel 17 335 (12Cr 15Ni 35W 3Ti).

1.5 Svařitelnost jednotlivých typů žárupevných ocelí [1][15]

Obecný pojem svařitelnosti znamená, zda se ocel svaří snadno bez následných trhlin a svar má stejné vlastnosti jako základní materiál anebo po svaření vzniknou ve svarovém kovu trhliny za horka či v jeho okolí vznikne mezikrystalová koroze.

Uhlíkové kotlové oceli jsou oceli se strukturou na bázi slitin železa a uhlíku. Svařitelnost i cenová dostupnost těchto ocelí je dobrá. Oceli na bázi železa a uhlíku se využívají v normalizovaném a popouštěném stavu.

Nízkolegované žárupevné oceli jsou svařitelné za dodržení určitých podmínek. Proto dodržení pracovních postupů (tepleného příkonu, zvolených přehřevů, dohřevů aj.) a následného tepelného zpracování je pro dobrou svařitelnost nezbytnou podmínkou. Při nedodržení těchto podmínek hrozí různá znehodnocení svarového kovu i tepelně ovlivněné oblasti. Příkladem může být příliš rychlé ochlazování v okolí svaru, čímž vzniká nevhodná precipitace tvrdých disperzních fází nebo křehké vrstvy. U větších tloušťek je nutno dodržet teplotu přehřevu po celou dobu svařování, při nedodržení teploty přehřevu vzniká v materiálu transformační pnutí následované vznikem trhlin. Důležité je rovněž správně zvolit a následně dodržet popouštěcí teploty za oblastí maxima sekundárního vytvrzování. Nevhodné teploty způsobují precipitaci částic jemné disperze karbonitridických částic, a tím i k poklesu vrubové houževnatosti.

Svařitelnost feritických ocelí je nepříznivě ovlivněna vyšším obsahem legujících prvků. Avšak za dodržení technologických postupů se mohou svařovat i velké tloušťky. V případě feritických chromových ocelí se dbá na výběr přídatných materiálů, aby chemické a strukturní složení svaru bylo velmi podobné základnímu materiálu. U svařování se sledují

zejména předehřevy, dohřevy, geometrie svaru, sušení přídavných materiálů, tepelný příkon, způsob vedení, rychlost svařování apod. Po svařování je nezbytné následné tepelné zpracování.

Austenitické oceli obsahují velké množství legur, tím stoupá i jejich cena a obtížnost zpracování. Díky jednotvárné sktraktuře gama mřížky se v materiálu nevytváří transformační pnutí. V oblasti svarového spoje vznikají vysoká tepelná pnutí, která se vytváří kvůli malé tepelné vodivosti a velké tepelné roztažnosti materiálu. Samotné svařování austenitických ocelí obvykle nevyužívá předehřevu. Používané přídavné materiály jsou na stejné bázi jako základní materiál a často obsahují vysokou koncentraci niklu. Tepelné zpracování spočívá rozpouštěcím žíhání a následným kalením do vody, u vytvrzitelných ocelí se pro zvýšení žárupevnosti ve svarovém kovu využívá vytvrzovací režim při teplotách okolo 750°C.

U energetických zařízení se hojně využívá kombinovaných svarových spojů kvůli rozdílným teplotním expozicím používaným na produktu. Zatímco u spojů ocelí tříd 12 a 15 nejsou velké obtíže při svařování. Ve spojení ocelí tříd 15 a 17 pochází po dlouhodobém užívání k poklesu žárupevných vlastností. Příčinou tohoto poklesu je ztráta stability a následný rozpad karbonitridických částic u nízkolegované oceli a následný pohyb částic uhlíku přes svarový spoj do legovanější oceli. Tomuto jevu lze předejít návarem niklové vrstvy na jednu z návarových hran ve svaru, čímž se vytvoří účinná zábrana proti difuzi atomů uhlíku.

2 SVAŘOVÁNÍ METODOU APT [6][7][12][14][35]

Metoda svařování elektrickým obloukem pod tavidlem se řadí mezi tavné způsoby svařování. Při tomto způsobu samotné svařování i svarový kov chráněn vrstvou tavidla, které se částečně rozpustí, vytvrdne a vznikne struska, zbytek tavidla se následně vysaje zpět do zásobníku. Tato metoda byla vytvořena se záměrem zvýšení množství odtavovaného svarového kovu, což je jednou z výhod svařování pod tavidlem.

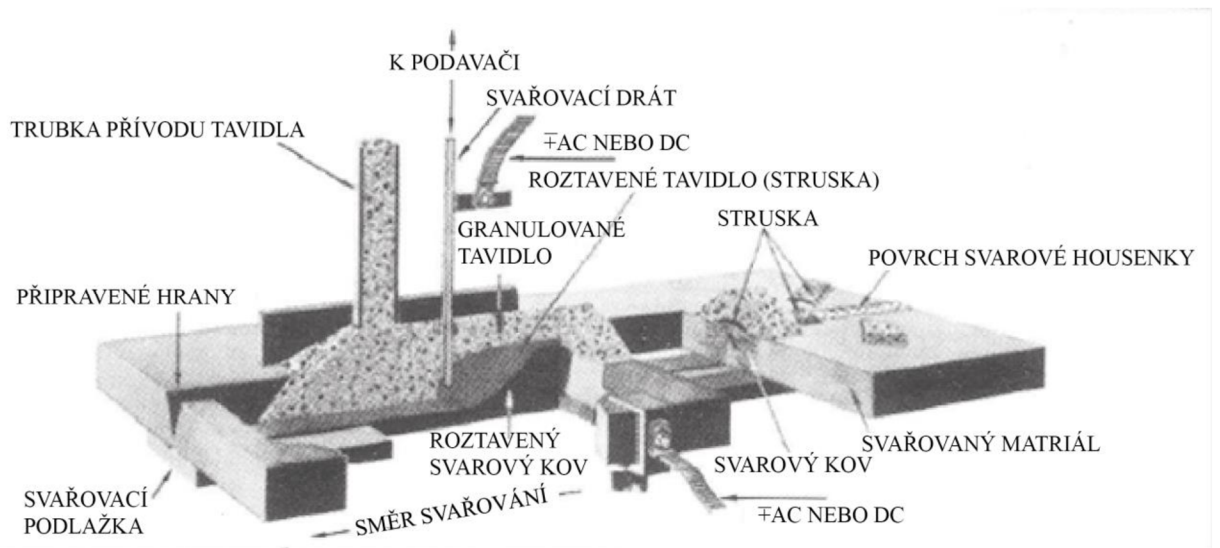
Výhody svařování pod tavidlem:

- Vysoká kvalita svařování i svarů
- Vysoká produktivita svařování (2 až 5 krát vyšší než u obalované elektrody) [12]
- Velký průvar do základního materiálu
- Velká proudová hustota při tenkých svařovacích drátech
- Možnost snížení velikosti koutových svarů (oproti ručnímu svařování elektrickým obloukem až o 25%) [12]
- Minimální nebezpečí vzniku zápalů a pomezity svarového kovu
- Malé nebezpečí studených spojů vzhledem ke stálému průvaru
- Vysoký výkon navaření
- Vysoká tepelná účinnost
- Žádné tepelné zatížení okolí (svářeč bez ochranných pomůcek)
- Malé tepelné ztráty a malý rozstřík svarového kovu

Nevýhody a omezení u svařování pod tavidlem:

- Zvýšené nároky na přípravu svarových ploch, jejich čistotou, podložení svaru
- Široká tepelně ovlivněná oblast
- Polohy svařování PA, PB výjimečně PC
PA – vodorovná shora, PB – vodorovná šikmo shora, PC vodorovná
- Zakrytý svařovací proces - obtížnost kontroly
- Minimální ekonomická délka je 1 000 mm [12]

Princip metody automatického svařování pod tavidlem je znázorněn na obrázku 6.



Obr. 6 - Princip metody APT [7]

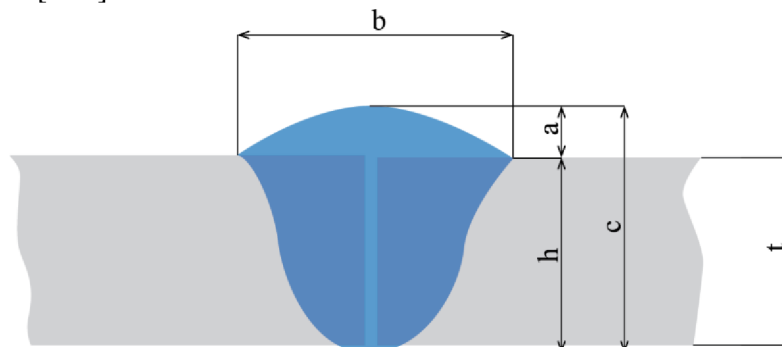
2.1 Technologické parametry svařování

Parametry ovlivňující tvar svaru se nazývají technologické. Především se jedná o hloubku průvaru do základního materiálu h , převýšení a , šířku svaru b a součinitel formy svaru ϕ . Některé tyto parametry jsou znázorněny na obrázku 7.

Výpočet součinitele svaru se počítá podle vzorce (2.1).

$$\phi = \frac{b}{h}, \quad (2.1)$$

kde: je ϕ [-] součinitel formy svaru, převýšení,
 a [mm] šířka svaru,
 b [mm] výška svaru,
 c [mm] hloubka průvaru do základního materiálu,
 h [mm] tloušťka svařovaného materiálu.
 t [mm]



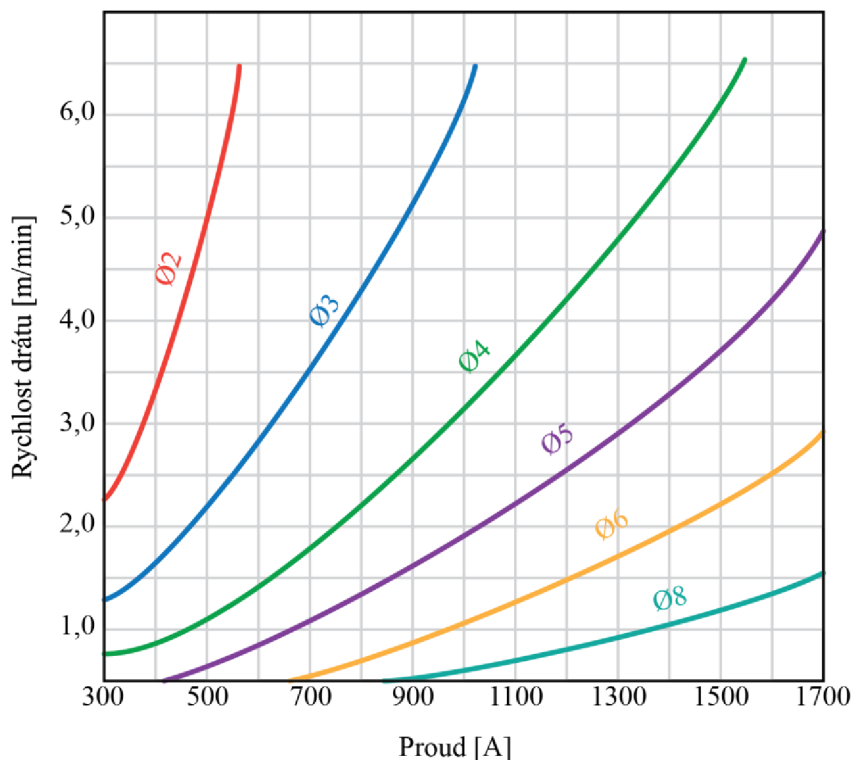
Obr. 7 - Rozměry svaru [12]

Největší vliv na rozměry a formu svaru má množství tepla z elektrického oblouku uvolněného do svaru. Elektrický oblouk je ovlivňován především svařovacím proudem I (A), napětím na oblouku V (U) a rychlostí svařování v_s (mm/s). Následné mírné ovlivnění svaru může též způsobit průměr svařovacího drátu (mm), sklon elektrody ($^\circ$), sklon základního materiálu ($^\circ$), charakter a polarita svařovacího proudu a také druh a zrnitost tavidla.

Vliv svařovacího proudu

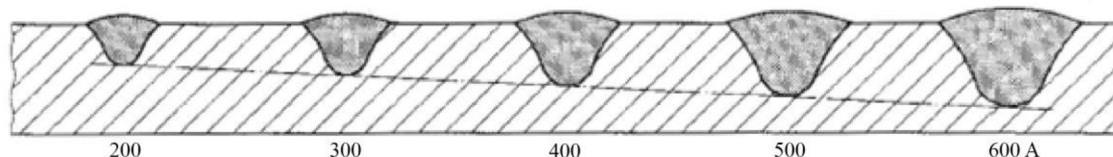
Při svařování vyšším proudem působí na tavnou lázeň vyšší tlak (jedná se o tlak hydrostatický i tlak plynů a par z oblasti oblouku). Díky tomuto tlaku roste hloubka závaru v základním materiálu při stejné šířce závaru. Svařovací proud přímo ovlivňuje také snížení součinitele formy svaru, jak lze vidět na obrázku 8, kde byla použita svařovací rychlost 6,67 mm/s a napětí bylo 30 až 32 V.

Na obrázku 8 je zobrazen graf, který znázorňuje, jak zvýšením proudu stoupá i množství odtavovaného materiálu. Pro zvýšení proudu a svařovacího napětí lze oblouk prodloužit.



Obr. 8 - Graf závislosti odtavování materiálu na průměru drátu [6]

Na obrázku 9 je vidět vliv změny hodnot svařovacího proudu na změnu formy svaru ϕ .



Obr. 9 - Vliv změny hodnoty svařovacího proudu na změnu formy svaru [7]

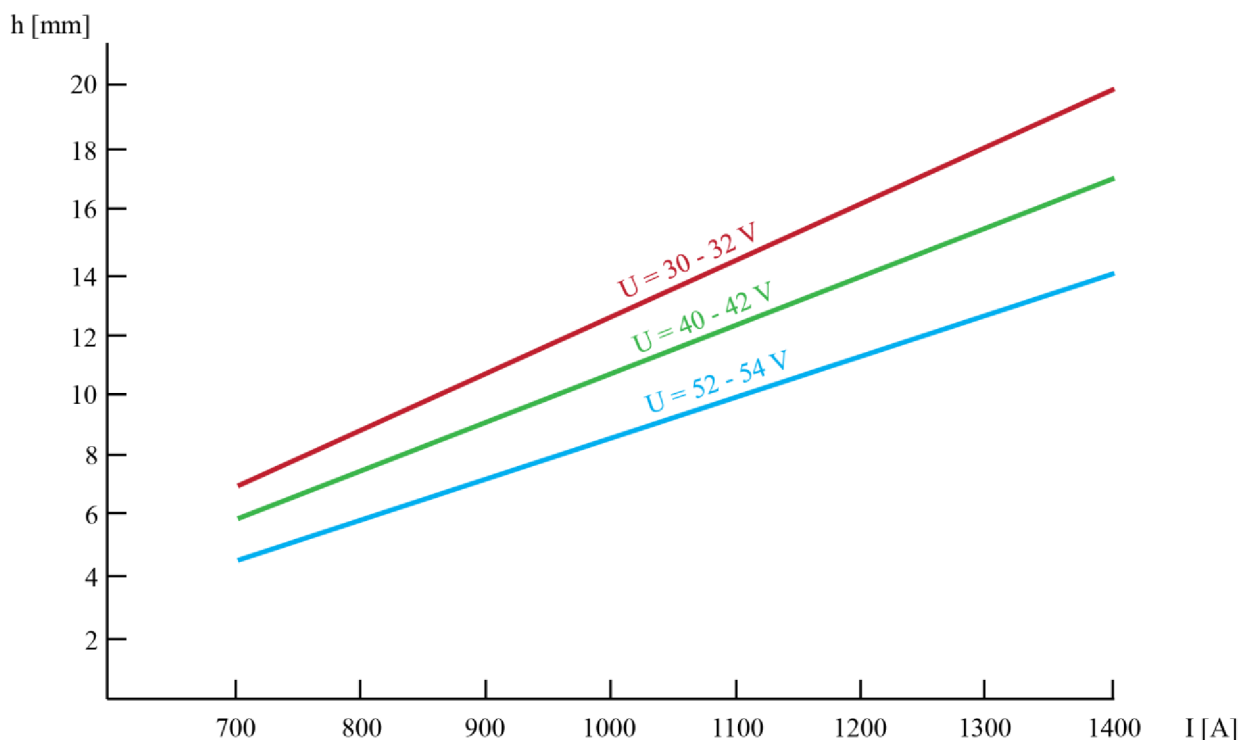
Vliv napětí na oblouku

Svařovací napětí oblouku je rozdíl elektrických potenciálů, který je závislý na vzdálenosti mezi svařovacím drátem a povrchem roztaveného svarového kovu. Závislost napětí při běžných svařovacích podmínkách se chová téměř lineárně a lze vyjádřit vztahem 2.2. Přičemž konstanty a i b závisí na druhu použitého tavidla a svařovací rychlosti.

$$E = a_k + b_k \cdot l_o,$$

(2.2)

kde je E [V]	napětí na oblouku,
a_k [V]	konstanta,
b_k [V/mm]	konstanta,
l_o [mm]	délka oblouku.



Obr. 10 – Graf vlivu velikosti napětí oblouku na hloubku provaření do zákl. materiálu [1]

Svařovací napětí má vliv především na hloubku protavení a převýšení svaru, což je způsobeno působením tepla z elektrického oblouku, působící na větší plochu základního materiálu. Právě větší oblouk nataví větší šířku základního materiálu a roztaví i více tavidla. U vyššího napětí mohou nastat větší ztráty elektrické energie a může dojít ke zvýšení pórovitosti ve svarech. Na obrázku 10 je vidět graf, který zobrazuje vliv napětí na oblouku na hloubku protavení do základního materiálu. Rychlost svařování byla 5,56 mm/s a průměr svařovacího drátu byl 5 mm.

Napětí na oblouku se nastavuje podle velikosti svařovacího proudu, k dosažení vhodné hodnoty součinitele formy svaru ϕ .

Vliv rychlosti svařování

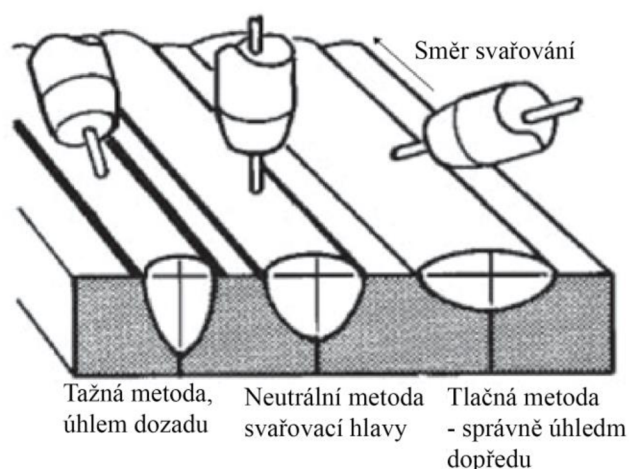
Při zachování konstantního obloukového napětí a konstantního proudu se změnou svařovací rychlosti mění množství tepla vydaného obloukem. V případě vysoké rychlosti je množství vneseného tepla nižší, tím dochází k malému natavování základního materiálu a protavení je tedy velmi malé. Jestliže je rychlost příliš vysoká hrozí svarové nedostatky v případě vrubů a nedostatečného převýšení. Naopak v případě malé svařovací rychlosti je množství vneseného tepla vyšší, tím vzniká i větší průřez svarové housenky díky většímu natavení základního materiálu.

Vliv výletu elektrody

Výlet elektrody označuje vzdálenost mezi svařovacím drátem a svařovaným materiálem. Tato vzdálenost se obvykle pohybuje v rozmezí 20 až 40 mm. Vyšším výletem můžeme zvětšit výkon navaření, ale při vysoké vzdálenosti může dojít k omezení penetrace.

Vliv úhlu svařovací hlavy

Tvar svaru lze ovlivnit i sklonem svařovací hlavy, jak je možné vidět na obrázku 11. V poloze, kdy je svařovací hlava skloněna dozadu (tzn., že svírá se směrem svařování ostrý úhel), je tvar svaru užší s větší hloubkou průvaru a větším převýšením svaru. Tato metoda je náchylnější k tvorbě vrubů ve svaru. Naopak v poloze tlačné s hlavou skloněnou kupředu (kdy svírá se směrem svařování tupý úhel) je tvar svaru širší s menším protavením, menším převýšením a je méně náchylný ke tvorbě vrubů.



Obr. 11 - Vliv úhlu naklonění svařovací hlavy při svařování [7]

Vliv množství přidaného tavidla

Vzhled svaru ovlivňuje i vrstva tavidla. Velká vrstva tavidla může způsobit hrubý povrch svaru a to díky zabránění dostatečnému unikání plynů. Příliš malá vrstva tavidla nedostatečně chrání svařovanou oblast, a tím vznikají výronky, rozstřík kovu po okolí, svar má špatný vzhled a je mírně porézní.

Optimální výška tavidla se zjišťuje zkouškou svaru, při níž se v průběhu svařování pomalu snižuje výška tavidla. A to až po okamžik, kdy je patrné, že tavidlo nemá na svar žádný vliv.

2.2 Přídavné materiály pro svařování [7][13]

Metoda svařování pod tavidlem je závislá na dvou přídavných materiálech, díky nimž můžeme ovlivňovat chemické složení svarového kovu. Prvním z těchto materiálů je svařovací drát, který svar ovlivňuje především svým chemickým složením a vlastnostmi. Druhým přídavným materiálem je tavidlo, které chrání svar a zároveň se může podílet na metalurgii svaru. Samotný svar se leguje v místě hořícího oblouku, kde v lázni roztaveného tavidla i drátu dochází k chemickým reakcím. Výsledné složení svaru tedy závisí na obou přídavných materiálech a jejich vhodné kombinaci.

2.2.1 Tavidla [2][6][7][14]

Tavidlo je zrnitý minerální materiál, jehož základní části tvoří například křemen, vápenec, kazivec, oxidy manganu a oxidy hliníku. Tavidlo pokrývá konec drátu s hořícím obloukem,

tavnou lázeň a tuhnoucí svarový kov, tím je chrání před vlivy okolní atmosféry, zejména před vzdušným dusíkem a kyslíkem.

Tavidla dále ovlivňují či zajišťují stabilizaci oblouku, vodivosti ve sloupci oblouku, metalurgické procesy, rychlost chladnutí, tvorbu strusky, tepelnou izolaci oblouku s tavnou lázní. Pomocí tavidel lze řízeně legovat svarový kov. Tavidla mohou mít výrazný vliv i na tvar a povrch tvarové housenky. Poslední funkcí je ochrana okolí svaru vůči paprskům z oblouku i vůči rozstříku a dýmu po svařování.

Tavidel je velké množství, proto se dělí podle různých měřítek s ohledem na požadovaný účel. Tavidla se dělí podle chemického složení (křemičitá, fluoridová a manganatá), podle struktury (sklovitá a pemzovitá), podle technologie výroby (tavená, keramická a aglomerovaná) a podle metalurgie procesu (neutrální, aktivní, legující). Značný vliv na metalurgické a technologické vlastnosti má zrnitost tavidla.

Bazicitu tavidla neboli zásaditost, se vypočítává z jednotlivých složek tavidla a výrazně ovlivňuje nárazovou práci svaru. Čím je bazicita vyšší, tím je vyšší i nárazová práce, avšak s omezením některých svařovacích parametrů. Proto je ekonomicky výhodnější co nejnižší bazicita, která ovšem ještě stále zaručuje potřebnou nárazovou práci. K samotnému výpočtu se používá vzorec 2.3 navržený panem Boniszewskim. [2]

$$B = \frac{CaO + MgO + Na_2O + K_2O + CaF_2 + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{SiO_2 + \frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}, \quad (2.3)$$

kde je B [-] bazicita tavidla.

Podle hodnoty bazicity se tavidla se dělí do jednotlivých skupin:

- B < 0,9 tavidlo s nízkou bazicitu
- B = 0,9 – 1,2 tavidlo z hlediska bazicity neutrální
- B > 1,2 – 2,0 tavidlo bazické
- B > 2,0 tavidlo vysoce bazické

Z Boniszewského vzorce rovněž plyne, že nízká bazicita závisí na množství komplexních oxidů obsažených v tavidle. Toto množství vázaného kyslíku je pro tvorbu mikrostruktury svaru příznivé.

2.2.2 Svařovací dráty [6][7][29]

Svařovací dráty jsou vyráběny tažením za studena, jedná se o holé dráty na cívkách. Dráty se obvykle volí shodné, či s velmi podobným chemickým složením, jako je základní materiál. Volit se může z celé škály svařovacích drátů, protože jejich chemické složení je vždy přesně dáno normou. U chemického složení se sledují zejména prvky, jako jsou C (do 0,13%), Si (do 0,5%), Mn (max. 6,9%, obvykle kolem 1,5%), P (do 0,025) a S (do 0,02). Dále pak prvky Cr, Ni a Mo podle svého obsahu předurčují použití pro dosažení určitých vlastností. [7]

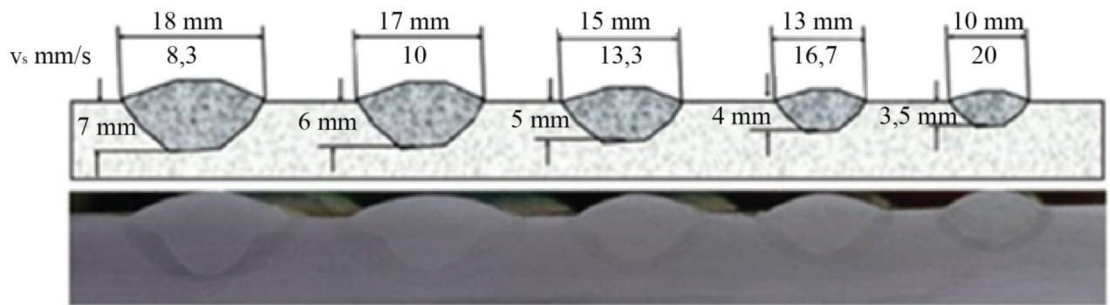
Z hlediska svařování je podstatný průměr svařovacího drátu. Tenký drát má vyšší proudovou hustotu, čímž se zvyšuje výkon odtavení. Silnější drát se neodtavuje tak rychle, zato nemá tak hluboký průvar materiálu.

Ke zvýšení produktivity lze použít místo plného drátu plněnou elektrodu. U plněné elektrody je veden elektrický proud pouze obalem elektrody, což způsobuje zvýšení proudové hustoty a zároveň i zvýšení výkonu odtavování (asi o 20 až 30% více než u plného drátu při stejných podmínkách). Díky vyšší proudové hustotě lze použít vyšších svařovacích rychlostí bez vytváření pórů, studených spojů a neprůvarů.

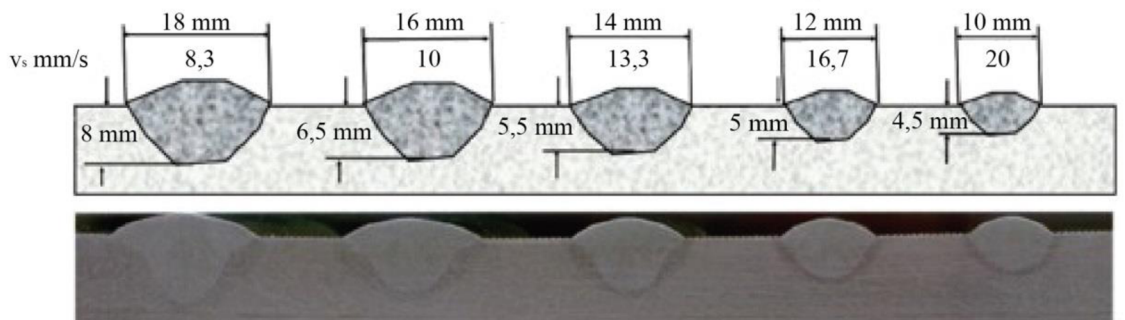
Plněných elektrod, určených pro svařování metodou APT, existují dva druhy. Prvním druhem jsou elektrody plněné kovovým práškem určené především pro koutové svary.

Druhým druhem jsou pak elektrody plněné bazickou náplní doporučované ke svařování tupých svarů.

Plněné elektrody mají vůči plným drátům méně výraznou koncentraci vnesené energie, to způsobuje, že svarové housenky plněnou elektrodou mají tvar lehce širší a plošší, jak patrně z obrázků 12 a 13. Na obrázku 12 jsou zobrazeny svary plněnou elektrodou TOPCORE 731 B, tavidlem ST65M při následujících svařovacích parametrech: výlet elektrody 35 mm, proud 600 A, napětí 30 V, průměr drátu 4 mm, poloha PA, vnesené teplo 9 až 21,6 kJ/cm a s různou svařovací rychlostí. A na obrázku 13 jsou vidět svary se stejným tavidlem při stejných svařovacích parametrech, jen místo plněné elektrody byl použit svařovací drát SDA S2Mo. [29]

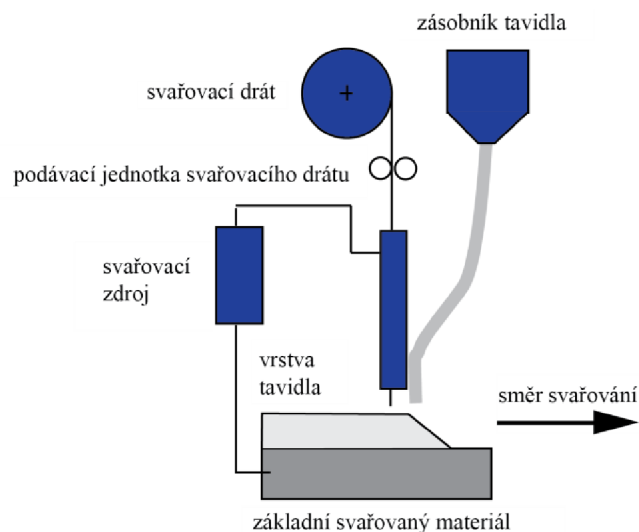


Obr. 12 – Plněná elektroda [29]



Obr. 13 – Plný drát [29]

Při výběru vhodné kombinace tavidlo – drát, je nutné vzít v úvahu obsah manganu. Jestliže se použije drát s vysokým obsahem manganu, je nutné použít tavidlo s nízkým obsahem tohoto prvku a naopak.



Obr. 14 - Svařování jedním drátem [7]

2.3 Varianty svařování pod tavidlem [6][7]

Svařování metodou APT bylo navrženo jako samo o sobě velmi efektivní metoda. Když se však metoda upraví, může být dosažena vyšší efektivita při svařování.

Svařování jedním drátem

Svařování jedním drátem je základní variantou svařování pod tavidlem. Tato varianta je nejrozšířenější a pro její zefektivnění lze použít plněnou elektrodu či přidat kovový prášek.

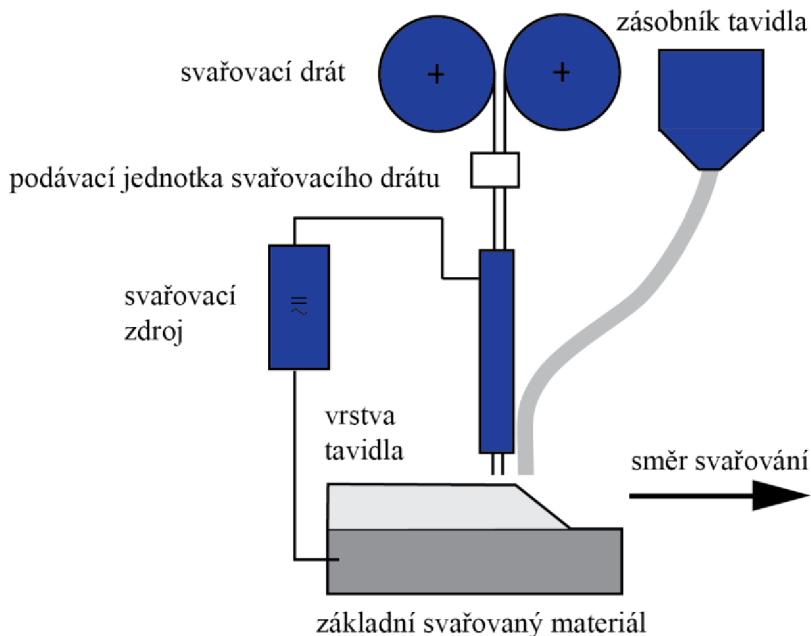
Parametry varianty svařování jedním drátem jsou vidět v tabulce 2. A zobrazení varianty je vidět na obrázku 14.

Tabulka 2 – Parametry svařování jedním drátem a dvěma dráty v jednom oblouku [7]

Počet drátů	1	2
Počet svařovacích zdrojů	1	1
Průměr drátu [mm]	1,6 – 5,0	1,2 – 3,0
Rozsah proudu [A]	200 - 1 000	400 – 1 200
Druh proudu	DC+	DC+
Napětí na jeden drát [V]	25 – 38	26 – 38
Maximální výkon odtavení plného drátu [kg/h]	≤ 12	≤ 15
Výlet elektrody [mm]	20 - 40	-

Svařování dvěma dráty v jednom oblouku

Při svařování dvěma dráty jsou oba dráty napájeny stejným zdrojem, veškerý podávací mechanismus je zdvojený a zajišťuje současný posuv obou drátů. Pro tuto variantu se používají dráty spíše nižších průměrů, než tomu bylo u svařování jedním drátem. Výkon odtavení je až o 30% vyšší než u svařování jedním drátem. [7] Pro větší zvýšení efektivity lze použít plněnou elektrodu. Technologické parametry svařování dvěma dráty jsou uvedeny v tabulce 2 a schématické zobrazení varianty je na obrázku 15.



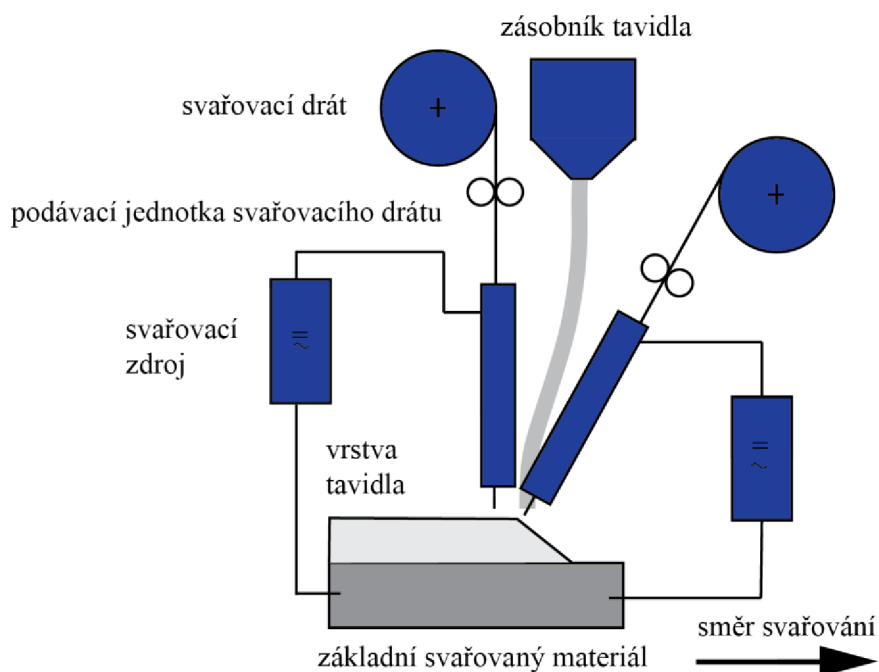
Obr. 15 - Svařování dvěma dráty v jednom oblouku [7]

Svařování více oblouky

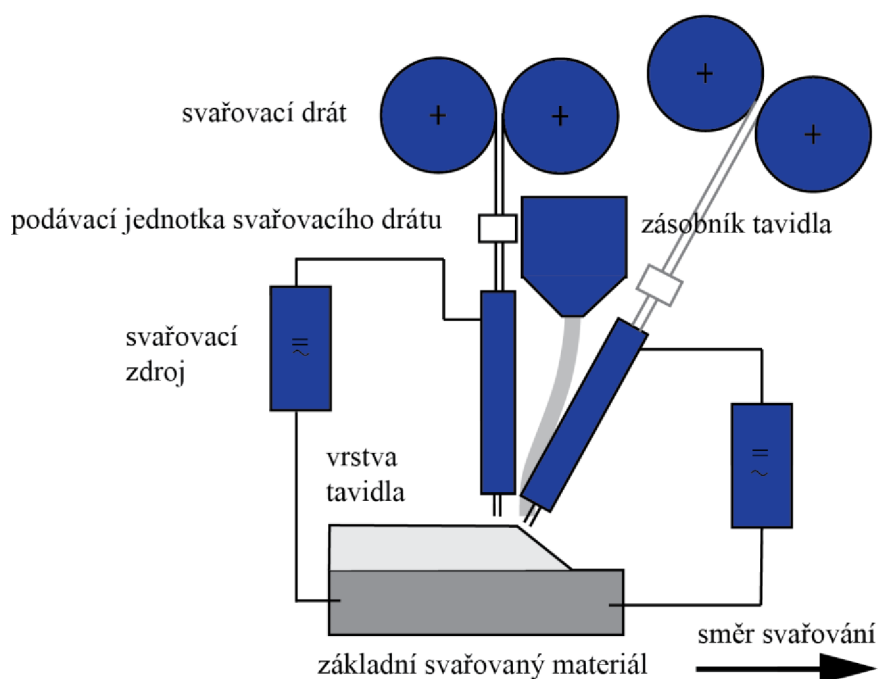
Svařování více oblouky se dá rozdělit do tří menších podskupin (tandemové svařování, dvojité tandemové svařování a tzv. „multidrátové“ svařování).

U tandemového svařování se svařuje dvěma dráty, z nichž každý je připojen na svůj zdroj a má i svoje podávání. Hlavní svařovací drát je obvykle připojen k vysokému stejnosměrnému

proudu a nízkému napětí. Tím zajišťuje lázni hluboký průvar. Druhý drát je obvykle zapojen k nižšímu střídavému proudu. Perioda střídavého proudu narušuje foukání oblouku, které vzniká od hlavního zdroje, a tak vyhlazuje povrch svařovací housenky.



Obr. 16 – Svařování tandemové [7]



Obr. 17 - Dvojitě tandemové svařování [7]

Dráty používané na tandemové svařování se řadí k širším (3 až 5 mm). Produktivita této varianty může dosahovat až 80% a svařovací rychlost až 95%. Podrobné parametry jsou uvedeny v tabulce 4. Barevné schéma je vidět na obrázku 16.

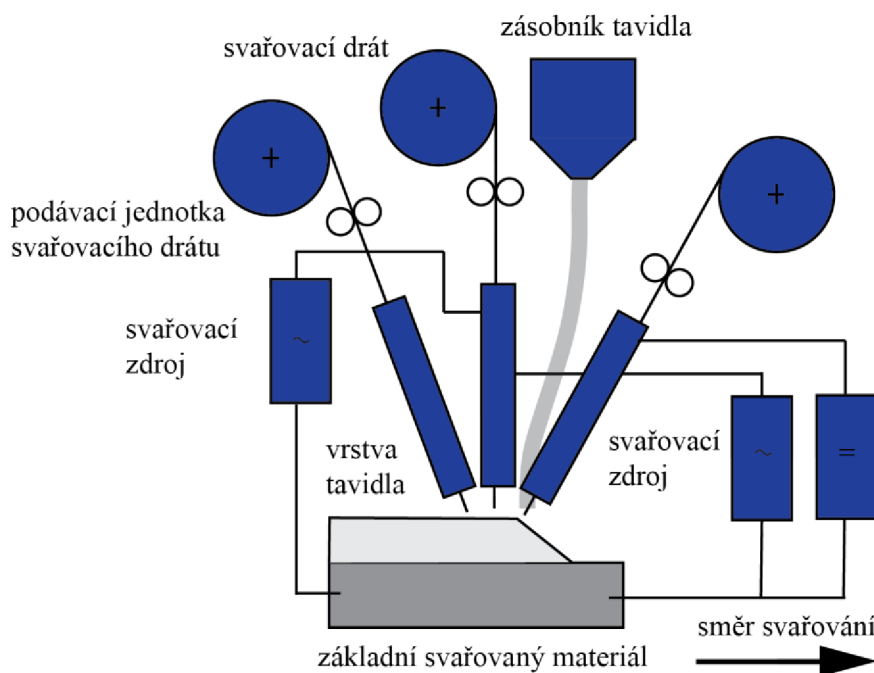
Dvojitě tandemové svařování svařuje pomocí dvou dvoudrátových hlavice umístěných ve svařovacím směru těsně za sebou. Tato varianta tedy používá 4 dráty a to o středních průměrech. Další parametry jsou uvedeny v tabulce 4 a na obrázku 17 lze názorně vidět

dvojité tandemové svařování. Tato varianta najde využití na místech s dobrou dostupností, například u výroby obvodových věží větrných elektráren.

Multidrátové svařování umožňuje svařování až šesti drátů najednou, z nichž každý má svůj proudový zdroj. První drát (po směru svařování) je obvykle zapojen na stejnosměrný zdroj, ostatní jsou už připojeny na zdroje střídavé. Průměry drátů při svařování patří k širším a výkon odtavování je u této metody vzhledem k počtu drátů nejvyšší. Parametry této metody jsou k vidění v tabulce 4 a schéma metody na obrázku 18. Uplatnění této varianty je například u podélných svarů při výrobě trub.

Tabulka 3 – Parametry tandemového, dvojitého tandemového a multidrát. svařování [7]

Varianta svařování	Tandemové	Dvojité tandemové	Multidrátové
Počet drátů	2	4	3 – 6
Počet svařovacích zdrojů	2	2	3 – 6
Průměr drátu [mm]	3,0 – 5,0	2,5 – 3,0	3,0 – 5,0
Rozsah proudu [A]	1 500 – 2 400	1 500 – 2 200	2 000 – 5 500
Druh proudu	DC+, AC	DC+, AC	DC+, AC, AC...
Napětí na jeden drát [V]	28 – 38	26 – 38	30 – 42
Maximální výkon odtavení plného drátu [kg/h]	≤ 25	≤ 38	≤ 90



Obr. 18 - Svařování multidrátové[7]

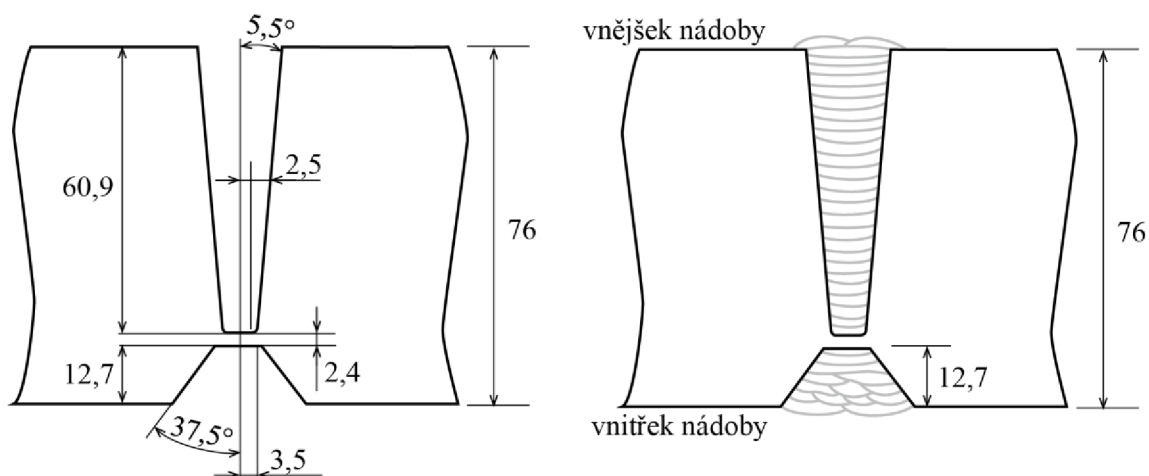
Svařování do úzkého úkosu[1][31][26][8][24]

Svařování do úzkého úkosu má svá specifika. Jedním z nich je samotný tvar úkosu, který je znázorněn na obrázku 19. Úhel rozevření úkosu je 0° až 8°. Hloubka úkosu se pohybuje od 50 mm výše. Tvar úkosu je těžko přístupný svářeči, a proto je celý proces svařování do úzkého úkosu zautomatizovaný. Pro plynulost procesu je potřebná dobrá příprava svarových ploch (jako prevence vůči studeným spojům) a vhodné tavidlo, jež vytváří strusku, která se sama odstraňuje při nánosu další vrstvy i v případě přehřevů.

Svařovací sestava pro úzký úkos je izolována jako ochrana proti vzniku oblouku pro případ, kdy se sestava nečekaně pohybuje proti hraně spoje. Celá sestava obsahuje speciálně upravenou svařovací hlavu, dotykový senzor, dodávku a recirkulaci tavidla. Svařuje se jedním drátem nebo tandemově. Výhodou svařování do úzkého úkosu je menší spotřeba kovu

ve svarovém spoji (oproti běžným svarovým úkosům). Díky menší spotřebě kovu se i zkracuje celková doba svařování. Svařovací hlavu můžeme vidět na obrázku 20.

Metoda svařování do úzkého úkosu se používá například při výrobě tlustostěnných svařenců v energetickém průmyslu (kotle, tlakové nádoby, rotory turbín, sloupy větrných elektráren... atd.).



Obr. 19 - Tvar úkosu [8]



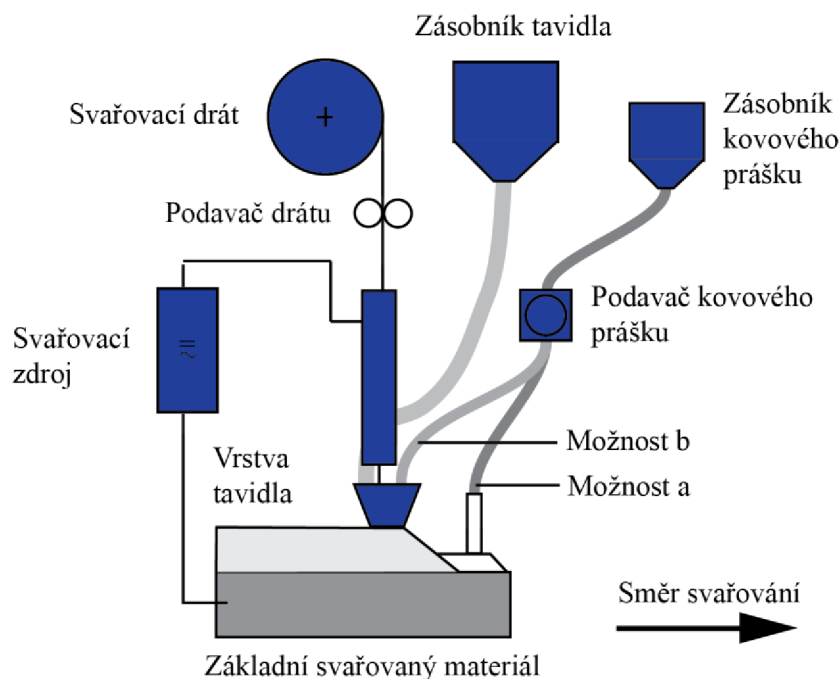
Obr. 20 - Svařovací hlava ke svařování do úzkého úkosu [24]

Kovový prášek

Kovový prášek se používá pro zvýšení výkonu navaření. Svařovací proces s kovovým práškem potřebuje přesné řízení všech parametrů i dostatečně kvalifikovanou obsluhu. Tehdy lze dosáhnout odtavovacího výkonu až o 100% i více. [7] Prášek může být použitý v libovolné kombinaci tavidlo – drát. Prášek je dodáván do lázně před hořící oblouk (a) anebo pomocí magnetického pole společně s drátem (b), což je schematicky znázorněno na obrázku 21. Přídavkem kovového prášku se zmenšuje průvar. Důvodem je spotřeba tepla z elektrického oblouku na roztavení kovového prášku.

Studený drát

Pro zvýšení odtavování se používá studený drát. Studený drát je drát bez vlastního zdroje, ale s vlastním podavačem. Drát je veden přímo do lázně, kde ho roztavuje teplo z oblouku.



Obr. 21 - Obrázek dodávky kovového prášku [7]

2.4 Porovnání svařování APT se svařováním svazkem elektronů [12][11]

Pro svařování žárupevných ocelí, jejichž využití je především v energetickém průmyslu se používá několik metod svařování: automatické svařování pod tavidlem, svařování v ochranném plynu (TIG, WIG) a svařování svazkem elektronů. [11]

Metody svařování automaticky pod tavidlem a svařování proudem elektronů mají některé vlastnosti společné či podobné, a těmi jsou:

- vysoká kvalita svarových spojů,
- vysoké nároky na přípravu svarových ploch a na jejich čistotu,
- svařuje se automaticky (u APT je možnost i poloautomaticky),
- velký průvar do základního materiálu,
- ochrana svaru před okolím (vrstvou tavidla nebo vakuem),
- lze svařovat do úzkých úkosů.

U elektronového svařování naproti metodě svařování automatickému pod tavidlovou ochranou jsou:

- úzká natavená TOO svaru (u APT je tato oblast široká),
- svařuje se na jeden průchod paprskem (u APT na několik vrstev a s podložením),
- žádný přídavný materiál,
- vakuum svaru prospívá svými rafinačními účinky,
- lze svařovat i v méně přístupných místech (záleží na naprogramování automatu).

Nevýhodami svařování proudem elektronů jsou:

- vysoké investiční náklady,
- vysoké provozní náklady (vytvoření a udržení vakua po celou dobu svařování),
- svařované materiály musí být co nejčistší.

Z hlediska svařování žárupevných ocelí má svařování proudem elektronů výhodu v malé tepelně ovlivněné oblasti. Nevýhodou a hlavním důvodem, proč se používá spíše metoda APT, jsou velké rozměry svařenců pro tepelnou energetiku (vysokotlaké kotle, parní turbíny, membránové kotle). S velkými rozměry svařovaných dílců rostou i náklady. A to nejen na prvotní investici, ale zejména provozní náklady na vytvoření a udržení vakua a také k zajištění vysoké čistoty základních materiálů.

3 TEPLOTNÍ VLIVY BĚHEM SVAŘOVÁNÍ [5][7][18][19][34]

Při svařování žárupevných ocelí je žádoucí minimalizace vzniku trhlin za studena (zejména se jedná o trhliny vodíkové). Trhliny za studena vznikají kvůli přítomnosti vodíku, když dojde k ochlazení pod 150°C, a pnutí ve svaru. [7][34]

Vodík se do svaru může dostat z okolní atmosféry, z neočištěného povrchu svarových ploch (od olejů, mazadel, barev, okují, vlhkosti, atd.), také z drátu, z nevysušeného tavidla nebo ze stlačeného vzduchu. Vodík je problémem u nelegovaných, nízkolegovaných a feritických ocelí. Austenitické oceli již nejsou náchylné k praskání za studena, jelikož mají mřížku plošně středěnou, kterou difúzní vodík neproniká.

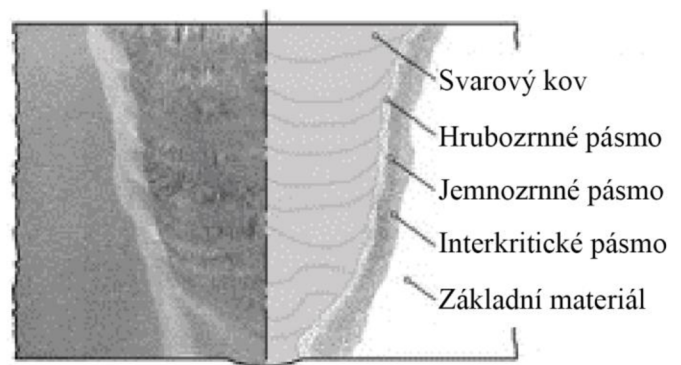
Pnutí ve svaru vzniká kvůli nerovnoměrnému rozložení tepla při svařování. Vznik trhlin zvyšuje u spojů s velkou tloušťkou, kde se svařuje pomocí více vrstev. Také konstrukčně nevhodné spoje vnášejí do svařence tahová či tlaková pnutí.

K trhlinám nejčastěji dochází v tepelně ovlivněné oblasti či svaru a lze je minimalizovat:

- předebrátím svařovaného materiálu,
- dokonalým vyčištěním a vysušením styčných ploch,
- volbou přídavného materiálu s nízkým obsahem vodíku či
- vhodným umístěním výrobku a vhodně naplánovaným svařovacím postupem, čím se minimalizuje pnutí ze smrštění.

3.1 Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněná oblast je výraz pro několik oblastí podél celého svaru. Mezi tyto oblasti patří oblast úplného natavení kovu, oblast, v níž se kov natavil jen částečně, oblast přehřátí, oblast normalizace a oblast částečné překrytosti. Tepelně ovlivněná oblast byla ovlivněna specifickým vneseným teplem ze svařovacího zdroje. A právě v tepelně ovlivněné oblasti nejvíce vznikají trhliny za studena. Zmíněný popis je znázorněn na obrázku 22.



Obr. 22 - Tepelně ovlivněná oblast a její části[5]

3.2 Specifické vnesené teplo[14][1]

Specifické vnesené teplo je energie vydaná obloukem, jenž je vztažena k jednotce délky svaru. Specifické vnesené teplo se počítá pomocí vztahu (3.1).

$$Q_s = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \quad (3.1)$$

kde je Q_s [kJ.mm ⁻¹]	specifické vnesené teplo,
U [V]	svařovací napětí,
I [A]	svařovací proud,
η [-]	součinitel účinnosti přenosu tepla,
v_s [mm.s ⁻¹]	svařovací rychlost.

Hodnota součinitele účinnosti přenosu tepla je závislá na způsobu svařování. U automatického svařování pod tavidlem se tato hodnota blíží 1. [1] Výpis technologií svařování a jejich součinitelů účinnosti lze vidět v tabulce 5.

Tabulka 4 – Součinitele účinností jednotlivých technologií [1]

Svařovací technologie	Zkratky	Součinitel η
Ruční obalovaná elektroda	ROE	0,70 – 0,85
Obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře	TIG, WIG	0,48 – 0,65
Obloukové svařování tavící se elektroda v ochranné atmosféře	MIG, MAG	0,66 – 0,75
Svařování automatické pod tavidlem	APT	0,90 – 0,99
Svařování svazkem elektronů	ESS	0,90 – 0,99

3.3 Předehřev materiálu[7][18][19][31][34]

Teplně ovlivněná oblast je nejnáchylnější oblastí k trhlinám za studena. Tento jev lze omezit také pomalým ochlazováním této oblasti. Důležitá je zejména teplota 150°C, při níž se může z kovu uvolňovat difúzní vodík. Pro dosažení co nejdelší doby odchodu difúzního vodíku se používá předehřátí svařovaného materiálu.

Potřeba předehřevu u oceli se stanovuje pomocí uhlíkového ekvivalentu a tloušťce svařovaného materiálu. Materiál se obvykle předehřívá, pokud je tloušťka materiálu větší než 25 mm, pokud obsahu uhlíku převyšuje hodnotu 0,20 hm.% anebo pokud je uhlíkový ekvivalent vyšší než 0,45 hm.%. [34] Teplota předehřevu se vypočítává podle tzv. Seféniova vzorce 3.2.[31]

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{(C_p - 0,25)}, \quad (3.2)$$

kde je T_p [°C] teplota předehřevu,

C_p [%] koeficient praskavosti.

$$C_p = C_c + 0,005 \cdot s \cdot C_c, \quad (3.3)$$

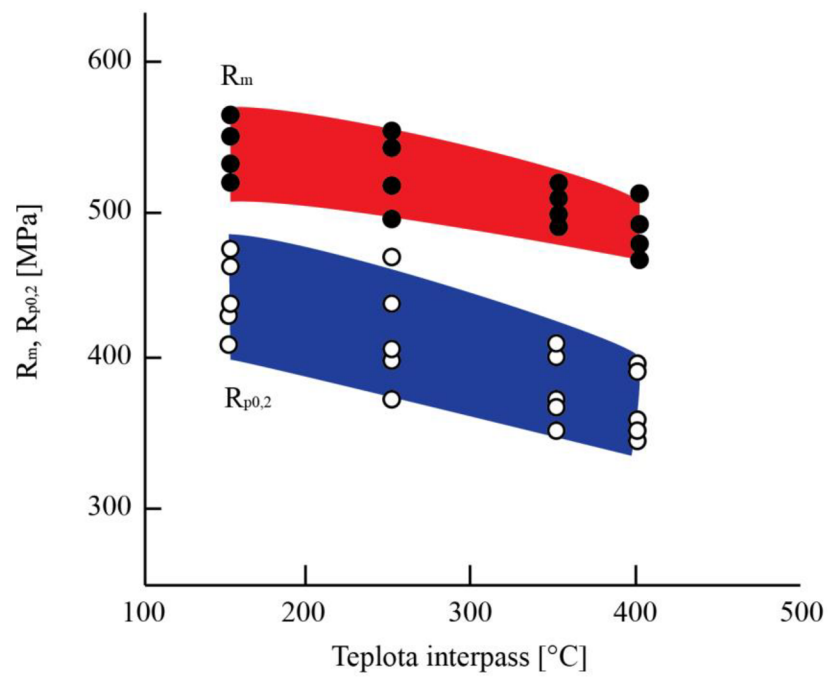
kde je C_c [%] koeficient vlivu uhlíku.

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360}, \quad (3.4)$$

kde je s [mm] svařovaná tloušťka.

U vícevrstvého svařování je podstatná nejen teplota svařování, ale také teplota interpass. Teplota interpass neboli česky mezhousenková teplota je teplota svařového kovu z předchozí vrstvy těsně před započítím svařování následující vrstvy. Při zvyšování teploty interpass může dojít k poklesu hodnot meze kluzu i meze pevnosti v tahu. Teplota interpass se typicky předepisuje u austenitických ocelí pro zachování vlastností. U feritických ocelí bývá hodnota teploty interpass obvykle shodná s teplotou předehřevu.

Při samotném svařování je nutné dbát na hodnotu vneseného tepla a hodnotu teploty maximálního interpass k dosažení potřebných hodnot vrubové houževnatosti.



Obr. 23 – Graf vlivu teploty interpass na meze pevnosti [19]

4 PRAKTICKÁ ČÁST [16][17][32][34][36]

Praktická část se zabývá vytvořením návaru z žárupevné oceli 26NiCrMo14-5. Zkušeni vzorek tvořil díl z oceli 26NiCrMo14-5 o tloušťce 40 mm. Na nějž byl navařen návar o dvou vrstvách metodou APT.

Ocel 26NiCrMo14-5 je nízkolegovaná žárupevná ocel vhodná pro turbíny. Její chemické složení je uvedeno v tabulce 5. Ekvivalent uhlíku oceli 26NiCrMo 14 – 5 se počítá pomocí vztahu (4.1). [34]

Tabulka 5 – Chemické složení oceli 26NiCrMo 14-5 [36]

C	0,30%	Mn	0,23%
Si	0,05%	Cr	1,70%
P	0,004%	S	0,003%
Ni	3,81%	Mo	0,410%
V	0,12%	Al	0,010%

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \quad (4.1)$$

kde je C_e [%] uhlíkový ekvivalent.

Po dosazení chemického složení do vztahu (4.1) se vypočítá uhlíkový ekvivalent.

$$C_e = 0,30 + \frac{0,23}{6} + \frac{1,7 + 0,41 + 0,12}{5} + \frac{3,81 + 0}{15}$$

$$C_e = 1,038\%$$

V oceli 26NiCrMoW 14–5 je uhlíkový ekvivalent 1,038%. U nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, jejichž uhlíkový ekvivalent přesahuje hodnotu 0,45% je nutné materiál před svařováním přehřát.

Vzorek byl před návarem přehřát na teplotu 200°C, která byla stanovena přibližným odhadem. Teplota přehřevu se stanovuje dosazením tloušťky a chemického složení oceli do vzorců (3.2), (3.3) a (3.4).

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,3 + 40 \cdot (0,23 + 1,7) + 20 \cdot 3,81 + 28 \cdot 0,41}{360} = \frac{108 + 77,2 + 76,2 + 11,48}{360}$$

$$C_c = 0,758$$

$$C_p = 0,758 + 0,005 \cdot 40 \cdot 0,758$$

$$C_p = 0,9096$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{(0,9096 - 0,25)}$$

$$T_p = 284,26^\circ\text{C}$$

Ideální teplota přehřevu byla vypočítána na 284,26°C, což je o zhruba 85°C víc, než bylo stanoveno odhadem.

Pro svařování bylo zvoleno tavidlo OP 121 TTW, jehož chemické složení je uvedeno v tabulce 6. Toto tavidlo je florido - basického typu a je aglomerované. Bazicitu tavidla byla stanovena pomocí následujícího výpočtu vzniklého dosazením do vzorce 2.3.

Tabulka 6 - Chemické složení tavidla OP 121 TTW [17]

SiO ₂ +TiO ₂	15%	CaO+MgO	35%
Al ₂ O ₃ +MnO	20%	CaF ₂	30%

$$B = \frac{0,35 + 0 + 0 + 0,3 + \frac{1}{2}(0,057 + 0)}{0,142 + \frac{1}{2}(0,143 + 0,008 + 0)} = \frac{0,6785}{0,2175}$$

$$B = 3,1$$

Hodnota bazicity tavidla vyšla vyšší než 2, jedná se tedy o vysoce bazické tavidlo. Tavidlo se používá ke svařování vysoko pevnostních jemnozrnných ocelí. Pro zajištění neutrality svarového kovu se toto tavidlo používá s drátem, jež má vyšší obsah Si a Mn. [16][17]

Svařovací drát TOPCORE 745 B těmto požadavkům vyhovuje, jak můžeme vidět v tabulce 7, kde je uvedeno jeho chemické složení. Svařovací drát TOPCORE 745 B je velmi odolný vůči praskání, když je vhodně zkombinován se zásaditým tavidlem s nízkým obsahem vodíku. Velmi se hodí pro ekonomická spojení žárupevných ocelí. [32]

Tabulka 7 - Chemické složení svařovacího drátu TOPCORE 745 B [32]

C	0,08%	Mn	1,6%
Si	0,4%	P	0,015%
S	0,008%	Cr	1%
Ni	2,2%	Mo	0,5%

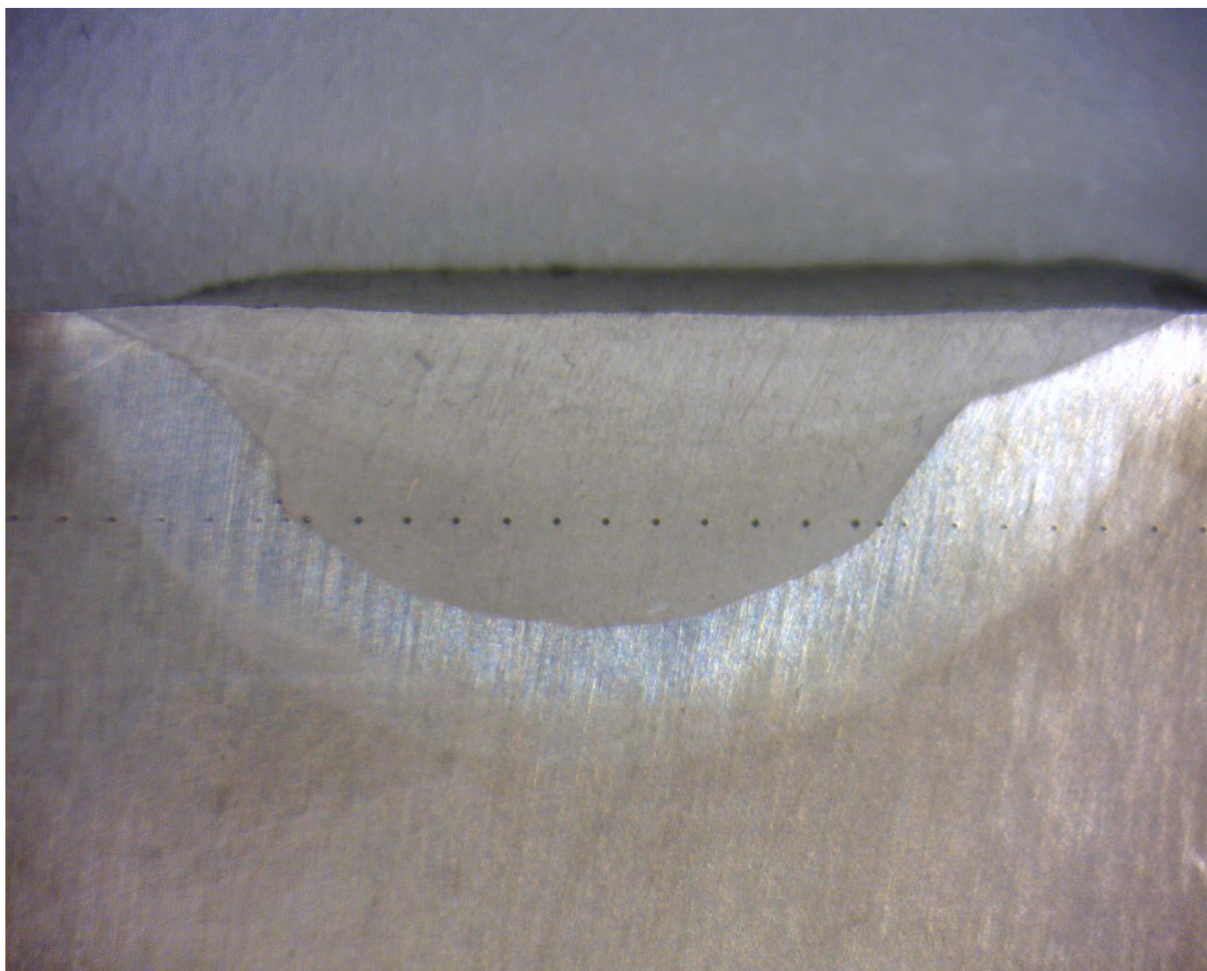
Před započítáním navařování bylo tavidlo vysušeno ke snížení difúzního vodíku, pocházejícího z tavidla. Při navařování byly na svařovacím automatu nastaveny parametry:

- Napětí 29 V
- Proud 400 A
- Hodnota difúzního vodíku u sušeného tavidla je 4 cm³/ 100g návaru
- Svařovací rychlost 8,34 mm/s

Vnesené teplo se vypočítalo podle vzorce 3.1.

$$Q_s = \frac{0,95 \cdot 29 \cdot 400}{10^3 \cdot 8,34} = \frac{11020}{8340} = 1,31 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

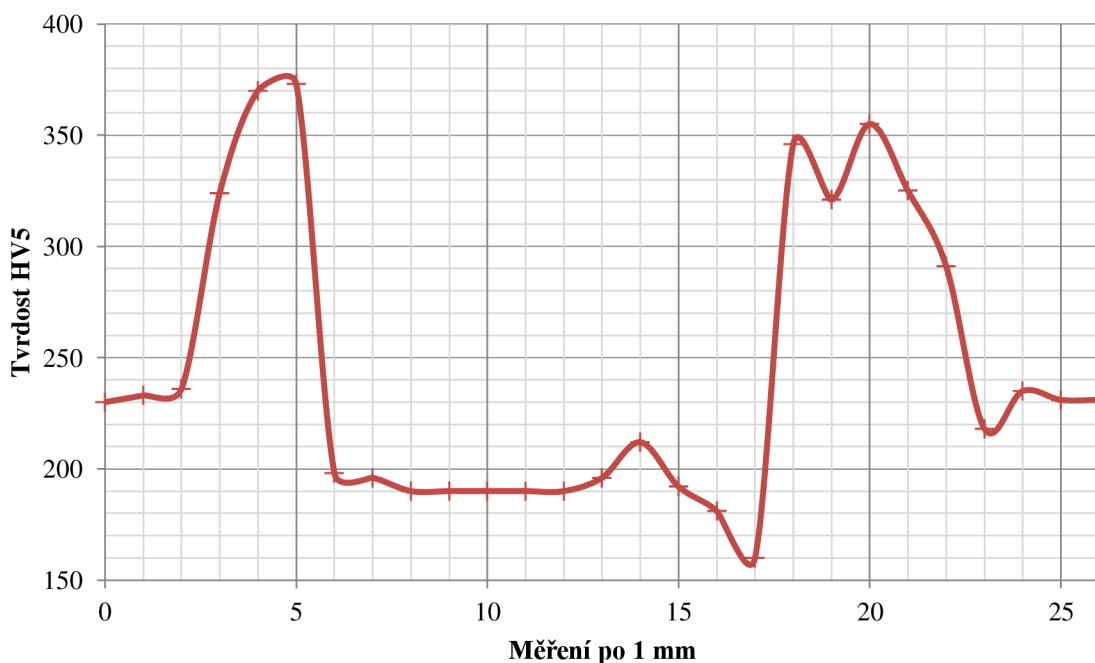
Hodnota vneseného tepla vyšla 1,31 kJ.mm⁻¹. Což se jedná o nízkou hodnotu vneseného tepla.



Obr. 24 – Výbrus návaru na oceli 26NiCrMo14-5 v měřítku 6,5:1

Na výbrusu (obrázek 20) je vidět, že návar byl zhotoven ze dvou vrstev. Patrná je i tepelně ovlivněná oblast. Výbrus byl podroben zkoušce tvrdosti podle Vickersese zatížením 5 kg po vzdálenostech 1 mm, jak lze rovněž vidět na obrázku. Z naměřených hodnot byl zhotoven graf průběhu tvrdosti (obrázek 21).

Na tomto grafu lze pozorovat změny tvrdosti v základním materiálu, v tepelně ovlivněné oblasti i ve svarovém kovu. První tři a poslední tři vrypy patří tvrdosti základního materiálu. Čtvrtý až šestý vryp a devatenáctý až dvacátý třetí potažmo dvacátý čtvrtý vryp (bráno v grafu zleva) patří do tepelně ovlivněné oblasti. V této oblasti dochází prudkému nárůstu tvrdosti. Oblasti svarového kovu patří vryp sedmý až osmnáctý. V této oblasti dochází naopak k mírnému poklesu hodnot tvrdosti vůči základnímu materiálu.



Obr. 25 – Graf průběhu tvrdosti svaru

4.1 Porovnání návaru s předehřevem a bez předehřevu [20]

Z grafu na obrázku 24 můžeme vidět, jak se pohybují hodnoty tvrdosti v jednotlivých oblastech u oceli 26NiCrMo14-5 s předehřevem. Základní materiál má tvrdosti kolem 230 HV5. Hodnoty tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti se pohybují kolem 350 HV5 a ve svarovém kovu se hodnoty tvrdosti pohybují okolo 190 HV5.

Návar vytvořený stejnou technologií na stejné žárupevné oceli, ale bez předehřevu má hodnoty v tepelně ovlivněné oblasti i ve svarovém kovu poněkud odlišné. V oblasti základního materiálu se tvrdosti pohybují opět kolem 230 HV10. V tepelně ovlivněné oblasti se tvrdost dosahuje až k hodnotám 400 HV10 a v oblasti svarového kovu se tvrdost pohybuje kolem hodnoty 160 HV10. [20]

Ze získaných výsledků je vidět, že předehřev materiálu nemá vliv na tvrdost v základním materiálu. Předehřev příznivě působí na snížení tvrdosti v TOO a mírně zvyšuje tvrdost v návarovém kovu. Na hodnotách u předehřátého vzorku jsou znát menší rozdíly hodnot tvrdosti mezi jednotlivými oblastmi, tím se ve vzorku tvoří nižší pnutí mezi jednotlivými oblastmi než u vzorku nepředehřátého. Z těchto poznatků je patrné, že již mírný předehřev materiálu je velmi vhodný.

ZÁVĚRY

Teoretická část zabývající se žárupevnými materiály obsahuje rozbor dějů v žárupevných ocelích, kde jsou podrobně rozebrány problematiky procesu tečení, precipitačního zpevnění, substitučního zpevnění a degradace těchto mechanismů. Dále se teoretická část zabývá problematikou dělení žárupevných ocelí podle pracovních teplot, z čehož vychází, že se žárupevné oceli používají pouze do teplot nepřesahujících teplotu 800°C. Tato teoretická část se zabývá také svařitelností žárupevných ocelí. Z popsané svařitelnosti plyne, že přidané legury do oceli ovlivňují svařitelnost nepříznivě. Oceli s přidanými legurami se proto dají svařovat pouze při dodržení pracovních postupů.

Druhá teoretická část práce se zabývá problematikou svařování metodou APT. Metoda APT je v této části rozebrána z hlediska výhod a nevýhod, technologických parametrů. Z technologických parametrů vyplývá, že největší vliv na svar má elektrický oblouk, který je samotný ovlivňován zejména proudem, napětím a svařovací rychlostí. V kapitole jsou rovněž rozebírány přídavné materiály, jejichž kombinace ovlivňuje legování samotného svaru. Metoda APT lze zefektivnit různými způsoby modifikací (svařování více dráty, do úzkého úkosu, přidáním kovového prášku...). Ke konci této teoretické části bylo učiněno srovnání metody APT s metodou svařování svazkem elektronů. Z tohoto porovnání vyšlo, že z hlediska nižších nákladů na pořízení a následných provozních nákladů je výhodnější pro svařování žárupevných ocelí metoda APT.

Třetí část práce je opět teoretická a zabývá se teplotními vlivy na svařovaný materiál, tedy tepelně ovlivněnou oblastí, specifickým vneseným teplem a stanovením teploty předehřevu. Z kapitoly plyne, že se kvůli prevenci trhlin za studena musí svařovaný materiál předehřívát v případě, kdy je tloušťka vyšší než 25 mm, obsah uhlíku převyšuje hodnotu 0,20 hm.%, a nebo je uhlíkový ekvivalent vyšší než 0,45 hm.%.

V praktické části bylo ověřeno, že navařovaný díl převyšuje všechny zmíněné mezní hodnoty pro potřebu předehřevu. Byl tedy vytvořen návar na žárupevné oceli 26NiCrMo14-5 pomocí svařovacího drátu TOPCORE 745 B a tavidla OP 121 TTW. Při vytvoření návaru byla použita teplota 200°C, jež byla stanovena odhadem. Návar byl vyhodnocen z hlediska tvrdosti a byl porovnán s výsledky téhož návaru navařovaného bez předehřevu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. (KOLEKTIV AUTORŮ). *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd.* Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
2. *ASM handbook: Welding, Brazing and Soldering.* 6th print. Materials Park: ASM International, 2003, xvi, 1299 s. ISBN 08-717-0382-3.
3. CITACE PRO. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. 2012 [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/>
4. Creep and Stress Rupture Properties. *NDT Resource center* [online]. 2001 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/Creep.htm>
5. Creep behavior and in-depth microstructural characterization of dissimilar joints. *IOP Science*. National Institute for Materials Science, 2013. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/1468-6996/14/1/014203/article>
6. DUBEN, Zdeněk. *Svařování pod tavidlem.* 2. vyd. Praha: SNTL, 1956, 91 s.
7. ESAB. *Příručka pro svařování pod tavidlem.* ESAB Vamberk, spol. s r.o. 2009, 94 s.
8. Estimates of Mechanical Properties and Residual Stress of Narrow Gap Weld for Leak-Before-Break Application to Nuclear Piping. *ASME* [online]. 2011 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://pressurevesseltech.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1460454>
9. FALTUS, František. *Příručka svařování: [sborník].* 1. vyd. Praha: SNTL, 1955, 801 s.
10. FORET, Rudolf. *Strukturní stabilita žárupevných ocelí a jejich svarových spojů: Structural stability of creep-resistant steels and their weld joints : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Materiálového inženýrství.* Brno: VUTIUM, 2005. 22 s. ISBN 80-214-2902-x. Habilitační práce.
11. HODIS, Zdeněk. *Difúze uhlíku a dusíku ve svarových spojích žárupevných feritických ocelí: Diffusion of carbon and nitrogen in weld joints of ferritic creep-resistant steels : zkrácená verze Ph.D. Thesis.* [V Brně: Vysoké učení technické], c2009, 25 s. ISBN 978-80-214-3922-1.
12. KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů.* 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
13. KLEANDER, Antonín. *Přídavné materiály pro svařování.* 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966, 223 s.
14. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování.* 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 185 s. ISBN 80-7082-697-5.
15. NĚMEC, Josef. *Svařování korozivzdorných a žárovzdorných ocelí.* 2. přeprac. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1975, 165 s.
16. OERLIKON. *Katalog přídavných materiálů OERLIKON.* OMNITECH spol. s r.o., Tetčice. 2010. Dostupné z: <http://www.omnitechweld.cz/cze/katalog/D51.pdf>
17. OERLIKON. *Tavidla pro svařování a navařování ocelí metodou SAW, ESW.* OMNITECH spol. s r.o., Tetčice. 2010, 5 s. Dostupné z: <http://www.omnitechweld.cz/cze/katalog/EN-ISO/SAW-TAVIDLA-1-2010.pdf>
18. OCHODEK, Vladislav. *Stanovení teploty předehřevu.* VŠB TU Ostrava, 2012. Dostupné z: http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/stanoveni_teploty_předehřevu_2012.pdf

19. OCHODEK, Vladislav. *Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů - I*. VŠB TU Ostrava, 2011. Dostupné z: http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv_tep_l_rezimu_a1.pdf
20. PALÁN, Marek. Svařování rotorových materiálů. Brno, 2014. 42s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
21. PURMENSKÝ, Jaroslav a Václav FOLDYNA. Strukturní stabilita a žárupevnost feritických ocelí. In: *Metal 2004*. Hradec nad Moravicí, 2004, s. 5.
22. PURMENSKÝ, Jaroslav a Václav FOLDYNA. Žárupevnost a její vliv na životnost energetických zařízení. In: *Metal 2008*. Hradec nad Moravicí, 13. - 15.5. 2008, s. 16. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_08/Lists/Papers/184.pdf
23. PURMENSKÝ, Jaroslav, Václav FOLDYNA a Karel MATOCHA. Perspektivní žárupevné oceli a jejich vlastnosti a praktické využití. In: *Metal 2006*. Hradec nad Moravicí, 23.-25.5.2006, s. 12. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_06/papers/162.pdf
24. SAW - Narrow Gap. *ESAB* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.esab.com/automation/en/process/subarc-general/Subarc-Narrow-Gap.cfm>
25. Svařování a pájení. *PBS ENERGO* [online]. 2012 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.pbsenergo.cz/svarovani-a-pajeni>
26. *Svařování do úzkého úkosu*. ESAB Vamberk, spol. s r.o. 2007, 16 s.
27. Svařování niklových slitin. *BIBUS Metals* [online]. 16.05.2013 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.bibusmetals.cz/cs/novinky/posledni-novinky/novinky/article/welding-with-high-nickel-alloys/>
28. Svařování otěruvzdorných a konstrukčních plechů. *Gama ocel s.r.o. Ratiškovice* [online]. 2014 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.gamaocel.cz/4863/svarovani/>
29. Svařování plněnými elektrodami pod tavidlem. *Konstrukce* [online]. 28.4.2008, 2.1.2009 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/svarovani-plnenymi-elektrodami-pod-tavidlem/>
30. Svařování pod tavidlem (SAW). *Svarinfo* [online]. 28. 01. 2010 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2009010801>
31. *Technologie ESAB svařování do úzké mezery*. ESAB Vamberk, spol. s r.o. 2011, 16 s.
32. TOPCORE 745 B. *ARCSEL* [online]. 2010 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://arcsel.com.ua/en/product-catalogue/flux-cored-wires/flux-cored-wires-for-submerged-arc-joint-welding/topcore-745-b/>
33. VODSEĐÁLEK, Josef, Miloš VYSTYD a Radovan PECH. *Vlastnosti a použití žárupevných ocelí a slitin*. 2. upr. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1974, 311 s.2.
34. Výpočet teploty přehřevu Tp. *Svarinfo* [online]. 2005 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=predehrev>
35. ZEKE, Július. *Základy metalurgie zvarania s tavivovou ochranou*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990, 359 s.
36. ZPRÁVA FSI - MPO FRI-485-09. 3. *Optimalizace svařovacích postupů, technologické a parametrické zkoušky přídavných materiálů*. VUT v Brně, 2011.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
B	[-]	bazicita tavidla
C_c	[%]	koeficient vlivu uhlíku
C_e	[%]	uhlíkový ekvivalent
C_p	[%]	koeficient praskavosti
E	[V]	napětí na oblouku
I	[A]	svařovací proud
K_d	[-]	konstanta rychlosti hrubnutí sekundárních fází
Mo_{eq}	[%]	molybdenový ekvivalent
Q	[J]	aktivační energie hrubnutí
Q_s	[kJ.mm ⁻¹]	specifické vnesené teplo
T_p	[°C]	teplota přehřevu
U	[V]	svařovací napětí
a	[mm]	převýšení
a_k	[V]	konstanta
b	[mm]	šířka svaru
b_k	[V/mm]	konstanta
c	[mm]	výška svaru
d	[mm]	střední průměr částic v čase t
d_0	[mm]	střední průměr částic v čase t = 0
dt	[s]	časový interval
dε	[mm]	přírůstek deformace
h	[mm]	hloubka průvaru do základního materiálu
l_1	[mm]	střední vzájemná vzdálenost částic vytvrzujících fází
l_2	[mm]	vzdálenost jednotlivých částic
l_e	[mm]	vzájemná vzdálenost velkých částic (př. $M_{23}C_6$ částice)
l_{eff}	[mm]	efektivní vzájemná vzdálenost
l_o	[mm]	délka oblouku
l_s	[mm]	vzájemná vzdálenost malých částic (př. VN částice)
n_v	[-]	počet částic v jednotce objemu
s	[mm]	svařovaná tloušťka
t	[mm]	tloušťka svařovaného materiálu
v_s	[mm.s ⁻¹]	svařovací rychlost
x_α	[%]	obsah legujících prvků rozpuštěných v tuhém roztoku
Ø	[-]	součinitel formy svaru
ε	[-]	deformace
η	[-]	součinitel účinnosti přenosu tepla
ρ	[m ⁻²]	střední hustota dislokací

Zkratka	-	Popis
APT		Svařování automatické pod tavidlem
ESS		Svařování svazkem elektronů
ROE		Ruční obalovaná elektroda
TOO		Tepelně ovlivněná oblast

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Ukázky svařování [25][27][30]	9
Obr. 2 - Graf tečení[33]	10
Obr. 3 - Vliv vzájemné střední vzdálenosti [1].....	11
Obr. 4 – Vliv obsahu Mo na rychlost tečení [22]	12
Obr. 5 – Vliv Mo na mez pevnosti při tečení u CrMoV ocelí [22][23].....	13
Obr. 6 - Princip metody APT [7]	17
Obr. 7 - Rozměry svaru [12].....	18
Obr. 8 - Graf závislosti odtavování materiálu na průměru drátu [6]	18
Obr. 9 - Vliv změny hodnoty svařovacího proudu na změnu formy svaru [7].....	19
Obr. 10 – Graf vlivu velikosti napětí oblouku na hloubku provaření do zákl. materiálu [1] ...	19
Obr. 11 - Vliv úhlu naklonění svařovací hlavy při svařování [7]	20
Obr. 12 – Plněná elektroda [29].....	22
Obr. 13 – Plný drát [29]	22
Obr. 14 - Svařování jedním drátem [7].....	22
Obr. 15 - Svařování dvěma dráty v jednom oblouku [7]	23
Obr. 16 – Svařování tandemové [7].....	24
Obr. 17 - Dvojitě tandemové svařování [7]	24
Obr. 18 - Svařování mutlidrátové[7].....	25
Obr. 19 - Tvar úkosu [8]	26
Obr. 20 - Svařovací hlava ke svařování do úzkého úkosu [24]	26
Obr. 21 - Obrázek dodávky kovového prášku [7].....	27
Obr. 22 - Tepelně ovlivněná oblast a její části[5].....	28
Obr. 23 – Graf vlivu teploty interpass na meze pevnosti [19].....	30
Obr. 24 – Výbrus návaru na oceli 26NiCrMo14-5 v měřítku 6,5:1	32
Obr. 25 – Graf průběhu tvrdosti svaru	33

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Rozdělení žárupevných ocelí dle teplot [1][23]	14
Tabulka 2 – Parametry svařování jedním drátem a dvěma dráty v jednom oblouku [7].....	23
Tabulka 3 – Parametry tandemového, dvojitě tandemového a multidrát. svařování [7]	25
Tabulka 4 – Součinitele účinností jednotlivých technologií [1]	29
Tabulka 5 – Chemické složení oceli 26NiCrMo 14-5 [36].....	31
Tabulka 6 - Chemické složení tavidla OP 121 TTW [17]	31
Tabulka 7 - Chemické složení svařovacího drátu TOPCORE 745 B [32]	32