



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VLIV TAVIDLA NA VLASTNOSTI SVAROVÉHO KOVU

INFLUENCE OF FLUXES ON WELD METAL PROPERTIES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kamil Holub

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2018

# Zadání bakalářské práce

|                   |                                    |
|-------------------|------------------------------------|
| Ústav:            | Ústav strojírenské technologie     |
| Student:          | <b>Kamil Holub</b>                 |
| Studijní program: | Strojírenství                      |
| Studijní obor:    | Základy strojírenského inženýrství |
| Vedoucí práce:    | <b>Ing. Jaroslav Kubíček</b>       |
| Akademický rok:   | 2017/18                            |

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:

## Vliv tavidla na vlastnosti svarového kovu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařování pod tavidlem je pro spojování velkých tloušťek ocelových materiálů stále velmi významná metoda. Mechanické vlastnosti svarového kovu jsou vždy interakcí natavené drátové elektrody a samotného tavidla. Bakalářská práce je zaměřena na vliv různých typů tavidla na mechanické vlastnosti svarového kovu jedné drátové elektrody.

### Cíle bakalářské práce:

1. Vypracování literární studie se zaměřením na svařování pod tavidlem.
2. Zhodnocení současného výběru tavidel.
3. Návrh, zpracování a technické hodnocení experimentu.
4. Formulování závěrů.

### Seznam doporučené literatury:

ASM handbook Welding, brazing, and soldering Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

KOUKAL, Jaroslav a kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

AMBROŽ, Oldřich a kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. 2., upr. vyd. Ostrava ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

TURŇA, Milan. Špeciálne metódy zvarovania, 1vyd. Bratislava: ALFA, 1989. ISBN 80-05-000097-9.

BARTÁK, Jiří a kolektiv autorů. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

ONDREJČEK, Peter. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1. vyd. Bratislava: ETERNA PRESS, 2003. ISBN 80-968359-5-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

HOLUB Kamil: Vliv tavidla na vlastnosti svarového kovu

---

Práce se zabývá problematikou svařování pod tavidlem, což je metoda tavného svařování elektrickým obloukem, při které je tvořena ochranná atmosféra svarové lázně pomocí vrstvy granulovaného tavidla. Teoretická část práce je věnována popisu dané svařovací metody a současného výběru používaných tavidel. V praktické části je proveden experiment, ve kterém jsou zhotoveny dva zkušební návary na konstrukční ocel S235JR s použitím různých tavidel. Pro první návar je použito tavidlo OK Flux 10.62 a pro druhý návar je stejné tavidlo dolegováno přidáním prášku pro laserové navařování Tribaloy T-800. Na zkušebních vzorcích je zkoumán vliv tavidel na vlastnosti svarového kovu při kombinaci s jednou drátovou elektrodou.

Klíčová slova: Tavidlo, drátová elektroda, legovat, chemické složení, svarový kov

## **ABSTRACT**

HOLUB Kamil: Influence of fluxes on weld metal properties

---

This thesis deals with the topic of submerged arc welding – an electric arc method of fusion welding, that uses a layer of granulated flux to shield the weld pool from atmospheric gases. Theoretical part is devoted to the description of the welding method and fluxes currently used. The practical part contains an experiment, which consists of making two weld deposits on structural steel S235JR by using different fluxes. First weld deposit is made with OK 10.62 Flux. The same flux alloyed with the Tribaloy T-800 laser cladding powder is used for the second weld deposit. Test specimens are examined on the basis of influence of fluxes combined with a single electrode wire.

Keywords: Flux, electrode wire, alloy, chemical composition, weld metal

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HOLUB, Kamil. *Vliv tavidla na vlastnosti svarového kovu*. Brno, 2018. 32s, 6 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V ..... dne 25.5.2018

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Taktéž děkuji své rodině za podporu během studia.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Str.

|  |    |
|--|----|
| <b>ÚVOD</b> .....                                    | 1  |
| 0  |    |
| <b>1 SVAŘOVÁNÍ POD TAVIDLEM</b> .....                | 11 |
| 1.1 <b>Zařízení pro svařování pod tavidlem</b> ..... | 11 |
| 1.2 <b>Stabilizace oblouku</b> .....                 | 12 |
| 1.3 <b>Zdroje svařovacího proudu</b> .....           | 13 |
| 1.4 <b>Druhy svarových spojů</b> .....               | 14 |
| 1.4.1 Tupé spoje jednostranné.....                   | 14 |
| 1.4.2 Tupé spoje oboustranné.....                    | 15 |
| 1.4.3 Koutové spoje.....                             | 15 |
| 1.5 <b>Technologické parametry svařování</b> .....   | 16 |
| 1.5.1 Svářecí proud.....                             | 16 |
| 1.5.2 Svářecí napětí.....                            | 17 |
| 1.5.3 Rychlost svařování.....                        | 17 |
| 1.5.4 Úhel svařovací hlavy.....                      | 18 |
| 1.5.5 Množství přidávaného tavidla.....              | 18 |
| 1.5.6 Výlet elektrody.....                           | 18 |
| <b>2 PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY</b> .....                    | 19 |
| 2.1 <b>Elektrody</b> .....                           | 19 |
| 2.1.1 Plněné drátové elektrody.....                  | 19 |
| 2.1.2 Pásové elektrody.....                          | 20 |
| 2.2 <b>Tavidla</b> .....                             | 20 |
| 2.2.1 Technologie výroby tavidel.....                | 21 |
| 2.2.2 Chemické složení tavidel.....                  | 22 |
| 2.2.3 Bazicita tavidel.....                          | 23 |



|          |                                     |    |
|----------|-------------------------------------|----|
| <b>3</b> | <b>EXPERIMENT</b> .....             | 25 |
| 3.1      | <b>Použité zařízení</b> .....       | 25 |
| 3.2      | <b>Použitý materiál</b> .....       | 25 |
| 3.3      | <b>Postup při experimentu</b> ..... | 26 |
| 3.4      | <b>Chemické složení</b> .....       | 28 |
| 3.5      | <b>Tvrдость</b> .....               | 28 |
| 3.6      | <b>Makrostrukturní rozbor</b> ..... | 30 |
| <b>4</b> | <b>TECHNICKÉ HODNOCENÍ</b> .....    | 31 |
| <b>5</b> | <b>ZÁVĚR</b> .....                  | 32 |
|          | Seznam použitých zdrojů             |    |
|          | Seznam použitých symbolů a zkratk   |    |
|          | Seznam obrázků                      |    |
|          | Seznam tabulek                      |    |
|          | Seznam příloh                       |    |

## ÚVOD [1], [2], [3]

Vedle strojírenských technologií, jako obrábění, tváření a povrchové úpravy má svou nezaměnitelnou pozici i svařování. Přestože v porovnání s ostatními technologiemi není nejrozsáhlejší, zpracovává největší objem kovových materiálů a to jak tvářených, tak i litých. Metoda svařování pod tavidlem patří do kategorie tavného svařování, kde dochází přívodem tepelné energie do oblasti svaru k natavení základního, případně přídavného materiálu a následně ke vzniku svarového spoje. Tento proces se neobejde bez ochranné atmosféry, která brání přístupu vzdušného kyslíku a dusíku do místa svaru. Zatímco u běžnějších metod svařování elektrickým obloukem je ochrana zajištěna ochranným plynem, u svařování pod tavidlem zajišťuje ochranu práškové tavidlo. Typ tavidla má podstatný vliv na operativní vlastnosti při svařování a podle kombinace s druhem použitého svařovacího drátu i na vlastnosti získaného svarového kovu.

Automatické svařování pod tavidlem patří mezi nejjakostnější a nejproduktivnější metody svařování kovů. Především pro spojování velkých tloušťek ocelových materiálů je tato metoda velmi významná. Umožňuje vysoké proudové zatížení spolu s vysokou rychlostí svařování. Vlivem rozměrné tavné lázně jsou difúzní pochody mezi natavenou struskou a svarovou lázní velmi intenzivní, což vede ke vzniku velmi čistého svarového kovu s dobrými mechanickými vlastnostmi.

Práce se zabývá studií technologie svařování pod tavidlem a vlivy současně používaných tavidel na výsledné složení a mechanické vlastnosti svarového kovu.



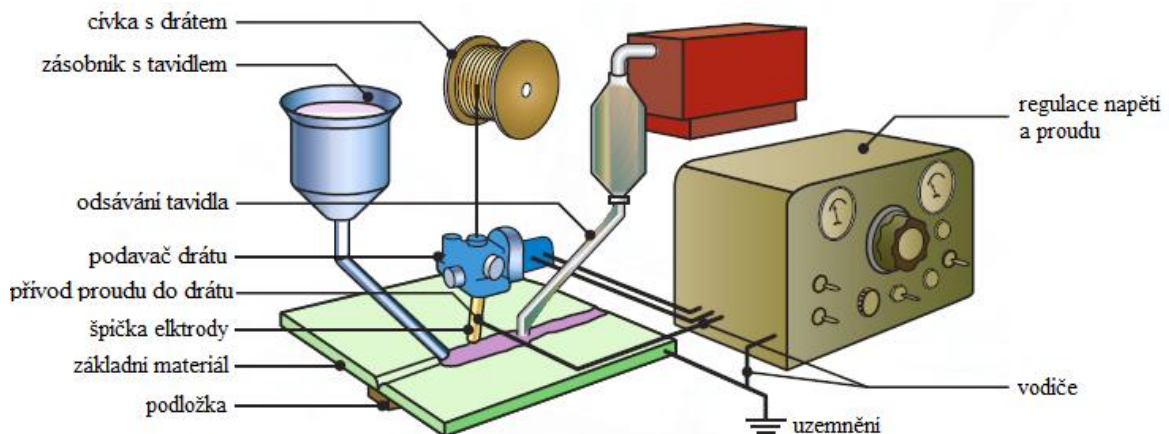
Obr. 1 Aplikace svařování pod tavidlem a oblasti využití [4], [5]

# 1 SVAŘOVÁNÍ POD TAVIDLEM [1], [3], [2], [6]

Svařování pod tavidlem, v zahraničí označované jako SAW (Submerged Arc Welding), je svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou pod vrstvou sypkého tavidla. Teplo pro svařování je generováno obloukem mezi holou kovovou spotřební drátovou nebo páskovou elektrodou a základním svařovaným materiálem. Elektroda je ve formě drátu navinutého na cívce posouvána do hořícího oblouku. Podle toho, zda se celé podávací zařízení s přídatným drátem a tavidlem pohybuje ručně, nebo za pomoci elektromotorem poháněných kladek, je metoda označována jako poloautomatická nebo automatická.

Oblouk je udržován v dutině uvnitř tavidla naplněné plynem, kde se současně taví drát, základní materiál a část tavidla. Ochranu svarové lázně před oxidací zajišťuje práškové tavidlo, které je neustále dodáváno do svarové lázně, což způsobuje, že hořící oblouk není viditelný. Tím se minimalizují emise škodlivých dýmů a záření.

Roztavená část tavidla posléze tuhne a vytváří ochranný struskový kryt nad tavnou lázní a tuhoucím svarovým kovem. Zároveň na sebe váže vyplavené nečistoty, může dolegovávat svarový kov a pozitivně působí i na formování svaru. Vlivem rozměrné tavné lázně jsou difúzní pochody mezi natavenou struskou a svarovou lázní velmi intenzivní, což vede ke vzniku velmi čistého svarového kovu s dobrými mechanickými vlastnostmi. Po dokončení svařování a ztuhnutí kovu se neroztavená část tavidla odstraní.



Obr. 2 Schéma metody SAW [7]

## 1.1 Zařízení pro svařování pod tavidlem [1][ 2]

Vysoká svařovací rychlost a vysoký výkon navaření vyžadují automatické řízení motoru, který zajišťuje podávání svařovacího drátu do svaru. Rychlost pohybu drátu směrem do místa svaru se musí rovnat rychlosti odtavování drátu. Žádný svařeč by nedokázal ručně v porovnání se svařovacím zařízením srovnatelnou vysokou rychlostí plynule podávat drát do lázně a také by nemohl zajistit přesné řízení parametrů svařování. Pohyb hořáku ve směru svařování je zajištěn automaticky, nebo poloautomaticky za pomoci obsluhy. Poloautomatický režim se však vyskytuje už jen velmi zřídka. Zařízení pro svařování pod tavidlem se dá rozdělit na:

- Svařovací automaty - automatizace spočívá v tom, že hořák je umístěn na motoricky poháněném vozíku, který je označován jako „svařovací traktor“, který se pohybuje po kolejnicích (plně automatický) nebo přímo po



Obr. 3 Svařovací traktor A2 Multitrac A2TF [8]

materiálu (směrově veden svářečem). Některé traktory jsou vybaveny inteligentními naváděcími systémy, kde není nutný žádný zásah lidské obsluhy. Svařovací traktor, kromě vlastního hořáku, nese i cívku s drátem a podavač. Dále na něm naleznete násypku na tavidlo a u některých typů i „vysavač“ přebytečného tavidla. Na traktoru je také umístěna řídicí skříň, kde jsou uloženy všechny výkonové prvky pro řídicí činnost automatu. Traktor je kabelem spojen se stacionárním zdrojem svařovacího proudu - svářečkou.



Obr. 5 Svařovací hlava A6S Arc Master [9]

- Svařovací hlavy - mají pojezd pro svařovací rychlost zajišťován samostatně. Pod stacionární svařovací hlavou se musí posouvat svařenec za pomoci polohovadla, které manipuluje se svařencem a zajišťuje jeho vhodnou polohu vůči svařovací hlavě. Svařovací hlavy mohou být snadno přizpůsobeny jakémukoli svařovacímu úkolu. Správná volba jmenovitých hodnot pro svařovací proud, obloukové napětí a rychlost v koordinaci s příslušným zdrojem proudu zajišťuje vysoký stupeň automatizace.
- Jednoúčelové svařovací zařízení - do této kategorie spadají svařovací zařízení, na které je obtížné aplikovat standardní svařovací stroje. Jsou určeny pro výrobu přesně stanoveného svaru. Jde o komplexní zařízení, která kombinují svařovací hlavy nebo automaty s polohovadly, manipulátory a dalšími pomocnými zařízeními.



Obr. 5 Příklad portálového svařovacího zařízení [10]

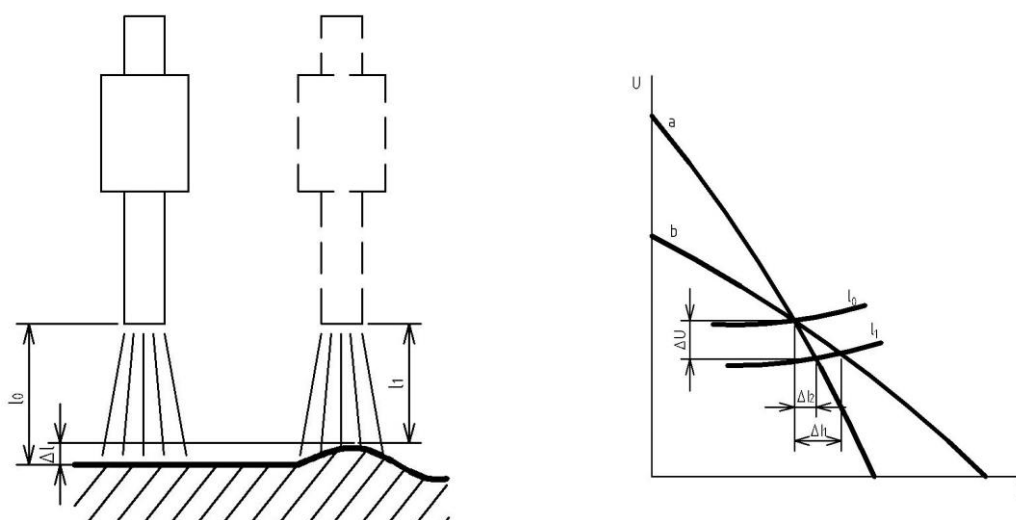
## 1.2 Stabilizace oblouku [4], [1], [2], [6]

Během svařování má hořák konstantní výšku nad svařovaným materiálem a pohybuje se konstantní rychlostí vůči svařenci. V důsledku nerovností na svařovaném materiálu se prodlužuje nebo zkracuje délka elektrického oblouku. Této délce je úměrné svařovací napětí: Jestliže se vzdálenost mezi drátem a svařovaným povrchem zvětšuje, bude i svařovací napětí vyšší. Jestliže se vzdálenost mezi koncem drátu a svařovaným povrchem zmenšuje, bude i nižší napětí na oblouku. Jestliže bude tato vzdálenost konstantní, bude konstantní i napětí. Konstantní délka oblouku může být zajištěna dvěma možnými způsoby:

- regulace plochou statickou voltampérovou (VA) charakteristikou svařovacího zdroje – také nazývána samoregulace. Spočívá v tom, že na změnu napětí na oblouku zdroj s konstantním napětím samovolně reaguje výrazným zvýšením, nebo snížením proudu, což způsobí urychlení a nebo zpomalení odtavování drátu a tím se upraví délka oblouku na původní hodnotu. Závislost proudu na napětí je znázorněna na obrázku 6 křivkou *b*. Drát je do svarové lázně podáván konstantní rychlostí. Tato metoda se ale používá pouze při nižších svařovacích proudech a s přidavnými dráty menších průměrů (3,2 mm a menší). Je nejlepším volbou pro vysokorychlostní svařování tenké oceli.

- regulace strmou statickou VA charakteristikou svařovacího zdroje - na rozdíl od konstantního napětí nejsou zdroje konstantního proudu samoregulační, proto je třeba je používat s řízením rychlosti posuvu drátu. Podavač drátu monitoruje změny napětí na oblouku a v závislosti na nich nastavuje otáčky elektromotoru pohánějícího podávací zařízení drátu. Řízení rychlosti posuvu se pokouší udržet konstantní délku oblouku, zatímco napájecí zdroj řídí proud oblouku. Závislost proudu na napětí při regulaci strmou VA charakteristikou odpovídá na obrázku 6 křivka *a*. Pro stabilní hoření jsou důležité rychlé a precizní zásahy regulátoru.

Při samotném zapalování oblouku je drát posouván vpřed pomocí podavače. Po dotyku konce drátu se základním materiálem dochází k zapálení a okamžitou změnou smyslu otáčení kladek dojde k zasunutí drátu a vytažení elektrického oblouku. Řídicí systém musí včas vyhodnotit situaci a opět rychle změnit smysl otáčení kladek tak, aby byl drát opět posouván ven do svarové lázně.

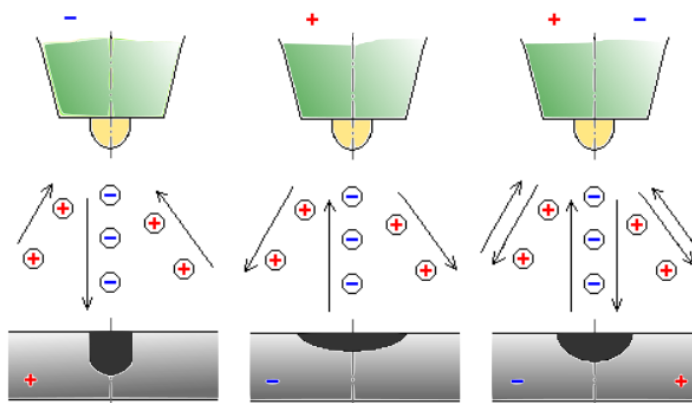


Obr. 6 Strmá a plochá VA charakteristika [1]

### 1.3 Zdroje svařovacího proudu [1], [2], [6]

Při svařování pod tavidlem lze použít jak stejnosměrný, tak střídavý proud. Střídavý proud je nejčastěji používán pro aplikace s vysokým proudem, pro aplikace u nichž může být problém s foukáním oblouku a při vícenásobném napětí.

Zdroje stejnosměrného svařovacího proudu se využívají při svařování s konstantním napětím. Při svařování s konstantním proudem lze využít zdroj stejnosměrného i střídavého proudu. U stejnosměrného proudu máme dále možnost použít tzv. přímou nebo nepřímou polaritu. Při použití přímé polarity je elektroda připojena na záporný pól svařovacího zdroje



Obr. 7 Svařování s DC (přímá a nepřímá polarita) a AC zdrojem [2]

a svařovaný materiál je připojen na kladný pól. Při svařování nepřímou polaritou je zapojení opačné (obr. 7). Polarita je předem stanovena a je založena na tom, zda jsou požadavky na maximální průvar nebo maximální výkon odtavení. Zdroje svařovacího proudu pro svařování pod tavidlem dělíme na:

- rotační svářečky - generují stejnosměrný proud. Jsou tvořeny svařovacím dynamem poháněným elektromotorem nebo spalovacím motorem. Je potřeba zapojit paralelně dvě svářečky. Kvůli velké hmotnosti, hlučnosti a vysoké spotřebě elektrické energie jsou dnes plně nahrazeny polovodičovými usměrňovači.
- usměrňovače- generují stejnosměrný, resp. usměrněný proud. Mají až o 76 % větší účinnost než rotační svářečky. Jsou vhodné pro velké proudové zatížení.
- transformátory - generují střídavý proud. Mají až o 90 % větší účinnost než rotační svářečky. Jsou vhodné při požadavku na hluboký závar tupého svaru.

## 1.4 Druhy svarových spojů [1],[6]

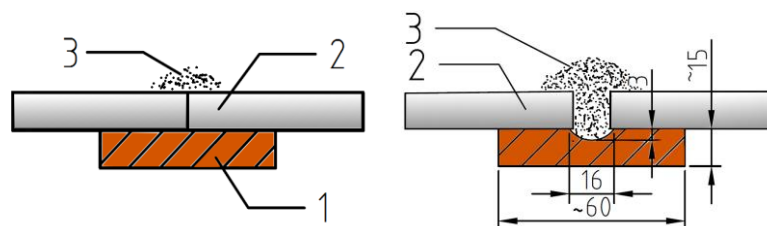
Vzhledem k tomu, že SAW je proces s vysokým přívodem tepla a vysokým stupněm nanášení, je obecně používán pro svařování ocelí s tlustšími průřezy. Objem roztaveného kovu a tekuté strusky je tedy několikanásobně větší než při ručním obloukovém svařování. Proto je zapotřebí věnovat hodně času a energie pro přípravu spojů. Je možné vytvářet svarové spoje s úkosy i bez úkosů a s mezerami i bez mezer. Při přípravě spojů s mezerou je třeba dbát na to, aby všechny spoje byly vyrovnané tak, že bude zajištěna stejnoměrná mezera ve svarových drážkách. U materiálu s tloušťkou větší než 16 mm jsou vyžadovány úkosy, které zajistí přístup ke kořenu svaru. Ten je potřeba podložit svařovací podložkou, která zabrání rozlití tavidla a roztaveného kovu.

Volba svarových spojů a jejich úprava se navzájem liší. U SAW rozlišujeme spoje tupé jednostranné, tupé oboustranné a koutové.

### 1.4.1 Tupé spoje jednostranné [1]

Díky velkému průvaru je možné svařovat tupé spoje z jedné strany až do tlouštěk 15 mm. Pro zachycení roztaveného kovu a tavidla se volí mezi různými druhy podložek:

- měděná podložka - používá se při svařování slabých plechů do tloušťky 3 mm bez mezery (obr.8)
- měděná podložka s tavidlem (obr. 8)

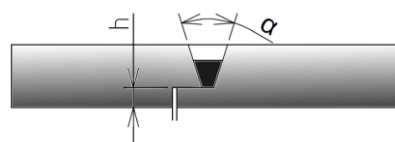


Obr. 8 Měděná podložka (bez tavidla a s tavidlem) [1]

1 – měděná podložka 2 – základní materiál 3 – tavidlo

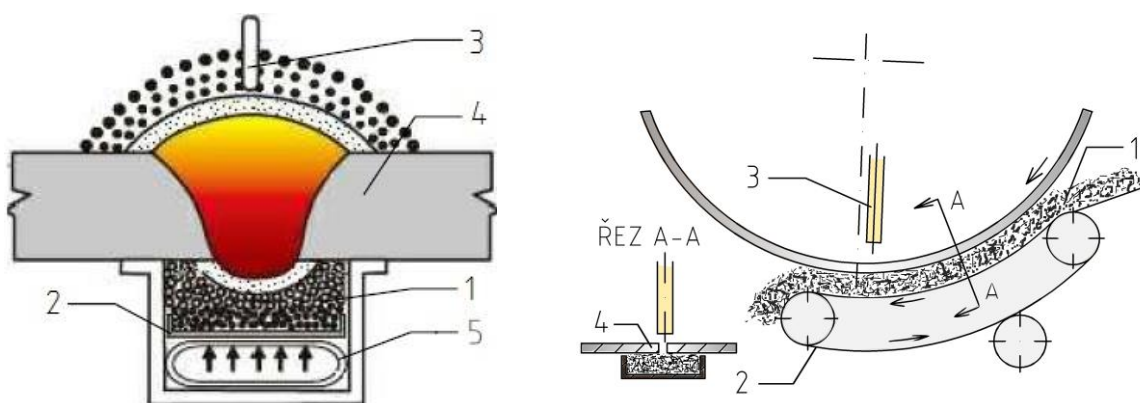
- ocelová podložka - používá se při svařování plechů do 10 mm. Nevhodná pro dynamicky namáhané svarové spoje.
- technologická podložka - k zachycení se využívají tenké plechy přistehované s jedné strany svarového spoje.

- keramická podložka - k zachycení se využívají podložky vyrobené s homogenní technické keramiky sintrováním.
- svařování na zámek (obr. 9) - používá se při svařování válcových nádob a přivařování den k válcovému plášti nádoby. Nevhodné pro dynamicky namáhané svarové spoje.



Obr. 9 Svařování na zámek [1]

- s ručně podloženým kořenem - k zachycení využívá svar zhotovený provařením jedné třetiny celkové tloušťky základního materiálu ručním obloukovým svařováním.
- tavidlová podložka podélných svarových spojů - používá se při svařování plechů nad 4 mm (obr. 10)
- tavidlová podložka obvodových svarových spojů - používá se při svařování tlakových nádob větších průměrů (obr. 10)



Obr. 10 Tavidlová podložka svarových spojů (podélných a obvodových) [1]

1 – tavidlo                      2 – korýtko                      3 – svařovací drát  
4 – základní materiál      5- pryžová hadice naplněná vzduchem

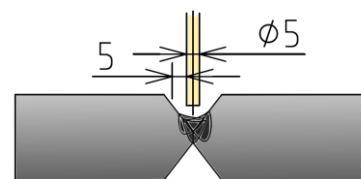
#### 1.4.2 Tupé spoje oboustranné [1]

Hloubka průvaru z první strany by měla zasahovat asi do 2/3 otupení. Protečení roztaveného svarového kovu zabráňuje vrstva tavidla dotlačovaná z druhé strany svarku. Druhá svarová housenka, provedená z opačné strany, musí být svařována takovými parametry, aby bylo zajištěno provaření spodní části první svarové housenky.

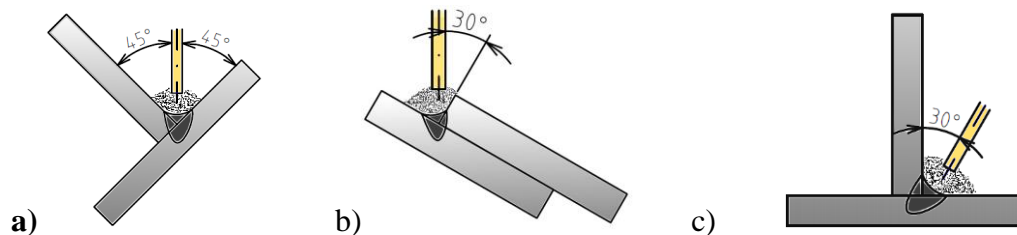
#### 1.4.3 Koutové spoje [1]

U koutových svarů jsou využívány dva způsoby svařování:

- poloze PB - jedná se o svařování v poloze vodorovné šikmo shora. Využívá se tam, kde je třeba dosáhnout rovnoměrného průvaru do obou svařovaných částí (obr. 12 a), nebo výrazného průvaru do jedné ze svařovaných částí (obr. 12 b). Stejně jako u tupých svarů, je třeba vhodný typ podložky k zabránění vytékání svarového kovu a strusky.
- se skloněným drátem - úhel sklonu drátu od vertikální osy je asi 20 až 30°. Vedení elektrody musí probíhat přesně po linii svařování, jinak dochází k podřezání nebo neprůvaru (obr. 12 c).



Obr. 11 Umístění svařovacího drátu v úkose při kladení svarových housenek [1]



Obr. 12 Svařování koutových svarů [1]

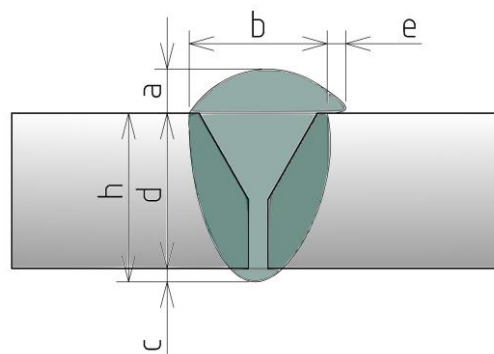
- a) v poloze PB se souměrným postavením stěn
- b) v poloze PB s nesouměrným postavením stěn
- c) ve vertikální poloze se skloněnou elektrodou

### 1.5 Technologické parametry svařování [4], [1]

Při svařování je nutné postupovat tak, aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění základního materiálu vneseným teplem. Jakékoli svařování elektrickým obloukem lze velmi dobře nejen kontrolovat, ale daný postup lze bez problémů opakovat díky stejnému nastavení základních parametrů svařování. Parametry pro svařování pod tavidlem jsou obdobné jako u ostatních metod obloukového svařování s několika výjimkami. Chemické složení, struktura a mechanické vlastnosti svarového spoje z velké části ovlivňuje součinitel formy svaru  $\psi$ . Ten se dá vypočítat z následujícího vzorce:

$$\psi = \frac{b}{h} \tag{1.1}$$

- kde:
- $\psi$  – součinitel formy svaru [-]
  - a – převýšení [mm]
  - b – šířka svaru [mm]
  - c – převýšení kořene [mm]
  - d – záklaní materiál [mm]
  - e – přetečení svaru [mm]
  - h – hloubka průvaru [mm]



Obr. 13 Charakteristické rozměry svaru [13]

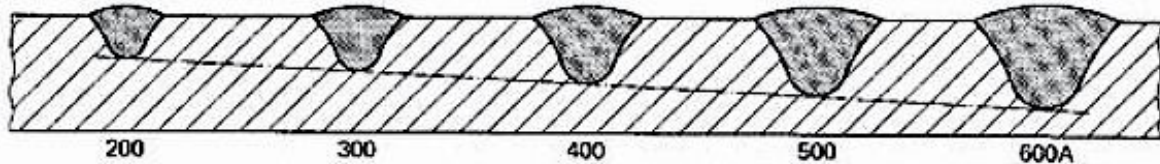
Mezi hlavní proměnné, které ovlivňují charakteristické rozměry svaru (obr. 13) patří svařovací proud, svařovací napětí, délka elektrického oblouku, rychlost pojezdu a množství tavidla.

#### 1.5.1 Svářecí proud [4], [12], [6]

Svařovací proud je proměnná s největším vlivem (viz. příloha 1) Řídí způsob odtavování svařovacího drátu, hloubku závaru a množství roztaveného základního materiálu. Jestliže je svařovací proud příliš vysoký, hloubka závaru bude také velká a svar by mohl protavit podložku. Navíc vyšší vnesené teplo může vytvořit nadměrně velkou tepelně ovlivněnou zónu přilehlou ke svaru, což může vyvolat větší smrštění svaru a tím pádem i deformaci. Příliš vysoký proud také znamená rychlejší úbytek svařovacího drátu a nadměrné převýšení svaru. Naopak když je svařovací proud příliš nízký, dochází k nedostatečné penetraci a nedostatečnému převýšení svaru (obr. 14). Svarový profil je také ovlivěn směrem proudového toku. Proud může být stejnosměrný s kladnou elektrodou (nepřímá polarita), s elektrodou zápornou (přímá polarita) nebo střídavý. Nejčastěji je používána nepřímá polarita. U stejných podmínek svařování bude nepřímá polarita vytvářet širší svarovou



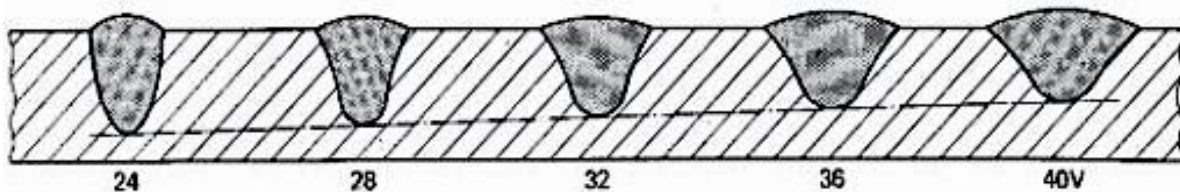
housenku s větší hloubkou závaru při nižší rychlosti nanášení než přímá polarita. Při obtížném sestavení spoje se upřednostňuje přímá polarita. Tvar housenky, hloubka závaru a rychlost nanášení u střídavého proudu odpovídá středu mezi přímou a nepřímou polaritou stejnosměrného proudu. Zdroje střídavého proudu se používají při svařovacím proudu přesahujícím 1000 A a při vícedrátovém svařování.



Obr. 14 Vliv velikosti svařovacího proudu na profil svaru [4]

### 1.5.2 Svářecí napětí [4], [12], [6]

Svářecí napětí je rozdíl potenciálu mezi špičkou svařovacího drátu a povrchem roztaveného svarového kovu a mění se s délkou této mezery, neboli s délkou oblouku. Jestliže se mezera zvětšuje, roste rovněž svařovací napětí a obráceně. Napětí oblouku se mění v užších mezích než svařovací proud a nemá tak velký vliv na množství navařeného drátu jako velikost svařovacího proudu. Velikost svařovacího napětí ovlivňuje především tvar tavné zóny a složení navařeného kovu. Vysoké svařovací napětí způsobuje širší a méně hlubokou penetraci než svařování při nižším napětí (obr. 15). Také zvyšuje spotřebu tavidla, což může ovlivnit složení a vlastnosti navařeného kovu a způsobit jeho praskání. Při nadměrném množství roztaveného tavidla jsou do svarového kovu přeneseny deoxidizéry, které snižují jeho tažnost. Závislost velikosti napětí na rozměrech svaru lze vidět na grafu v příloze 1.



Obr. 15 Vliv velikosti svařovacího napětí na profil svaru [4]

### 1.5.3 Rychlost svařování [4], [12], [6]

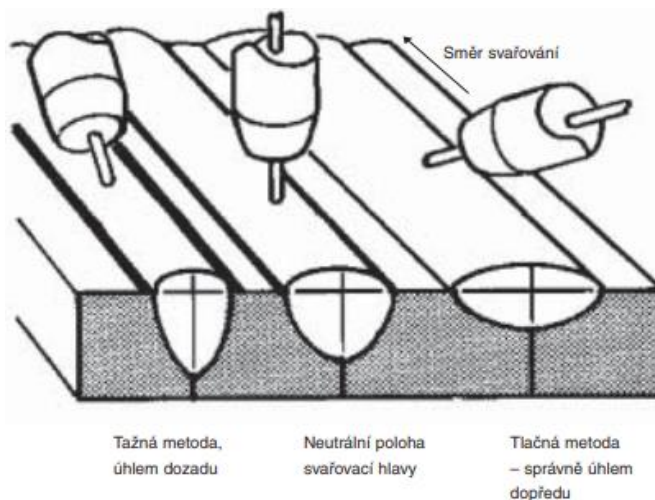
Změny rychlosti pojezdu při nastaveném proudu a napětí také ovlivňují tvar svarové housenky (viz příloha 1). Jestliže se svařovací rychlost zvyšuje, energie nebo množství vneseného tepla na jednotku délky svaru se snižuje a tím se zmenšuje také průřez svarové housenky a hloubka penetrace. To může být výhodou u svařování tenkých plechů, kde jsou požadovány tenké housenky a minimální penetrace. Jestliže je svařovací rychlost příliš vysoká, existuje větší nebezpečí vzniku vrubů. Při malé rychlosti svařování hoří elektrický oblouk téměř kolmo jako důsledek zanedbatelné horizontální složky dynamické síly elektrického oblouku. Následkem toho vzniká velká svarová housenka, což vést k nízké rychlosti ochlazování a tím k nadměrnému růstu zrna, které může být příčinou snížení vrubové houževnatosti svarového kovu.

Mezi sekundární proměnné patří:

- úhel svařovací hlavy
- množství přidávaného tavidla
- výlet elektrody

### 1.5.4 Úhel svařovací hlavy [4], [15]

Jelikož úhel mezi elektrodou a deskou určuje bod nárazu a směr obloukové síly, má rozhodující vliv na profil svařovacího pera a hloubku průniku. Svařování lze provádět vedením elektrody úhlem dopředu (leading), úhlem dozadu (trailing) a nebo vertikálně na povrch desky. Pro většinu aplikací je obvyklé svařovat úhlem dopředu se sklonem asi  $10^\circ$ , aby se dosáhlo nejlepší kombinace tvaru housenky, závaru a odolnosti proti zápalu. Vliv úhlu elektrody na koutové svary je znázorněn na obrázku 16. Penetrace do kořene spoje může být zvýšena snížením úhlu elektrody.



Obr. 16 Vliv úhlu svařovací hlavy na profil svaru [4]

### 1.5.5 Množství přidávaného tavidla [4], [12], [6], [14]

Hloubka vrstvy tavidla není striktně dána. Tavidlo je jednoduše nahromaděno kolem drátu, dokud není oblouk zcela zakrytý. Hloubka vrstvy by měla být dostatečná k zakrytí oblouku. Pokud je vrstva tavidla příliš hluboká, roztaví se nadměrné množství tavidla a svar může být úzký a zvlněný. Mohou se také objevit povrchové nedokonalosti, jelikož plyny vznikající během svařování, nemohou dostatečně unikat skrz vrstvu tavidla a povrch roztaveného kovu je nepravidelně deformován. Jestliže vrstva tavidla je příliš mělká, svařovaná oblast není dostatečně chráněna od okolní atmosféry a svar bude mít špatný vzhled s výskytem porozity. Optimální hloubka vrstvy tavidla je tehdy, když je zabráněno protavení skrze celou vrstvu.

### 1.5.6 Výlet elektrody [4], [12]

Vzdálenost mezi koncem kontaktní špičky a svařovaným dílem je nazýván jako výlet elektrody. Tato proměnná není zanedbatelná, jelikož reguluje množství odporového ohřevu, které se vyskytuje v elektrodě. Obvykle se pohybuje v rozmezí 25-30 mm u měkké oceli a asi 20-25 mm, u nerezavějící oceli. Je-li výlet zvýšen nad tuto délku, způsobí přehřátí elektrodového drátu, což výrazně zvýší rychlost nanášení a penetrace bude značně omezena. Proto je větší výlet užitečný při navařování.

## 2 PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY [2], [6], [16]

Pro svařování pod tavidlem jsou nezbytné dva přídatné materiály: svařovací drát a tavidlo (obr. 17). Chemické a mechanické vlastnosti svaru jsou z velké části závislé na jejich složení. Pevnost a tažnost svarového kovu je větší než u základního materiálu z měkké nebo nízkolegované oceli, za předpokladu, že se použije správná kombinace přídatného drátu a tavidla. Požadavky na vlastnosti svarového kovu je třeba odvodit z požadavků na mechanické vlastnosti svarového spoje, to znamená z potřebné hodnoty meze kluzu, pevnosti či požadované vrubové houževnatosti. Vlastnosti spoje by se měly co nejvíce přiblížit vlastnostem základního materiálu. V úvahu je nutno vzít především:

- chemické složení svařovacího drátu, u nelegovaných ocelí hlavně s ohledem na obsah uhlíku, manganu a křemíku,
- propal resp. možnost dolegování některých prvků při stanovených podmínkách svařování s konkrétním tavidlem,
- obsah manganu v základním materiálu a charakter promísení podle typu spoje.



Obr. 17 Příklady přídatných materiálů a jejich balení od výrobce ESAB [17]

### 2.1 Elektrody [1], [6]

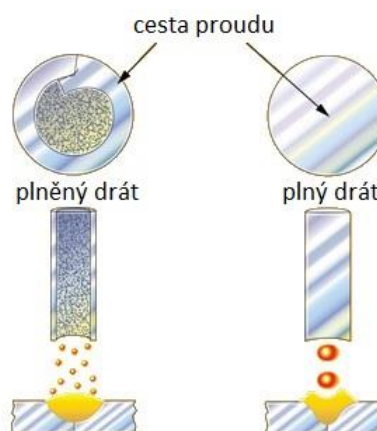
Běžné elektrody používané pro svařování pod tavidlem jsou ve formě drátu leskle taženého za studena, jehož průměr se pohybuje od 1,6 do 6,4 mm. Nejběžnější jsou průměry 3,2 a 4 mm. Mají nízký obsah fosforu a síry a zpravidla vysoký obsah manganu. Drát z uhlíkové oceli má obvykle lehký měděný povlak, který chrání drát před korozí a poskytuje dobrý elektrický kontakt ve svařovacím hrotu. Pro SAW jsou k dispozici elektrody pro svařování uhlíkové oceli, nízkolegované oceli, nerezové oceli a niklové slitiny.

#### 2.1.1 Plněné drátové elektrody [4], [19]

Použití plněných elektrod je velmi jednoduchou a snadnou cestou jak zvýšit produktivitu a výkon svařování pod tavidlem bez zásadních změn existujícího zařízení. Obvykle se sestávají z trubkového obalu z měkké oceli s legujícími prvky ve středu. U metody SAW jsou používány dva typy:

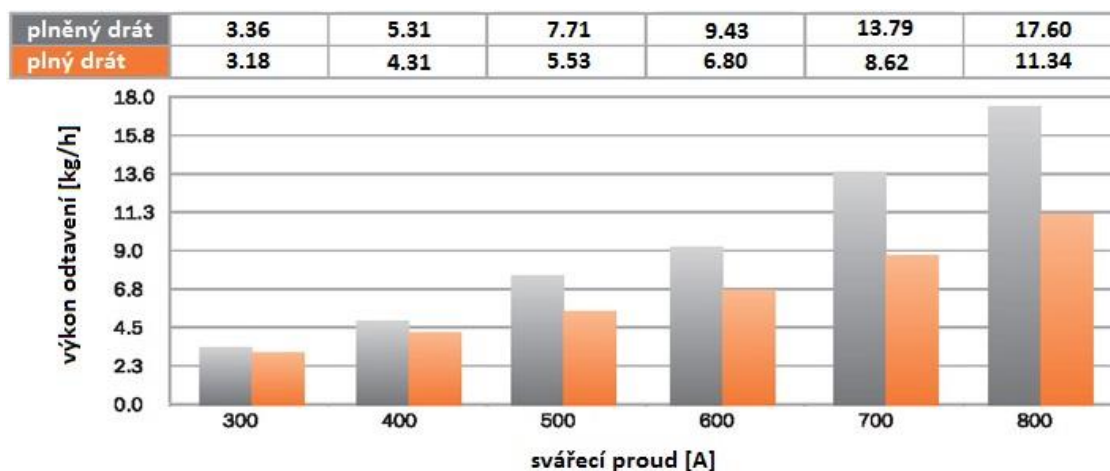
- s náplní kovového prášku – vhodné pro koutové svary
- s náplní bazickou – vhodné pro tupé svary

Při jejich použití je proud veden pouze ocelovým obalem (obr. 18), což znamená zvýšení proudové hustoty a současně i vyšší výkon odtavování, který tak může být o 20 až 30 % vyšší ve srovnání s plným drátem stejného průměru a při stejném svařovacím proudu. Srovnání výkonu odtavování plné a drátové elektrody lze vidět na obrázku 19. Další výhodou jsou vynikající mechanické vlastnosti svarového kovu,



Obr. 18 Profil a odtavení plněné a plně drátové elektrody [18]

kteřé jsou dosaženy díky dezoxidačním přísadám v náplni elektrody i přes vysoký tepelný příkon. Důležitou roli hrají zejména mikrolegované plněné elektrody. Při jejich použití je zaručena dostatečná nárazová práce i pro extrémní teploty až  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve stavu po svařování, což nelze realizovat obvyklými plnými elektrodami. Toho je dosaženo tím, že během fáze tuhnutí je potlačeno tvoření podeutektoidního feritu a to díky mikrolegováním náplně plněné elektrody. Austenit se přemění na velmi jemnozrnný ferit. Tato struktura propůjčuje svarovému kovu i bez rekrystalizace jeho vysokou houževnatost. Hloubka průvaru je vždy nižší, než při svařování plným drátem, což je potřeba vzít v úvahu při nastavování parametrů svařování v kořenové oblasti svarů a také při zhotovování tupých svarů.



Obr. 19 Srovnání výkonu odtavení při stejnosměrném proudu u plné a plněné elektrody s průměrem 3,2 mm [20]

### 2.1.2 Pásové elektrody [12], [6], [3]

Pásové elektrody se obecně používají pro korozivzdorné návary na měkké a legované oceli. Vytváří širokou svarovou housenku s nízkou penetrací při vysoké rychlosti nanášení. Zařízení je obdobné jako při svařování drátem, s výjimkou speciálních hnacích válců, které jsou potřebné k podávání pásky. Používají se ke korozivzdorným návarům na povrchy nádob (obr. 20), aby bylo dosaženo odolnosti proti korozi při využití pevnosti a hospodárnosti nízkolegovaných ocelí s širokým průřezem. Tloušťky pásky se pohybují od 0,5 do 1,0 mm a šířky se pohybují od 25 do 100 mm, nejběžnější je páska 0,5 x 60 mm.



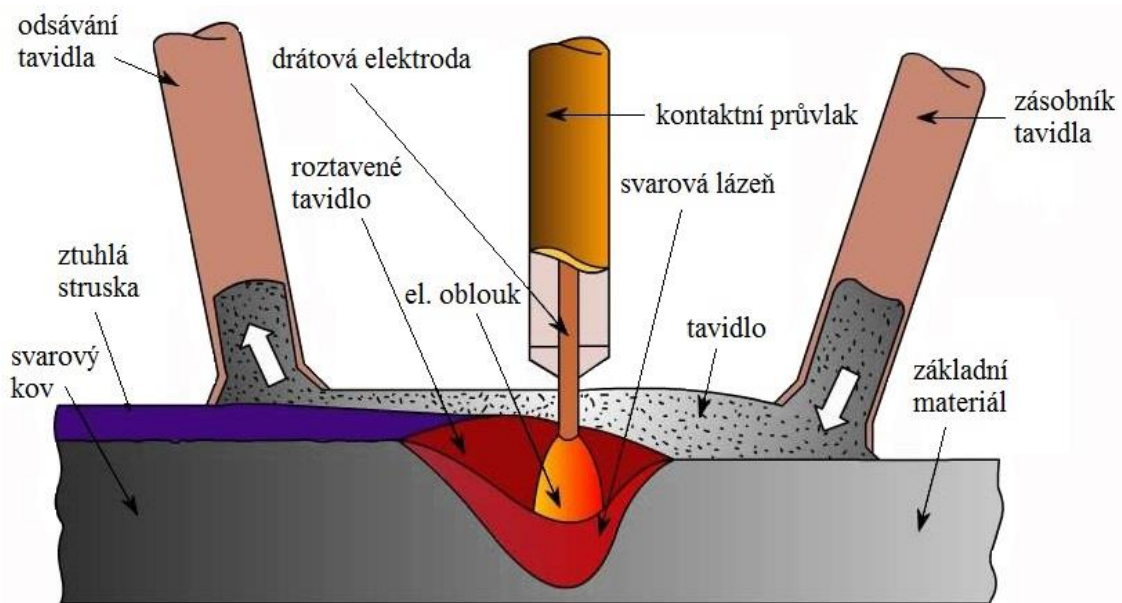
Obr. 20 Navařování pásovou elektrodou [21]

## 2.2 Tavidla [4], [22], [23], [2]

Většina kovů v roztaveném stavu je oxidována atmosférickým kyslíkem. Hlavním úkolem tavidla je chránit oblouk, tavnou lázeň i tuhnoucí svarový kov před tímto vlivem okolní atmosféry. Kromě toho zvyšuje vodivost ve sloupci oblouku, dolegovává svarový kov, vytváří strusku, která formuje taveninu v okolí oblouku a má vliv na tvar a povrch svarové housenky. Schéma svařovacího procesu s využitím tavidla je znázorněno na obrázku 21. Tavidla jsou založena na minerálech jako je křemen, vápenec, kazivec a kysličníky manganu a hliníku. Jsou speciálně navržena tak, aby byla kompatibilní s danými dráty elektrody, takže kombinace tavidla a drátu přináší

požadované mechanické vlastnosti. Svými izolačními vlastnostmi vytváří příznivé podmínky pro velmi vysoké proudové hustoty, což umožňuje koncentraci tepla do relativně malé svařovací zóny. Tavidlo v pevném stavu není vodič elektrického proudu, ale v roztaveném stavu se stává vysoce vodivým. Obsahuje prvky schopné pomoci při zapalování oblouku a při jeho stabilizaci později. Tavidla jsou granulovitá a jsou schopna volně proudit přes přírodní trubky, ventily a trysky standardního svařecího zařízení. Lze je rozdělit do několika skupin podle:

- technologie výroby
- chemického složení
- stupně bazicity



Obr. 21 Princip svařování pod tavidlem [24]

### 2.2.1 Technologie výroby tavidel [4], [22], [3], [25], [6]

Podle technologie výroby lze tavidla rozdělit mezi následující druhy:

- tavená tavidla – při jejich výrobě se suroviny společně smísí za sucha a poté se pomocí elektrické obloukové pece roztaví do kapalného stavu. Tavicí teplota se pohybuje mezi 1200 až 1400 °C. Po odlití a ztuhnutí taveniny je rozemleta na zrna, která jsou dále sušena a prosévána. Pro zajištění optimálního výkonu pro různé aplikace jsou vyráběny různé velikosti zrn. Charakteristikou tavených tavidel je chemická homogenita jednotlivých zrn, která je podobná rozemletému sklu (obr. 22). Pevnost zrn je větší než u tavidel aglomerovaných. To může být výhodné tam, kde je tavidlo pneumaticky dopravováno na větší vzdálenosti. Nehygroskopické částice taveného tavidla neabsorbují vlhkost a běžně nemusí být před



Obr. 22 Struktura taveného tavidla [26]

použitím vysoušena. Proto jsou vhodnou volbou tam, kde není možné vysoušení tavidla před použitím. Jakákoliv povrchová vlhkost může být odstraněna pouze nízkoteplotním vysoušením částic při 200 °C, což také zaručí lepší ochranu proti tvorbě vodíku. Při navařování, mohou tavená tavidla poskytovat lepší výsledky, než tavidla aglomerovaná. v kombinaci s bazickými plněnými elektrodami získáme i vysoké hodnoty vrubové houževnatosti a mohou být použita i u oceli, citlivých na vodík.

- Aglomerovaná tavidla (obr. 23) – jejich výchozí suroviny jsou rozemlety na určitou zrnitost. Jsou spojeny za přítomnosti keramických pojidel vznikají zrna, která obsahují potřebný poměr jednotlivých složek. Ta jsou dále sušena a žhána při teplotách mezi 600 až 850 °C. Během výroby těchto tavidel nedochází k reakci mezi složkami. Díky tomu mohou být při jejich výrobě jako surovina přidány i dezoxidační přísady a další legující prvky, které zlepšují chemické a mechanické vlastnosti tavidla. Výsledkem jsou lepší hodnoty vrubové houževnatosti svarového kovu při minusových teplotách ve srovnání s použitím tavených tavidel. Díky nižší hustotě je jejich spotřeba při svařování nižší a poskytují příznivější vzhled svarové housenky, než tavidla tavená. Jde o tavidla hygroskopická, která absorbují vlhkost. Doporučuje se jejich přesušení, a to hlavně při svařování oceli, náchylných na vodíkové praskání.



Obr. 23 Struktura aglomerovaného tavidla [26]

Obdobným principem jako tavidla aglomerovaná se také vyrábí tavidla, která jsou spojována pomocí kapalného pojiva, jako jsou křemičitan sodný nebo křemičitan draselný. Suší se při 400 – 500 °C a nevyžadují proces žhání.

Tavidla mohou být mechanicky smíchány kombinací dvou nebo více tavidel. Ačkoli mechanicky smíchaná tavidla umožňují vytvářet speciální směsi pro citlivější svary, mohou se oddělit během skladování, použití a zpětného získávání tavidla.

### 2.2.2 Chemické složení tavidel [4], [22], [27], [6]

Stejně jako povlak ruční elektrody, tavidlo může obsahovat určité množství legujících prvků tak, že v kombinaci s nelegovaným drátem lze získat vhodně legovaný svarový kov. Mnoho druhů tavidel leguje Si a Mn do svarového kovu, jiné způsobují vyhoření těchto prvků (obr. 24). Intenzita probíhajících chemických reakcí závisí na velikosti reakce s použitým drátem. Změny svařovacích proměnných způsobují změnu poměru spotřebovaného tavidla vůči elektrodě nebo svarovému kovu. Běžný poměr tavidlo-drát pro SAW je 0,7 až 0,9. Zvýšení poměru tavidlo-drát může být způsobeno buď zvýšením napětí na oblouku nebo snížením svařovacího proudu. v závislosti na schopnosti měnit obsah legur ve svarovém kovu můžeme tavidla rozdělit mezi aktivní, neaktivní a legující.

- Aktivní tavidla - dodávají do svarového kovu významný obsah Si jako dezoxidačního prvku a Mn jako legury do svarového kovu. To pomáhá ke zvýšení odolnosti proti pórovitosti a zvyšuje vzhled svaru a houževnatost při náročných aplikacích. Jsou využívána především pro jednovrstvé svary nebo pro vícevrstvé svary s omezením počtu vrstev. U vícevrstvého svařování musí být pečlivě kontrolováno napětí, aby se zabránilo přílišnému vytváření manganu a křemíku. Mohlo by dojít k jejich nadměrnému nahromadění, což způsobuje, že svary jsou křehké a náchylné k trhlinám.

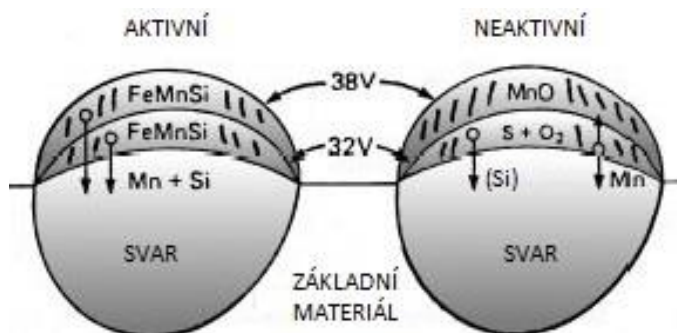
- Neaktivní tavidla - obsahují pouze málo nebo žádné deoxidátory a nezpůsobí významnou změnu v chemickém složení svarového kovu, ani v důsledku velké změny napětí na oblouku. Jelikož neaktivní tavidla neobsahují žádné legury, nebo jen velmi omezené množství, musí se spoléhat na jejich výskyt v elektrodě, která je s tavidlem použita. Neaktivní tavidla se používají především pro vícevrstvé svařování.

Pro kvantifikaci aktivního/neaktivního chování tavidla bylo vytvořeno tzv. „Wall neutrality number“ (N), které je definováno jako:

$$N = 100 \cdot [|\Delta\%Si| + |\Delta\%Mn|], \quad (2.1)$$

kde:  $\Delta\%Si$  - změna hmotnostních procent křemíku  
 $\Delta\%Mn$  - změna hmotnostních procent manganu.

Wall neutrality number se vypočítá tak, že se odeberou dva vzorky svarových kovů z předem stanovených vzorků svařovaných destiček. Jedna z těchto destiček je svařována s parametry danými dle výběru tavidla a elektrody a druhá je svařována se stejnými parametry, pouze napětí je zvýšeno o 8 V. Rozdíl v množství obsaženého Mn a Si mezi jednotlivými destičkami odpovídá údajům  $\Delta\%Si$  a  $\Delta\%Mn$  v rovnici 2.1. Kombinace tavidla a elektrody, která produkuje Wall neutrality number 40 nebo méně, je považována za neaktivní, zatímco číslo 40 označuje aktivní tavidlo.



Obr. 24 Dodání legur do svarového kovu [22]

- Legující tavidla - dodávají do svarového kovu např. C a Cr stejně tak, jako Si a Mn. Jsou používána k dolegování svarového kovu při použití tavidla v kombinaci s svařovacími dráty z uhlíkové oceli, ale i s nerezovými dráty a páskovými elektrodami. Stupeň legování závisí na napětí na oblouku, které má vliv na přechod prvků z roztaveného tavidla. Při požadavku na vznik speciálního svarového kovu musí být proto napětí při svařování přísně kontrolováno.

### 2.2.3 Bazicitu tavidel [4], [27], [23], [6]

Bazicitu tavidla se vypočítá z obsahu jednotlivých složek v tavidle nezávisle na typu drátu. Jedná se o poměr silně vázaných oxidů kovu k slabě vázaným oxidům kovu a používá se k predikci vlastností svarového kovu. Vyšší bazicita poskytuje vyšší hodnoty nárazové práce, ale znamená např. omezení svařovací rychlosti. Proto je z ekonomického hlediska vhodné vybírat tavidlo s nejnižší bazicitou, která postačuje k dosažení potřebné minimální nárazové práce svarového kovu. Z řady různých výpočtů bazicity je všeobecně uznáván způsob výpočtu podle Boniszewského, kde se koeficient bazicity počítá podle vzorce:

$$B = \frac{CaO + MgO + Na_2O + K_2O + CaF_2 + \frac{1}{2}(MnO + FeO)}{SiO_2 + \frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}, \quad (2.2)$$

kde: B – bazicita tavidla

Rozdělení tavidel podle výsledku výpočtu dle tohoto vzorce je uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1 Klasifikace tavidel podle koeficientu bazicity [23].

| druh tavidla       | B [-]     | teplota tání [°C] |
|--------------------|-----------|-------------------|
| s nízkou bazicitou | < 0.9     | 1100 ÷ 1300       |
| neutrální          | 0.9 ÷ 1.2 | 1300 ÷ 1500       |
| bazické            | 1.2 ÷ 2.0 | > 1500            |
| vysoce bazické     | > 2.0     | > 1500            |

Ze vzorce vyplývá, že tavidla s nízkou bazicitou obsahují více komplexních kysličníků, což je příznivé pro tvorbu mikrostruktury svaru. Zvyšují odolnost vůči pórovitosti způsobené kontaminací svarového kovu olejem, rzí a okujemi z válcování. s tavidly s nízkou bazicitou se dá svařovat při vyšších rychlostech s menším rizikem zápalu. Umožňují jednodušší odstranění strusky a díky tomu je lze využít u malých těsných spojů, v hlubokých drážkách nebo koutových svarech. Bazická tavidla mají obecně lepší účinky na svarový kov u větších vícevrstvých svarů než tavidla s nízkou bazicitou. Vysoce bazická tavidla vytvářejí svarový kov vysokými hodnotami nárazové práce. Mají však tendenci vykazovat horší vlastnosti svařování než nízkobazická tavidla u jednovrstvých svarů.



### 3 EXPERIMENT

V experimentální části práce byly zhotoveny návary na zkušebním vzorku svařovací metodou SAW. Cílem experimentu je porovnat vliv použitých tavidel na výsledný svarový kov z hlediska makrostruktury a chemického složení.

#### 3.1 Použité zařízení

Jako zdroj svařovacího proudu byl použit transformátor TRT 1000 (obr. 25) od výrobce ZEZ Hořice s maximálním výstupním proudem 1000 A. Hořák byl veden pomocí svařecího traktoru WST 1000 s plynulou regulací rychlosti pojezdu v rozsahu  $8 - 60 \text{ m}\cdot\text{hod}^{-1}$  a s rychlostí podávání drátu v rozsahu  $0,55 - 12,8 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .



Obr. 25 Svařovací zařízení ZEZ TRT 1000/WST 1000

#### 3.2 Použitý materiál [4], [16], [28]

Jako základní materiál byla použita destička o rozměrech  $90 \times 250 \times 10 \text{ mm}$  z běžné nelegované konstrukční oceli S235JR, jejíž technologické vlastnosti jsou uvedeny v příloze 2. Charakteristické chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách 2 a 3.

Tab. 2 Chemické složení oceli S235JR [29].

| Chemické složení oceli S235JR |      |            |              |              |              |
|-------------------------------|------|------------|--------------|--------------|--------------|
| prvek                         | C    | Mn         | P            | S            | N            |
| hm. %                         | 0,19 | $\leq 1,5$ | $\leq 0,045$ | $\leq 0,045$ | $\leq 0,014$ |

Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli S235JR [29].

| Mechanické vlastnosti oceli S235JR |             |       |                 |
|------------------------------------|-------------|-------|-----------------|
| $R_{eH}$ [MPa]                     | $R_m$ [MPa] | A [%] | KV [J] při 27°C |
| 235                                | 360 - 510   | 26    | 27              |

Jako elektroda byl zvolen poměděný drát OK Autrod 12.22 od výrobce ESAB (viz příloha 3) s průměrem 3,2 mm. Drát je určen pro svařování nelegovaných, nízkolegovaných a žáropevných ocelí. Charakteristické chemické složení drátu je znázorněno v tabulce 4.

Tab. 4 Chemické složení drátu OK 12.22 [16].

| Chemické složení drátu OK Autrod 12.22 |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| prvek                                  | C     | Si    | Mn    | P     | S     | Cr    | Ni    | Mo    |
| hm. %                                  | 0,100 | 0,190 | 1,010 | 0,013 | 0,010 | 0,030 | 0,030 | 0,010 |

Pro experiment byly zvoleny typy tavidel. Pro první návar bylo použito tavidlo OK Flux 10.62 od výrobce ESAB (viz příloha 4). Jde o aglomerované vysoce bazické tavidlo určené pro vícevrstvé tupé svary bez omezení tloušťky u nelegovaných, středně i vysoce pevných ocelí s požadavkem na vysokou vrubovou houževnatost při nízkých teplotách až do -40 až -60°C. Vzhledem k legování svarového kovu Mn a Si je považováno za neutrální. Je vhodné pro svařování při použití jak střídavého, tak stejnosměrného proudu. Typické chemické složení a mechanické hodnoty čistého svarového kovu v kombinaci s drátem OK Autrod 12.22 při DC+ jsou znázorněny v tabulkách 5 a 6.

Tab. 5 Chemické složení čistého svarového kovu [4].

| Chemické složení svarového kovu |      |      |      |
|---------------------------------|------|------|------|
| prvek                           | C    | Si   | Mn   |
| hm. %                           | 0,07 | 0,30 | 1,00 |

Tab. 6 Mechanické vlastnosti čistého svarového kovu [4].

| Mechanické vlastnosti čistého svarového kovu |                      |       |               |     |     |
|--|----------------------|-------|---------------|-----|-----|
| R <sub>eL</sub> /R <sub>p0,2</sub> [MPa]     | R <sub>m</sub> [MPa] | A [%] | KV [J při °C] |     |     |
|  |                      |       | -40           | -50 | -60 |
| 410  | 500                  | 33    | 90            | 70  | 40  |

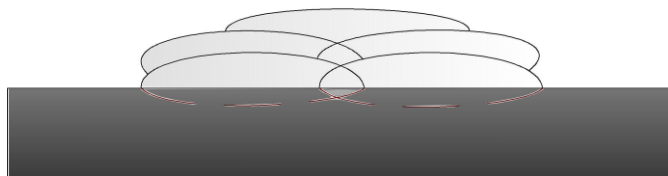
Pro druhý návar bylo předchozí tavidlo OK Flux 10.62 smíchano s práškem pro plazmové a laserové navařování Tribaloy T-800 (viz. příloha 5) v poměru 10:1 (100 g T-800 na 1000 g tavidla). Tato prášková směs na bázi kobaltu se využívá u aplikací, kde je vyžadována vysoká korozní odolnost, odolnost proti oxidaci při vysokých teplotách a vysoká odolnost proti kluznému opotřebení a zadírání. Jeho charakteristické chemické složení je uvedeno v tabulce 7.

Tab. 7 Chemické složení prášku Tribaloy T-800 [31].

| Chemické složení prášku Tribaloy T-800 |        |        |        |       |       |         |
|--|--------|--------|--------|-------|-------|---------|
| prvek                                  | Co     | Cr     | Mo     | C     | Si    | ostatní |
| hm. %                                  | základ | 17,50% | 28,50% | <0,1% | 3,50% | Ni, Fe  |

### 3.3 Postup při experimentu

Zvolený základní materiál byl za pomoci univerzální upínky uchycen na pracovním stole tak, aby se zamezilo jeho pohybu během procesu navařování. Návary byly provedeny v poloze PA (vodorovně shora). Nejprve bylo navařeno pět housenek s tavidlem OK Flux 10.62 ve třech vrstvách (obr. 26) s danými parametry svařování (tab. 8). Po nanesení a zchládnutí každé housenky byl návar očištěn od vzniklého ochranného struskového krytu (obr. 29). Dalších pět housenek bylo navařeno s tavidlem dolegovaným pomocí prášku



Obr. 26 Kladení housenek při experimentu

Tribaloy T-800. Postup navařování byl v obou případech stejný.

Po zhotovení obou návarů následovala zkouška chemického složení pomocí emisního spektrometru a metalografický výbrus vzorku k získání ploch pro měření tvrdosti pomocí tvrdoměru.

Tab. 8 Svařovací parametry.

| Parametry svařování |            |   |  |
|---------------------|------------|---|--|
| proud [A]           | napětí [V] | rychlost svařování<br>[mm·s <sup>-1</sup> ] | průměrná spotřeba<br>drátu [mm·s <sup>-1</sup> ] |
| 380 - 470           | 26 - 30    | 5,6   | 20   |



Obr. 27 Svarová housenka s ochranným struskovým krytem (nelegované tavidlo)



Obr. 29 Svarové housenky s odstraněnou struskou (nelegované tavidlo)



Obr. 28 Svarová housenka s ochranným struskovým krytem (dolegované tavidlo)

### 3.4 Chemické složení [32], [33]

Chemické složení výsledného svarového kovu bylo určeno pomocí stolního jiskrového atomového emisního spektrometru Q4 TASMAN, který slouží k analýze kovových materiálů.

Působením vysokých teplot budícího zdroje - v tomto případě jiskrovým výbojem (obr. 30) - je vzorek rozložen na volné atomy a ty jsou převedeny do vzbuzeného stavu. Při přechodu těchto částic do

energeticky nižších stavů, částice vyzařují elektromagnetické záření při vlnových délkách, které jsou charakteristické pro jednotlivé prvky. Vzniklé nespojité záření o různých vlnových délkách je optickým zařízením rozloženo na paprsky jednotlivých vlnových délek.



Obr. 30 Vzorek po zkoušce chemického složení

Pomocí detektoru je změřena intenzita záření na různých vlnových délkách (spektrum). Podle intenzity záření při vlnové délce charakteristické pro sledovaný prvek se určí koncentrace tohoto prvku ve vzorku (kvantita) a podle vlnových délek, při nichž bylo vyzařováno zjistíme, které prvky jsou ve vzorku (kvalita). Výsledná chemická složení obou svarových kovů lze vidět v tabulkách 9 a 10.

Tab. 9 Chemické složení svarového kovu - nelegované tavidlo (viz. příloha 5).

| Chemické složení výsledného svarového kovu (nelegované tavidlo) |      |       |       |       |       |       |
|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| prvek   | C    | Si    | Mn    | Cr    | Ni    | Cu    |
| hm. %   | 0,03 | 0,375 | 1,365 | 0,118 | 0,056 | 0,116 |

Tab. 10 Chemické složení svarového kovu – dolegované tavidlo (viz. příloha 6).

| Chemické složení výsledného svarového kovu (dolegované tavidlo) |        |       |      |       |       |       |       |
|---|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| prvek   | Co     | Cr    | Mo   | C     | Si    | Cu    | Ni    |
| hm. %   | <0,005 | 15,94 | 13,2 | 0,078 | 2,716 | 0,087 | 0,751 |

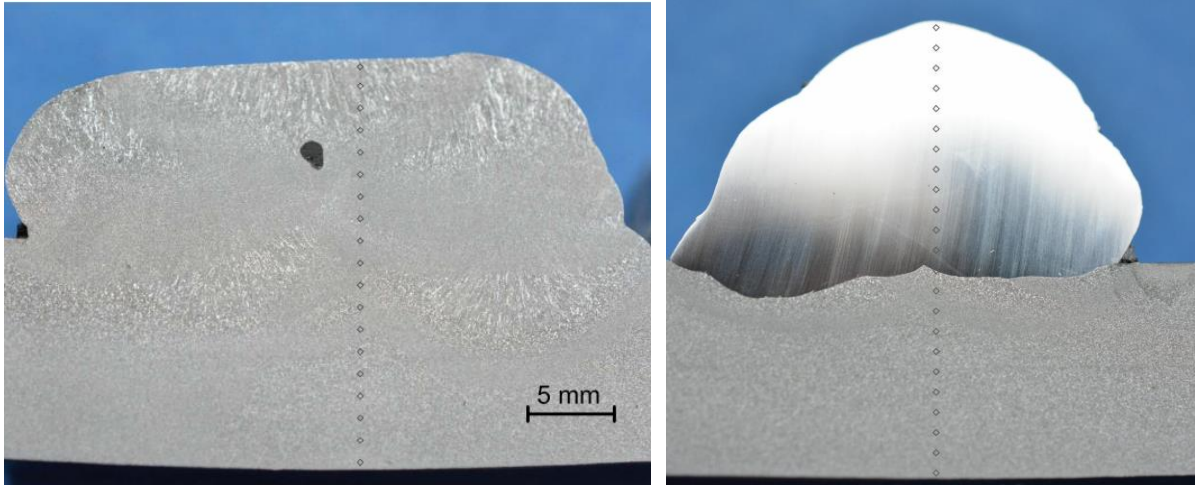
### 3.5 Tvrdost [34]

Principem měření tvrdosti je zkoušení odporu materiálu proti statickému nebo dynamickému vnikání cizího tělesa. Zkouška probíhala dle Vickerse, kde je vnikajícím tělesem diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136°. Tvrdost je hodnocena podle střední úhlopříčky vtisku při běžném zatížení 294 N po dobu max. 15 s. Výpočet tvrdosti podle Vickerse je dán vzorcem:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{a^2}, \quad (3.1)$$

kde: F – zatížení [N]  
a – střední úhlopříčka vtisku [mm]

Měření tvrdosti bylo provedeno na obou vzorcích návaru přes tepelně ovlivněnou oblast do základního materiálu, jak je patrné z obrázku 31. K měření byl použit tvrdoměr Zwick 3212, který se využívá ke stanovení tvrdosti dle Vickerse jak u běžných ocelí, tak u vysoce tvrdých materiálu a vrstev v rozmezí HV0,2 – HV10. Hodnoty z jednotlivých měření jsou uvedeny v tabulce 11.



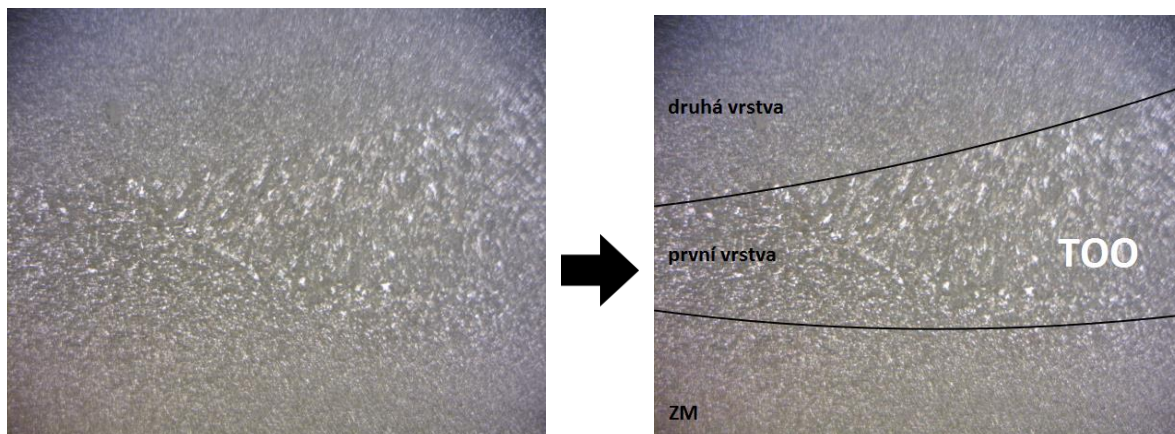
Obr. 31 Měření tvrdosti na profilech svarů

Tab. 11 Naměřené tvrdosti svarového kovu

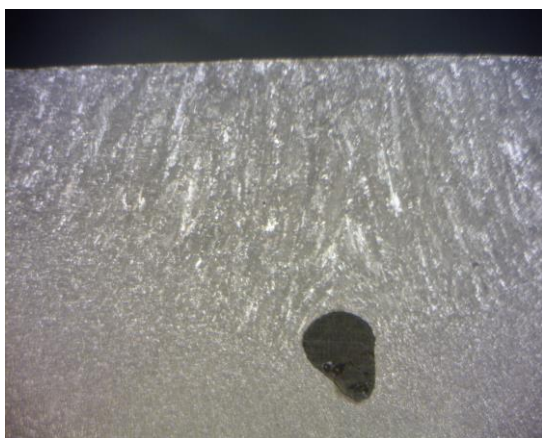
| Nelegované tavidlo |      |        | Dolegované tavidlo |      |        |
|--------------------|------|--------|--------------------|------|--------|
| vtisk              | HV 5 | oblast | vtisk              | HV 5 | oblast |
| 1                  | 90   | ZM     | 1                  | 99   | ZM     |
| 2                  | 92   |        | 2                  | 98   |        |
| 3                  | 94   |        | 3                  | 101  |        |
| 4                  | 95   |        | 4                  | 103  |        |
| 5                  | 102  |        | 5                  | 103  |        |
| 6                  | 109  |        | 6                  | 108  |        |
| 7                  | 125  |        | 7                  | 104  |        |
| 8                  | 125  | návar  | 8                  | 103  | návar  |
| 9                  | 127  |        | 9                  | 106  |        |
| 10                 | 118  |        | 10                 | 454  |        |
| 11                 | 121  |        | 11                 | 452  |        |
| 12                 | 124  |        | 12                 | 473  |        |
| 13                 | 128  |        | 13                 | 473  |        |
| 14                 | 127  |        | 14                 | 473  |        |
| 15                 | 127  |        | 15                 | 473  |        |
| 16                 | 126  |        | 16                 | 480  |        |
| 17                 | 128  |        | 17                 | 480  |        |
| 18                 | 136  |        | 18                 | 488  |        |
| 19                 | 134  |        | 19                 | 488  |        |
|                    |      |        | 20                 | 483  |        |
|                    |      |        | 21                 | 481  |        |
|                    |      |        | 22                 | 481  |        |
|                    |      |        | 23                 | 490  |        |

### 3.6 Makrostrukturní rozbor [34], [35]

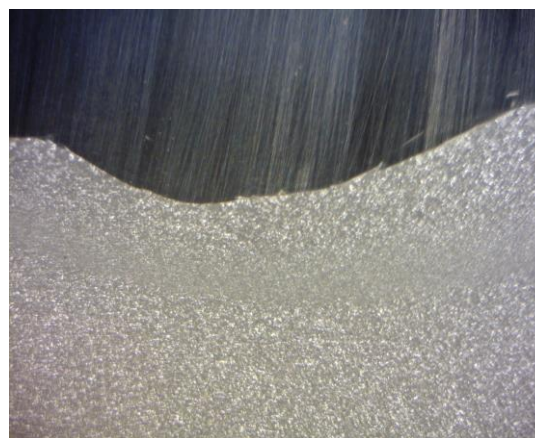
Po přípravě vzorku, která obnáší řez materiálem, postupné broušení povrchu na metalografických papírech s klejací zrnitostí a leštění, vzniká povrch na kterém lze provést makroskopický rozbor. Při optickém zvětšení výbrusu vzorku pomocí mikroskopu lze pozorovat přechody mezi jednotlivými vrstvami návarových housenek a nárůst zrn v tepelně ovlivněné oblasti u nelegovaného tavidla (obr. 32), vadu v podobě struskového vměstku u nelegovaného tavidla (obr. 33) a rozdíl mezi strukturou základního materiálu a svarového kovu u dolegovaného tavidla (obr. 34).



Obr. 34 Přechody mezi vrstvami



Obr. 33 Struskový vměstek



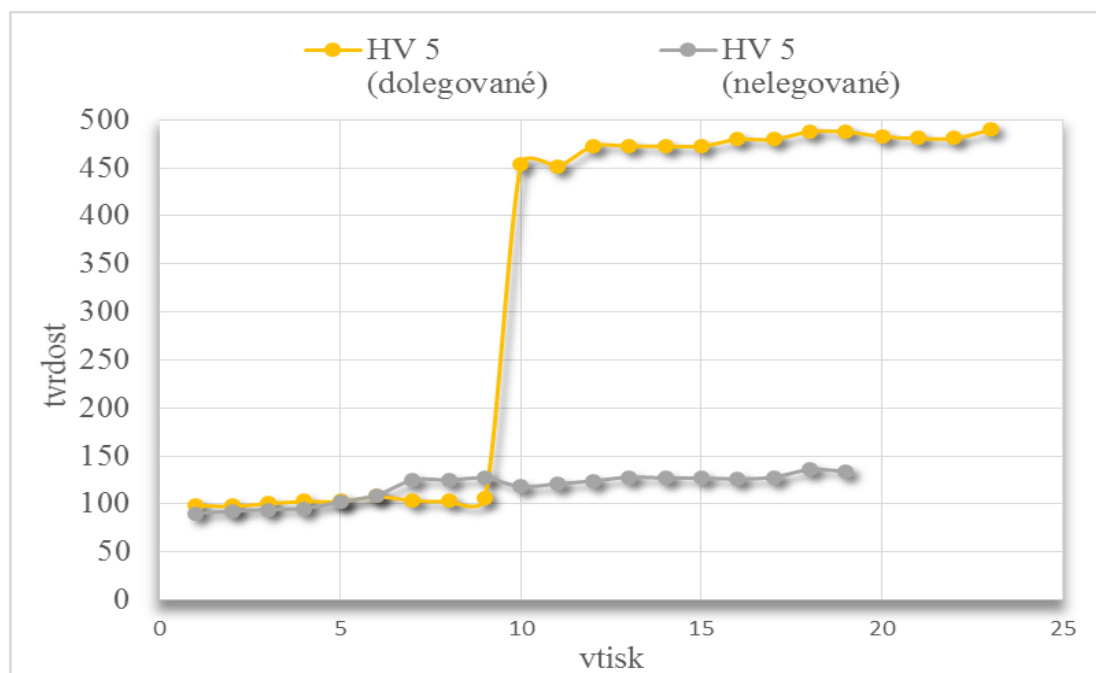
Obr. 32 Rozdílná struktura svarového kovu

## 4 TECHNICKÉ HODNOCENÍ

Z výsledných hodnot měření tvrdosti a chemického složení obou vzorků svarového kovu návarů zhotovených metodou SAW, je patrný vliv dolegování běžného tavidla pro spojovací svary OK Flux 10.62 práškem na bázi Co-Mo-Cr-Si.

Při aplikaci tavidla OK Flux 10.62 vznikl návar složený z pěti housenek. Jednotlivé strusky vyžadovaly náročné odstraňování, což mohlo být způsobeno nevhodně zvolenými parametry svařování. Neúplně odstraněná struska byla překryta další vrstvou návaru, což zapříčinilo výskyt struskových vměstků mezi dvěma sousedními housenkami. Měření tvrdosti návaru bylo provedeno přes TOO do ZM. Tvrdost ZM se pohybovala kolem 100 HV5. Při přechodu do oblasti návaru lze pozorovat menší skok ze 109 HV5 na 125 HV5 (obr. 39). Pod každou vrstvou housenky lze pozorovat nárůst zrn, především v TOO oblasti vzniklé druhou vrstvou návaru.

Při aplikaci tavidla OK Flux 10.62 dolegovaného práškovou směsí Tribaloy T-800 vznikl návar složený z pěti housenek, který nevykazoval žádné známky defektu. Tvrdost při přechodu ze ZM do oblasti návaru prudce stoupla ze 106 HV5 na 454 HV5 v podhousenkové oblasti (obr. 36). Z výsledného chemického složení svarového kovu lze sledovat, že proběhlo dolegování prvků Cr, Mo a Si, ale neproběhlo dolegování Co. Celkově výsledné složení je popsáno v příloze 6.



Obr. 35 Tvrdost HV5 svarového kovu

## 5 ZÁVĚR

S možností automatizace celého procesu a se zdroji svařovacího proudu které jsou schopné dodávat proud v rozmezí 100 - 1000 A (u tandemového svařování až 3600 A) je svařování pod tavidlem stále jednou z nejjakostnějších a nejproduktivnějších metod svařování kovů vůbec. Svary zhotovené touto metodou jsou prakticky bez rozstříku, dobře formované a s hlubokým závarem. Výhodou je také malé tepelné ovlivnění základního materiálu, což se příznivě projevuje v menších deformacích a menším vnitřním pnutí ve svaru. Vady ve svaru (zápaly, trhliny, póry, apod.) se vyskytují pouze minimálně. Vysoké svařovací proudy se ovšem stávají zároveň nevýhodou metody SAW, vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům na zařízení. Limitující je i omezení na svařování pouze v poloze PA a PB kvůli složitosti procesu. Je tedy nutné polohovat svařenec, což obnáší další náklady na přípravu a sesazení svarových ploch a na manipulační techniku, zejména u těžkých svařenců, které jsou u svařování pod tavidlem běžné.

Samotné tavidlo je nedílnou součástí metody SAW. Tvoří ochrannou atmosféru, která brání svarovou lázeň před oxidací, dolegovává svarový kov a v neposlední řadě na sebe váže nečistoty vyplavené ze svarového kovu. V současné době je na trhu nespočetné množství druhů tavidel. Jednotlivá tavidla lze aplikovat jen s vymezenými dráty. Jak tavidlo, tak i svařovací drát ovlivňují chemické složení a mechanické vlastnosti svarového kovu, což vyžaduje výběr optimální kombinace pro každý projekt.

Pro experimentální návary bylo zvoleno tavidlo pro svařování nelegovaných, středně i vysoce pevných ocelí OK Flux 10.62 a stejné tavidlo dolegované práškovou směsí na plazmové a laserové navařování Tribaloy T-800. Po zhotovení obou návary proběhla příprava vzorků na zkoušku chemického složení a měření tvrdosti svarového kovu, kde jsme pozorovali ovlivnění mechanických vlastností svarového kovu zvýšením pevnosti pomocí legur v práškové směsi.

Na základě experimentálních prací bylo potvrzeno, že lze zvolit materiál pro dolegování svarového kovu pomocí přídatných směsí, abychom dosáhli odlišného složení svarového kovu i při použití stejné elektrody a běžného neutrálního tavidla.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [36]

1. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZERaOSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
2. *Svářečské forum* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz>
3. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování: Studijní opory pro výuku 5TE, ETV, ETVK* [online]. Brno [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
4. ESAB. *Příručka pro svařování pod tavidlem*. ESAB Vamberk, spol. s r.o. 2009.
5. Svařování metodou SAW. In: *Svářečky-elektrody.cz* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/zakladni-metody-svarovani/t-87>
6. *ASM handbook Welding, brazing, and soldering Volume 6*. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.
7. Schematic illustration of the submerged-arc welding equipment. In: *ME Mechanical* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://me-mechanicalengineering.com/submerged-arc-welding/>
8. A2 Multitrac with A2-A6 Process Controller PEK. In: *ESAB* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.esabna.com/us/en/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=913>
9. A6S and A6DS Tandem Welding Heads. In: *ESAB* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.esabna.com/us/en/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=925>
10. Gantry type submerged arc welding machine. In: *Jinfeng* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.chinacuttingandwelding.com/h-beam-welding-machine/21.html>
11. Jednoúčelové stroje. *Weld Project* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.weldproject.cz/jednoucelove-stroje-ref.html>
12. Submerged Arc Welding (SAW). *Weld Guru* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://weldguru.com/saw/#operations>
13. Popis svaru. In: *BAHR* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://bahr.kahstudio.cz/met\\_oznsvar.php](http://bahr.kahstudio.cz/met_oznsvar.php)
14. Essential Variables for SAW CRO Welding. *ARC Specialties* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://arcspecialties.com/wp-content/uploads/2017/06/Essential-Variables-for-SAW-CRO-Welding.pdf>
15. Technical knowledge. *TWI* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-the-effect-of-electrode-angle-in-sa-submerged-arc-welding/>
16. Dráty pro svařování pod tavidlem. *ESAB* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.svarovani.cz/userfiles/files/07-08.pdf>
17. [Přídavné materiály]. In: *Laselektroden lasdraden.nl* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://esab.laselektrodenlasdraden.nl/contact\\_us.php](http://esab.laselektrodenlasdraden.nl/contact_us.php)

18. How metal-cored wires reduce hidden welding costs. In: FMA [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/article/arcwelding/how-metal-cored-wires-reduce-hidden-welding-costs-->
19. HERMAN, Petr. Svařování a dělení: Technologie svařování pod tavidlem. *Konstrukce* [online] Ostrava: KONSTRUKCE Media, s.r.o., 2015 [cit. 2018-05-23]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/technologie-svarovani-pod-tavidlem/>
20. Deposition rate comparison between solid and metal-cored wires for submerged arc welding (SAW). In: FMA [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/article/consumables/using-cored-wire-in-submerged-arc-welding-applications>
21. GW|SAW. In: Gustav Wiegard [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.wiegard.com/en/gw-steel-industry/rolls-and-roll-systems/wear-protection/gw-saw.html>
22. Sub Arc Welding. In: ESAB [online]. Florence: ESAB Welding & Cutting Products, 1999. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://www.esabna.com/euweb/sa\\_handbook/585sa1\\_1.htm](http://www.esabna.com/euweb/sa_handbook/585sa1_1.htm)
23. HILL, Charlie. Submerged arc welding process and welding fluxes. In: *LinkedIn* [online]. 16. prosince 2015. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/submerged-arc-welding-process-fluxes-charlie-hill>
24. KARTHI. Welding (Permanent Joint). In: *Mechanical Engineering Community* [online]. 26. května 2015. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://mechanical-engg.com/forums/topic/12079-welding-permanent-joint/>
25. What is submerged arc flux? *Keen Ovens* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.keenovens.com/products/flux-details.html>
26. Flux. In: *Amarine* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://amarineblog.wordpress.com/2017/11/03/cswip-3-1-question-with-answer-and-explanation-part-15/>
27. MELFI, Teresa, YOUNG, Ronald F. a Crockett, Dennis D. Submerged arc welding flux [online]. 1987. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/4675056.html>
28. Prášky na navařování PTA a laserem. Wirpo [online]. Brno: Wirpo, c2018. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.wirpo.cz/zarove-nastriky/laserova-navary/prasky-pro-navarovani-laserem#Co>
29. Přehled vlastností oceli S235JR. *Bolzano* [online]. Kladno: Bohdan Bolzano, c2018. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP\\_%20Tycova\\_ocel/EN\\_10025/MOP\\_prehled\\_vlastnosti\\_S235JR.pdf](https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP_prehled_vlastnosti_S235JR.pdf)
30. Tavidla pro svařování nelegovaných, nízkolegovaných a žárovevných ocelí. *ESAB* [online]. ESAB Vamberk, c2013. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://bcz.vamberk.eu/cd-dst-2013/pages/J\\_tavidla.html](http://bcz.vamberk.eu/cd-dst-2013/pages/J_tavidla.html)
31. *Tribaloy T-800 Alloy*. Koblenz: Deloro Wear Solutions GmbH.

32. Jiskrový spektrometr Q4 Tasman - OES - optický emisní spektrometr. Spektrometry.cz [online]. Blansko: BAS Rudice. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [https://www.spektrometry.cz/spektrometry/spektrometr\\_q4\\_tasman.php](https://www.spektrometry.cz/spektrometry/spektrometr_q4_tasman.php)
33. Atomová emisní spektrometrie (AES). Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem: Fakulta životního prostředí [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [http://fzp.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/IIAME/2%20Doplnek%20AES.pdf](http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/IIAME/2%20Doplnek%20AES.pdf)
34. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
35. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2000. Svařování. ISBN 80-85771-72-1.
36. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Označení          | Legenda                                  | Jednotka |
|-------------------|--|----------|
| A                 | Tažnost                                  | [%]      |
| a                 | Střední úhlopříčka vtisku                | [mm]     |
| AC                | Střídavý proud                           | [-]      |
| B                 | Bazicita                                 | [-]      |
| DC                | Stejnoseměrný proud                      | [-]      |
| F                 | Síla                                     | [N]      |
| HV                | Tvrдость dle Vickerse                    | [-]      |
| I                 | Proud                                    | [A]      |
| KV                | Nárazová práce                           | [J]      |
| U                 | Napětí                                   | [V]      |
| N                 | Neutralita tavidla                       | [-]      |
| PA                | Poloha svařování – vodorovná shora       | [-]      |
| PB                | Poloha svařování – vodorovná šikmo shora | [-]      |
| R <sub>eH</sub>   | Horní mez kluzu                          | [MPa]    |
| R <sub>eL</sub>   | Dolní mez kluzu                          | [MPa]    |
| R <sub>m</sub>    | Mez pevnosti                             | [MPa]    |
| R <sub>p0,2</sub> | Smluvní mez kluzu                        | [MPa]    |
| SAW               | Submerged arc welding                    | [-]      |
| TOO               | Tepelně ovlivněná oblast                 | [-]      |
| VA                | Voltampérový                             | [-]      |
| ZM                | Základní materiál                        | [-]      |
| Δ%Si              | Změna hmotnostních procent křemíku       | [-]      |
| Δ%Mn              | Změna hmotnostních procent manganu       | [-]      |
| ψ                 | Součinitel formy svaru                   | [-]      |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1 Aplikace svařování pod tavidlem a oblasti využití [4], [5] .....             | 10 |
| Obr. 2 Schéma metody SAW [7].....   | 11 |
| Obr. 3 Svařovací traktor A2 Multitrac A2TF [8] .....                                | 11 |
| Obr. 4 Svařovací hlava A6S Arc Master [9] .....                                     | 12 |
| Obr. 5 Příklad portálového svařovacího zařízení [10].....                           | 12 |
| Obr. 6 Strmá a plochá VA charakteristika [1] .....                                  | 13 |
| Obr. 7 Svařování s DC (přímá a nepřímá polarita) a AC zdrojem [2] .....             | 13 |
| Obr. 8 Měděná podložka (bez tavidla a s tavidlem) [1] .....                         | 14 |
| Obr. 9 Svařování na zámek [1] .....   | 15 |
| Obr. 10 Tavidlová podložka svarových spojů (podélných a obvodových) [1] .....       | 15 |
| Obr. 11 Umístění svařovacího drátu v úkose při kladení svarových housenek [1] ..... | 15 |
| Obr. 12 Svařování koutových svarů [1] .....   | 16 |
| Obr. 13 Charakteristické rozměry svaru [13] .....                                   | 16 |
| Obr. 14 Vliv velikosti svařovacího proudu na profil svaru [4] .....                 | 17 |
| Obr. 15 Vliv velikosti svařovacího napětí na profil svaru [4].....                  | 17 |
| Obr. 16 Vliv úhlu svařovací hlavy na profil svaru [4] .....                         | 18 |
| Obr. 17 Příklady přídatných materiálů a jejich balení od výrobce ESAB [17] .....    | 19 |
| Obr. 18 Profil a odtavení plněné a plné drátové elektrody [18] .....                | 19 |
| Obr. 19 Srovnání výkonu odtavení při stejnosměrném proudu.....                      | 20 |
| Obr. 20 Navařování pásovou elektrodou [21] .....                                    | 20 |
| Obr. 21 Princip svařování pod tavidlem [24] .....                                   | 21 |
| Obr. 22 Struktura taveného tavidla [26] .....                                       | 21 |
| Obr. 23 Struktura aglomerovaného tavidla [26].....                                  | 22 |
| Obr. 24 Dodání legur do svarového kovu [22].....                                    | 23 |
| Obr. 25 Svařovací zařízení ZEZ TRT 1000/WST 1000 .....                              | 25 |
| Obr. 26 Kladení housenek při experimentu.....                                       | 26 |
| Obr. 27 Svarová housenka s ochranným struskovým krytem (nelegované tavidlo) .....   | 27 |
| Obr. 28 Svarová housenka s ochranným struskovým krytem (dolegované tavidlo).....    | 27 |
| Obr. 29 Svarové housenky s odstraněnou struskou (nelegované tavidlo).....           | 27 |
| Obr. 30 Vzorek po zkoušce chemického složení.....                                   | 28 |
| Obr. 31 Měření tvrdosti na profilech svarů .....                                    | 29 |
| Obr. 32 Přejichy mezi vrstvami .....  | 30 |
| Obr. 33 Struskový vměstek .....   | 30 |
| Obr. 34 Přejichod přez TOO do ZM.....   | 30 |
| Obr. 35 Tvrdost HV5 svarového kovu .....  | 31 |

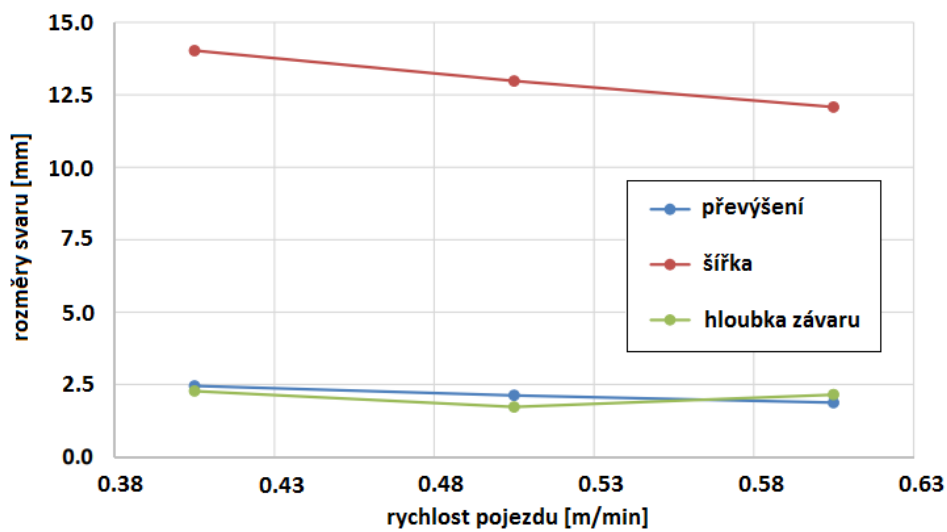
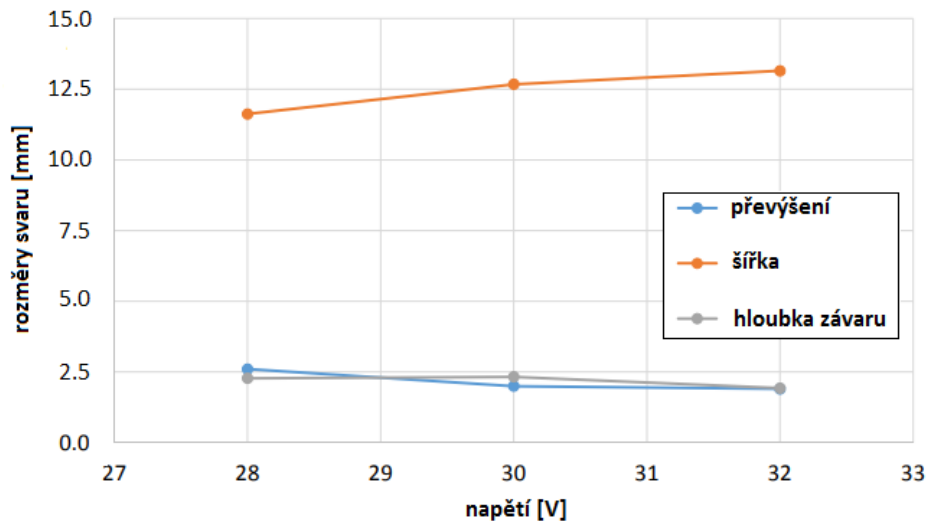
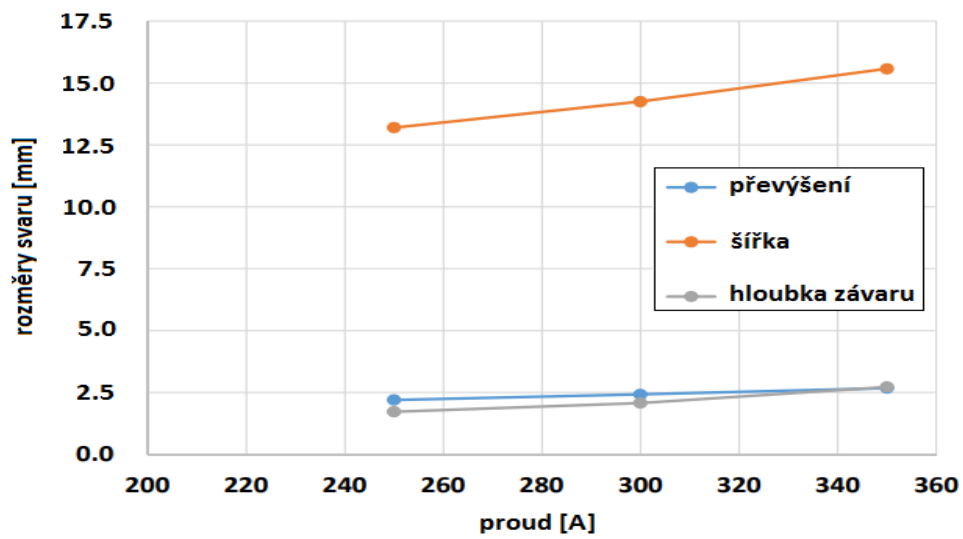
## SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| Tab. 1 Klasifikce tavidel podle koeficientu bazicity [23].                     | 24 |
| Tab. 2 Chemické složení oceli S235JR [29].                                     | 25 |
| Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli S235JR [29].                                | 25 |
| Tab. 4 Chemické složení drátu OK 12.22 [16].                                   | 26 |
| Tab. 5 Chemické složení čistého svarového kovu [4].                            | 26 |
| Tab. 6 Mechanické vlastnosti čistého svarového kovu [4].                       | 26 |
| Tab. 7 Chemické složení prášku Tribaloy T-800 [31].                            | 26 |
| Tab. 8 Svařovací parametry.  | 27 |
| Tab. 9 Chemické složení svarového kovu - nelegované tavidlo (viz. příloha 5).  | 28 |
| Tab. 10 Chemické složení svarového kovu – dolegované tavidlo (viz. příloha 6). | 28 |
| Tab. 11 Naměřené tvrdosti svarového kovu.                                      | 29 |

## SEZNAM PŘÍLOH

|           |  |
|-----------|--|
| Příloha 1 | Závislosti svařovacích parametrů na rozměry svaru [14] |
| Příloha 2 | Materiálový list oceli S235JR [29]                     |
| Příloha 3 | Specifikace elektrody OK Autrod 12.22 [16]             |
| Příloha 4 | Specifikace tavidla OK Flux 10.62 [30]                 |
| Příloha 5 | Specifikace prášku Tribaloy T-800 [31]                 |
| Příloha 6 | Chemické složení experimentálních návarů               |

Příloha 1 Závislosti svařovacích parametrů na rozměry svaru [14]



Příloha 2 Materiálový list oceli S235JR [29]

| Přehled vlastností oceli S235JR   |   |           |                   |                  |             |            | 1.0038   |          |
|---|---|-----------|-------------------|------------------|-------------|------------|----------|----------|
| Druh oceli  | Nelegovaná jakostní konstrukční ocel  |           |                   |                  |             |            |          |          |
| TDP   | ČSN EN 10025-2: 2005  |           |                   |                  |             |            |          |          |
| Dřívější označení   | S235JR/G2 podle EN 10025: 1990 + A1: 1993; RSt 37-2 podle DIN 17100; 11 375 podle ČSN   |           |                   |                  |             |            |          |          |
| Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)   | C max. pro tloušťku v mm  |           |                   | Mn max.          | Si max.     | P max.     | S max.   | N max.   |
|   | ≤18   | >18≤40    | >40 <sup>1)</sup> | 1,40             | -           | 0,035      | 0,035    | 0,012    |
| Složení hotového výrobku  | 0,19  | 0,19      | 0,23              | 1,50             | -           | 0,045      | 0,045    | 0,014    |
| Mechanické vlastnosti pro zkoušky v podélném směru  | Minimální mez kluzu R <sub>el</sub> MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :   |           |                   |                  |             |            |          |          |
|   | ≤16   | >16≤40    | >40≤63            | >63≤80           | >80≤100     | >100≤150   | >150≤200 | >200≤250 |
|   | 235   | 225       | 215               | 215              | 215         | 195        | 185      | 175      |
|   | Pevnost v tahu R <sub>m</sub> MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm :   |           |                   |                  |             |            |          |          |
|   | ≥ 3≤ 100  |           |                   |                  | > 100≤ 150  | > 150≤ 250 |          |          |
|   | 360-510   |           |                   |                  | 350-500     | 340-490    |          |          |
|   | Minimální tažnost v % ( L <sub>0</sub> = 5,65√S <sub>0</sub> ) pro výrobky jmenovité tloušťky v mm <sup>2)</sup> :  |           |                   |                  |             |            |          |          |
|   | > 3 ≤ 40  | > 40 ≤ 63 | > 63 ≤ 100        | > 100 ≤ 150      | > 150 ≤ 250 |            |          |          |
|   | 26  | 25        | 24                | 22               | 21          |            |          |          |
|   | Minimální nárazová práce KV ( J ) při 20° C pro výrobky jmenovité tloušťky v mm : <sup>3)</sup>   |           |                   |                  |             |            |          |          |
| ≤150  |   |           |                   | >150≤250         |             |            |          |          |
| 27 <sup>4)</sup>  |   |           |                   | 27 <sup>4)</sup> |             |            |          |          |
| Maximální hodnota CEV <sup>5)</sup>   | Pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:  |           |                   |                  |             |            |          |          |
|   | ≤ 30  | > 30 ≤ 40 | > 40 ≤ 150        | > 150 ≤ 250      |             |            |          |          |
|   | 0,35  | 0,35      | 0,38              | 0,40             |             |            |          |          |
| <b>Tecnologické vlastnosti</b>  |   |           |                   |                  |             |            |          |          |
| Svažitelnost  | Vhodná ke svařování všemi obvyklými používanými způsoby svařování. S rostoucí tloušťkou výrobku a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti sváru. Je účelné dbát doporučení stanovující podmínky pro svařování, jak je ku příkladu uvádí ECSC IC 2 ( EN 1011 ). |           |                   |                  |             |            |          |          |
| Tváření za tepla  | Jsou-li dodávány výrobky dále tvářeny za tepla, splňují uvedené mechanické vlastnosti pouze po následném normalizačním žhání.   |           |                   |                  |             |            |          |          |
| Tvářitelnost za studena   | Ocel určená pro tváření za studena musí být označena písmenem C ( S235JRC ). To se týká i tažení za studena.  |           |                   |                  |             |            |          |          |
| <sup>1)</sup> pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm se obsah C stanoví po dohodě.<br><sup>2)</sup> pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm je hodnota nutno dohodnout.<br><sup>3)</sup> hodnota uhlíkového ekvivalentu CEV se vypočte z rozboru tavby podle vzorce :<br>CEV = C + Mn : 6 + ( Cr+Mo+V ) : 5 + ( Ni+Cu ) : 15<br>CEV je volitelný požadavek.<br><sup>4)</sup> průměrná hodnota vypočtená z výsledků tří stanovení musí splňovat předepsané požadavky. Jedna hodnota může být nižší, než předepsaná minimální průměrná hodnota za předpokladu, že nebude nižší než 70% této hodnoty. V opačném případě se odebrávají ze zkušební vzorku další 3 zkušební kousky. Průměrná hodnota ze 6 zkoušek pak nesmí být nižší než předepsaná minimální hodnota, přičemž 2 výsledky mohou být nižší, ale pouze jeden s hodnotou nižší, než 70% předepsané minimální hodnoty.<br><sup>5)</sup> pro podélný směr zkoušení. |   |           |                   |                  |             |            |          |          |



Příloha 3 Specifikace elektrody OK Autrod 12.22 [16]



# OK AUTROD 12.22

SFA/AWS A 5.17: EM12K  
EN 756: S2Si

**Použití:**

Poměděný drát pro svařování běžných konstrukčních ocelí, lodních jakostních ocelí, ocelí jemnozrných vyšších pevností pod tavídem. Používá se např. s tavídky OK Flux 10.61, 10.62, 10.71, 10.72, 10.81.

**Klasifikace, certifikace drátu:**

CE EN 13479  
DB 52.039.05  
Jiné: Sepros

**Typické chemické složení drátu (%):**

| C    | Si   | Mn   |
|------|------|------|
| 0,10 | 0,20 | 1,00 |

**Typické chemické složení čistého svařovacího kovu a jeho mechanické vlastnosti v kombinaci s tavídky (DC+):**

| OK 12.22+ | C    | Si   | Mn   | R <sub>m</sub><br>MPa | R <sub>eL</sub><br>MPa | A <sub>5</sub><br>% | KV (J/°C) |     |     |     |     |     |
|-----------|------|------|------|-----------------------|------------------------|---------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
|           |      |      |      |                       |                        |                     | +20       | 0   | -20 | -40 | -50 | -80 |
| OK 10.61  | 0,08 | 0,35 | 1,00 | 520                   | 440                    | 30                  |           |     | 180 | 35  |     | 35  |
| OK 10.62  | 0,07 | 0,30 | 1,00 | 500                   | 410                    | 33                  |           | 170 | 160 | 90  | 70  | 35  |
| OK 10.71  | 0,05 | 0,50 | 1,40 | 520                   | 425                    | 29                  | 150       | 140 | 100 | 60  |     |     |
| OK 10.72  | 0,05 | 0,30 | 1,50 | 500                   | 415                    | 30                  |           |     |     | 100 | 70  | 50  |
| OK 10.81  | 0,07 | 0,90 | 1,50 | 610                   | 530                    | 24                  | 60        |     |     |     |     |     |

**Klasifikace/certifikace kombinace OK Autrod 12.22 + tavídko:**

OK 10.61 CE  
OK 10.62 ABS, DNV, GL, LR, BV, TÜV, DB, CE  
OK 10.71 ABS, DNV, GL, LR, BV, TÜV, DB, CE, RS  
OK 10.72 TÜV, DB, CE  
OK 10.81 CE

**Balení:**

| průměr<br>(mm) | cívka | hmotnost<br>(kg) |
|----------------|-------|------------------|
| 2,0            | 76-0  | 15               |
| 2,5            | 76-0  | 15               |
| 3,0            | 28-0  | 30               |
| 4,0            | 28-0  | 30               |
| 5,0            | 28-0  | 30               |

**H**

Příloha 4 Specifikace tavidla OK Flux 10.62 [30]



# OK FLUX 10.62

EN 780: SA FB 1 55 AC HS

**Použití:**

Agglomerované vysoce bazické tavidlo pro vícevrstvé tupa svary nelegovaných, středně i vysoce pevných ocelí a požadavkem na vysokou vrtulovou houževnatost při nízkých teplotách až do -40 až -60°C. Tavidlo nemá legující účinek. Je vhodné pro svařování střídavým i stejnosměrným proudem. Pro dobrou obrábělnost stusky je vhodné i pro svařování do úzkého (kosu). Vzhledem k vysoké čistotě svař. kovu a k nízkému obsahu kyslíku (~300ppm) i důležitého vodíku (<5ml/100g svař. kovu) poskytuje i výborné výsledky při CTOD testech. Je proto často používáno např. při výrobě tepelných zařízení včetně komponent pro jadernou energetiku a při výrobě off-shore konstrukcí.

**Klasifikace, certifikace:**

CE EN 13479  
DB 51.039.07  
Jiné: Sepros, NAKS/HAKC

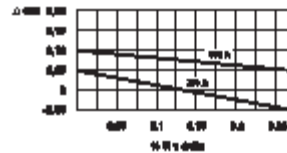
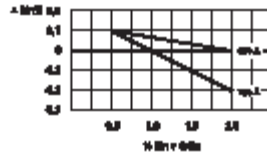
**Orientační spotřeba tavidla**

(580 A, 33 m/h, Ø 4 mm):

| Napětí (V)                         | 26   | 30   | 34   | 38   |
|------------------------------------|------|------|------|------|
| Spotřeba tavidla DC+ (kg/kg drátu) | 0,70 | 1,00 | 1,30 | 1,60 |
| AC                                 | 0,60 | 0,90 | 1,20 | 1,40 |

**Metallurgické vlastnosti tavidla:**

Propal nebo dolegování Mn a Si v závislosti na svař. proudu (DC+, 30 V, 58 cm/min)



**Typické chemické složení svarového kovu při použití s drátem OK Autrod a jeho klasifikace (DC+):**

| OK 10.62 + | C    | Si   | Mn   | Mo   | Cr   | Ni   | EN 756 (*)                | SFA/AWS A 5.17(A 5.23)         |
|------------|------|------|------|------|------|------|---------------------------|--------------------------------|
| OK 12.22   | 0,07 | 0,30 | 1,00 |      |      |      | S 38 5 FB S2Si            | F7A8-EM12K, F8P8-EM12K         |
| OK 12.24   | 0,07 | 0,22 | 1,00 | 0,50 |      |      | S 46 4 FB S2Mo            | (F8A6-EA2-A2, F7P6-EA2-A2)     |
| OK 12.32   | 0,10 | 0,35 | 1,60 |      |      |      | S 46 6 FB S3Si            | F7A8-EH12K, F7P8-EH12K         |
| OK 12.34   | 0,10 | 0,21 | 1,45 | 0,50 |      |      | S 50 4 FB S3Mo            | (F8A6-EA4-A4, F8P6-EA4-A4)     |
| OK 13.10SC | 0,08 | 0,22 | 0,70 | 0,50 | 1,10 |      | -                         | (FBP2-EB2R-B2)                 |
| OK 13.20SC | 0,08 | 0,20 | 0,60 | 0,85 | 2,00 |      | -                         | (FBP2-EB3R-B3)                 |
| OK 13.27   | 0,06 | 0,25 | 1,00 |      |      | 2,10 | S 46 7 FB S2Ni2           | (F8A10-EN2-Ni2, F8P10-EN2-Ni2) |
| OK 13.40   | 0,07 | 0,25 | 1,50 | 0,50 |      | 0,90 | (*) S 62 6 FB S3Ni1Mo     | (F10A8-EG-G, F8P6-EG-F3)       |
| OK 13.43   | 0,08 | 0,25 | 1,35 | 0,50 | 0,60 | 2,20 | (*) S 68 6 FB S3Ni2,5CrMo | (F11A8-EG-G, F11P8-EG-G)       |

(\*) EN 14295

**Typ:**

Vysoce bazické, aglomerované MgO+CaF<sub>2</sub> +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+SiO<sub>2</sub>

**Bazicitá:**

B - 3,2

**Vlhkost:**

< 0,06% / 1000°C

**Svrná hmotnost:**

1,1 kg/dm<sup>3</sup>

**Zrnó:**

0,2 - 1,6 mm (10x65 mesh)

**Teplota přesušení:**

300±25°C/2-4h

**Max. proudová zátěž:**

až 1000 A pro jeden drát

**Doporučené napětí:**

26 - 32 V

**Svařovací proud:**

**Doporučené svařovací parametry pro vícevrstvé svařování:**

| Ø drátu (mm) | Proud (A) | Napětí (V) |         | Rychlost (m/h) |
|--------------|-----------|------------|---------|----------------|
|              |           | DC+        | AC      |                |
| 2,5          | 300 - 400 | 26 - 28    | 28 - 30 | 16 - 26        |
| 3,0          | 400 - 500 | 26 - 28    | 28 - 31 | 20 - 30        |
| 4,0          | 500 - 600 | 26 - 30    | 29 - 32 | 22 - 40        |





TECHNICAL DATA

## TRIBALOY™ T-800 ALLOY

**TRIBALOY™ COBALT-BASED ALLOYS** consist of a hard, intermetallic (Laves) phase dispersed in a softer matrix of eutectic or solid solution. They exhibit outstanding resistance to wear and galling, high corrosion resistance and are particularly suitable where lubrication is a problem. Wear resistance of Tribaloy™ alloys is highly dependent on the volume percentage of Laves phase.

**TRIBALOY™ T-800** was designed to resist high temperature wear and abrasion. It has exceptional oxidation and corrosion resistance due to its high Cr content. T-800 is harder and has better abrasive wear resistance than Tribaloy™ T-400. NOTE: Wear resistance of Tribaloy™ alloys is highly dependent on the volume percentage of Laves phase. Therefore, test results vary significantly with dilution and cooling rate and other thermal history. Should be considered for valve trim, mechanical seals and thrust rings.

### CORROSION RESISTANCE

T-800 shows excellent corrosion resistance in Acetic Acid (concentration 50%, boiling) and in Phosphoric Acid (concentration 85%, 66°C). Also in Sulphuric Acid (concentration 5%, 66°C) excellent corrosion resistance has been observed.

### NOMINAL CHEMICAL COMPOSITION (MASS%)

| ALLOY | Co   | Cr   | Mo   | C    | Si  | Others |
|-------|------|------|------|------|-----|--------|
| T-800 | Bal. | 17,5 | 28,5 | <0,1 | 3,5 | Ni, Fe |

### PHYSICAL PROPERTIES

| ALLOY | Hardness    | Density                 | Melting Range    |
|-------|-------------|-------------------------|------------------|
| T-800 | 54 - 62 HRC | ~ 8,6 g/cm <sup>3</sup> | ~ 1290 – 1350 °C |

### NOMINAL HOT HARDNESS (HV resp. DPH) AS CAST

| 20 °C | 100 °C | 200 °C | 300 °C | 400 °C | 500 °C | 600 °C | 700 °C |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 725   | 720    | 710    | 690    | 670    | 630    | 570    | 430    |

Stellite™, Tribaloy™, Nistelle™, Stelcar™, Jet Kote™, and Delcrome™ are registered trademarks of Kennametal Inc.

Document Number: MDS T800 rev. 00

[www.deloro.com](http://www.deloro.com)

## Příloha 6 Chemické složení experimentálních návarů

### Nelegované tavidlo:

|   | C<br>%       | Si<br>%      | Mn<br>%      | P<br>%       | S<br>%           | Cr<br>%      | Mo<br>%       | Ni<br>%      | Cu<br>%      | Al<br>%      |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| □ | <b>0.078</b> | <b>2.716</b> | <b>0.723</b> | <b>0.038</b> | <b>&lt;0.150</b> | <b>15.94</b> | <b>~13.20</b> | <b>0.751</b> | <b>0.087</b> | <b>0.052</b> |
| σ | 0.00082      | 0.090        | 0.020        | 0.0013       |                  | 0.368        |               | 0.048        | 0.0017       | 0.0022       |
| υ | 1.051        | 3.314        | 2.766        | 3.421        |                  | 2.309        |               | 6.391        | 1.954        | 4.231        |

|   | As<br>%      | B<br>%        | Bi<br>%       | Ce<br>%      | Co<br>%           | Mg<br>%      | N<br>%       | Nb<br>%      | Pb<br>%      | Sb<br>%          |
|---|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|
| □ | <b>0.013</b> | <b>0.0050</b> | <b>~0.144</b> | <b>0.045</b> | <b>&lt;0.0050</b> | <b>0.029</b> | <b>0.424</b> | <b>0.087</b> | <b>0.075</b> | <b>&lt;0.010</b> |
| σ | 0.00058      | 0.00021       |               | 0.0034       |                   | 0.0022       | 0.142        | 0.0062       | 0.0034       |                  |
| υ | 4.462        | 4.200         |               | 7.556        |                   | 7.586        | 33.49        | 7.126        | 4.533        |                  |

|   | Sn<br>%       | Ta<br>%       | La<br>%       | Ti<br>%      | V<br>%       | W<br>%       | Zn<br>%      | Zr<br>%      | Se<br>%      | Fe<br>%      |
|---|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| □ | <b>0.0087</b> | <b>~0.660</b> | <b>0.0077</b> | <b>0.011</b> | <b>0.094</b> | <b>0.232</b> | <b>0.019</b> | <b>0.028</b> | <b>0.045</b> | <b>64.33</b> |
| σ | 0.00013       |               | 0.00060       | 0.00082      | 0.0050       | 0.022        | 0.0010       | 0.0017       | 0.00082      | 0.474        |
| υ | 1.494         |               | 7.792         | 7.455        | 5.319        | 9.483        | 5.263        | 6.071        | 1.822        | 0.737        |

### Dolegované tavidlo:

|   | C<br>%       | Si<br>%      | Mn<br>%      | P<br>%        | S<br>%        | Cr<br>%      | Mo<br>%       | Ni<br>%      | Cu<br>%      | As<br>%       |
|---|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| □ | <b>0.030</b> | <b>0.375</b> | <b>1.365</b> | <b>0.0022</b> | <b>0.0099</b> | <b>0.118</b> | <b>0.0078</b> | <b>0.056</b> | <b>0.116</b> | <b>0.0043</b> |
| σ | 0.0014       | 0.012        | 0.026        | 0.00040       | 0.00081       | 0.011        | 0.00069       | 0.0058       | 0.0061       | 0.00017       |
| υ | 4.667        | 3.200        | 1.905        | 18.18         | 8.182         | 9.322        | 8.846         | 10.36        | 5.259        | 3.953         |

|   | Al<br>%       | Al-sol<br>%     | B<br>%             | Bi<br>%           | Ca<br>%            | Ce<br>%       | Co<br>%       | N<br>%       | Nb<br>%       | Pb<br>%      |
|---|---------------|-----------------|--------------------|-------------------|--------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| □ | <b>0.0015</b> | <b>-0.00090</b> | <b>&lt;0.00020</b> | <b>&lt;0.0070</b> | <b>&lt;0.00050</b> | <b>0.0042</b> | <b>0.0052</b> | <b>0.015</b> | <b>0.0034</b> | <b>0.010</b> |
| σ | 0.00090       | 0.0010          |                    |                   |                    | 0.00022       | 0.00071       | 0.0058       | 0.00013       | 0.00067      |
| υ | 60.00         | 111.11          |                    |                   |                    | 5.238         | 13.65         | 38.67        | 3.824         | 6.700        |

|   | Sb<br>%       | Sn<br>%       | Ta<br>%          | La<br>%       | Ti<br>%       | V<br>%        | W<br>%            | Zr<br>%           | Fe<br>%      |
|---|---------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|--------------|
| □ | <b>0.0056</b> | <b>0.0059</b> | <b>&lt;0.030</b> | <b>0.0019</b> | <b>0.0022</b> | <b>0.0032</b> | <b>&lt;0.0050</b> | <b>&lt;0.0010</b> | <b>97.81</b> |
| σ | 0.0011        | 0.00015       |                  | 0.00015       | 0.00012       | 0.00018       |                   |                   | 0.061        |
| υ | 19.64         | 2.542         |                  | 7.895         | 5.455         | 5.625         |                   |                   | 0.062        |