

Svařování konstrukčních dílů zařízení z kovů a polymerů

Bc. Michal Otto

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Otto**
Osobní číslo: **T11033**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Svařování konstrukčních dílů zařízení z kovů a polymerů**

Zásady pro vypracování:

- 1) Provedte studium svařování kovů a nekovů
- 2) Hodnoťte metody určování fyzikálně-mechanických charakteristik materiálů
- 3) Uveďte technologii svařování konstrukčních dílů
- 4) Hodnoťte přínos řešení pro praxi

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1) Čabelka, J.: **Mechanická technológia. VSAV Bratislava. 1967**

2) Lukovics, I.: **Konstrukční materiály a technologie. NVUT Brno. 1991**

ISBN 80-214-0399-3

3) Grillemot, L.: **Svařování. ETK Budapešť. 1980**

4) Vasilko, K. aj.: **Téoria výrobných technológií, TU Košice, FVT Prešov. 2010**

ISBN 978-80-553-03367

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hašnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá svařováním ocelových a polymerních materiálů. V teoretické části práce jsou v jednotlivých kapitolách popsány základy vzniku svarového spoje, podstata vzniku elektrického oblouku, svařitelnost materiálů, vady a jednotlivé technologie svařování. Praktická část práce je zaměřena na svařování konkrétních druhů materiálů za různých technologických podmínek, s následným sledováním změn ve struktuře materiálu a také změn mechanických vlastností. V závěru práce je celkové zhodnocení výsledků a stanovení nejvýhodnější metody a technologických podmínek svařování v závislosti na efektivitě a ekonomice výroby.

Klíčová slova: svařování, svařovací oblouk, vady

ABSTRACT

This diploma thesis deals with steel and polymeric materials welding. The theoretical part is divided into several chapters which focus on basis of welded joint formation, the origin of electric arc, weldability of materials, defects and particular welding technologies. The practical part describes welding of specific materials on different technological conditions, with monitoring following changes of material structure and mechanical properties changes. In the conclusion there is overall results assessment and determination of the most advantageous method and technical conditions of welding concerning production efficiency.

Keywords: welding, welding arc, defects

Poděkování:

Chtěl bych tímto poděkovat prof. Ing. Imrichovi Lukovicsovi, CSc., jako vedoucímu diplomové práce, za užitečné rady, ochotu, čas a pomoc při zpracování této práce.

Motto:

Cokoliv si lidská mysl dokáže představit a čemu dokáže uvěřit, toho lze dosáhnout.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY VZNIKU SVAROVÝCH SPOJŮ	12
1.1 TEORIE VZNIKU SVAROVÉHO SPOJE	12
1.2 FORMY AKTIVAČNÍ ENERGIE PRO SVAŘOVÁNÍ	13
1.3 PRINCIP VZNIKU SVAROVÉHO SPOJE PŘI TAVNÉM SVAŘOVÁNÍ.....	13
1.3.1 Zdroje tepla používané pro tavné svařování	14
1.4 PRINCIP VZNIKU SVAROVÉHO SPOJE PŘI TLAKOVÉM SVAŘOVÁNÍ.....	15
1.5 TEPelně OVLIVNĚNÁ OBLAST	15
2 ELEKTRICKÝ OBLOUK	18
2.1 PODSTATA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	18
2.2 CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	19
2.2.1 Zapálení oblouku.....	19
2.2.2 Skladba oblouku.....	20
2.2.3 Elektrický oblouk v obvodu střídavého proudu	22
2.3 PŘENOS MATERIÁLU ELEKTRICKÝM OBLOUKEM.....	23
2.3.1 Druhy přenosu kovu elektrickým obloukem.....	23
2.4 SVAŘOVACÍ ZDROJE PRO OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ	24
2.4.1 Rozdělení svařovacích zdrojů	25
2.4.1.1 Rotační svařovací zdroje.....	25
2.4.1.2 Svařovací transformátory.....	25
2.4.1.3 Svařovací usměrňovače	26
2.4.1.4 Svařovací invertorové zdroje	27
3 SVAŘITELNOST, TRHLINY A ZKOUŠKY SVARŮ	28
3.1 SVAŘITELNOST POLYMERŮ.....	28
3.2 SVAŘITELNOST OCELÍ.....	28
3.3 TRHLINY VE SVAROVÝCH SPOJÍCH.....	28
3.3.1 Trhliny za tepla	29
3.3.1.1 Krystalizační trhliny	29
3.3.1.2 Likvační trhliny.....	29
3.3.1.3 Polygonizační trhliny.....	30
3.3.2 Trhliny za studena	30
3.3.3 Lamelární trhliny.....	31
3.3.4 Žíhací trhliny	31
3.4 ZKOUŠKY SVARŮ.....	31
3.4.1 Nedestruktivní zkoušky svarů	32
3.4.1.1 Vizuální kontrola	33
3.4.1.2 Kapilární (Penetrační) zkouška.....	33
3.4.1.3 Prášková magnetická metoda.....	33
3.4.1.4 Zkouška prozářením	34
3.4.1.5 Zkouška ultrazvukem.....	34

3.4.2	Destruktivní zkoušky svarů	34
3.4.2.1	Zkouška tahem	35
3.4.2.2	Zkouška lámavosti	35
3.4.2.3	Zkouška rázem v ohybu	35
3.4.2.4	Zkouška tvrdosti	35
3.4.2.5	Makroskopická kontrola svarů	35
3.4.2.6	Zkouška rozlomením	36
4	TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ	37
4.1	ROZDĚLENÍ METOD SVAŘOVÁNÍ	37
4.2	PRACOVNÍ POLOHY PŘI SVAŘOVÁNÍ	39
4.3	SVAŘOVÁNÍ METODOU TIG	40
4.4	SVAŘOVÁNÍ METODOU MIG\MAG	41
4.5	SVAŘOVÁNÍ POLYMERŮ	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST	44
5	VOLBA A ROZMĚRY MATERIÁLŮ	46
5.1	VOLBA MATERIÁLU VZORKŮ	46
5.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ A SVAROVÝCH PLOCH	47
5.3	SVAŘOVACÍ DRÁT	49
5.4	OCHRANNÝ SVAŘOVACÍ PLYN	50
5.5	SVÁŘECÍ POLOAUTOMAT	51
5.5.1	Svařování horkým plynem a přídavným materiálem	51
5.6	MĚŘENÍ TVRDOSTI VE SVARECH	52
5.7	VNESENÉ TEPLA DO SVARU	56
5.7.1	Vzorky tloušťka 8 mm	57
5.7.1.1	Vnesené teplo a hodnoty svařování pro kořenovou vrstvu	57
5.7.1.2	Vnesené teplo a hodnoty svařování pro krycí vrstvu	59
5.7.1.3	Celkové vnesené teplo do jednotlivých vzorků (8mm)	61
5.7.2	Vzorky tloušťka 4 mm	61
5.7.2.1	Vnesené teplo a hodnoty svařování	61
5.8	TAHOVÁ ZKOUŠKA KOVOVÝCH VZORKŮ	63
5.8.1	Výsledky měření vzorků tloušťky 8mm	66
5.8.2	Výsledky měření vzorků tloušťky 4mm	67
5.9	TAHOVÁ ZKOUŠKA POLYMERNÍCH VZORKŮ	70
5.10	MAKROSTRUKTURA	73
5.11	MIKROSTRUKTURA	74
5.12	VYHODNOCENÍ VAD VE SVARECH	77
	ZÁVĚR	79
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	80
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ	84
	SEZNAM TABULEK	86

ÚVOD

Svařování je definováno jako nerozebíratelné spojení dvou kovů a jejich slitin pomocí tepla, kdy může nebo nemusí být použito přídavného materiálu, nebo tlaku, který vyvolá deformaci kontaktních ploch.

Samotná historie sahá až do starověku, kdy se šperky a drobné předměty ze stříbra a drahých kovů vyráběly za pomoci tlaku na přeplátované okraje spoje.

V době železné se lidé ze severní Afriky a z východního středomoří naučili svařovat železo pomocí kovářského svařování, avšak vynález svařování je připisován Řeku Glaukovi kolem roku 650 př.n.l. V roce 1836 byl objeven Edmundem Davym acetylen a od této doby se začal tento plyn ve velkém používat pro spojování kovů. Vytvoření elektrického oblouku mezi dvěma uhlíkovými elektrodami za využití zdroje je připisováno panu Humphrymu Davysovi v roce 1800. Francouz Auguste De Meritens využil teplo elektrického oblouku ke spojení olovených desek. Uhlíkovou elektrodu připojil na záporný pól, svařované předměty na kladný tzv. přímé zapojení a jako zdroj elektrického proudu použil akumulátorové baterie. Ovšem patent na svařování elektrickým obloukem a svařování uhlíkovými elektrodami podali rus Nikolaj Nikolajevič Benardos a Stanislav Olsewský a obdrželi je mezi lety 1885 a 1887.

Dalším velkým objevem, a z dnešního pohledu zřejmě nejdůležitějším, bylo objevení obalené elektrody švédem Oscarem Kjellbergem. Kovový drát namočený ve směsi oxidů a křemičitanů se vysušil a vznikl obal, jež ovlivňoval složení svarového kovu.

V průběhu první světové války byly kladeny zvýšené požadavky na vývoj nových postupů svařování v souvislosti se zbrojní výrobou. Obloukové svařování se využívalo hlavně v Anglii při opravách lodí, výrobě ocelových pláštů, pum, min a torpéd.

V roce 1919 byla vyvinuta a zároveň patentována kovová elektroda s celulóзовým obalem, která umožňovala vytvářet svary o velmi vysoké houževnatosti a bez strusky.

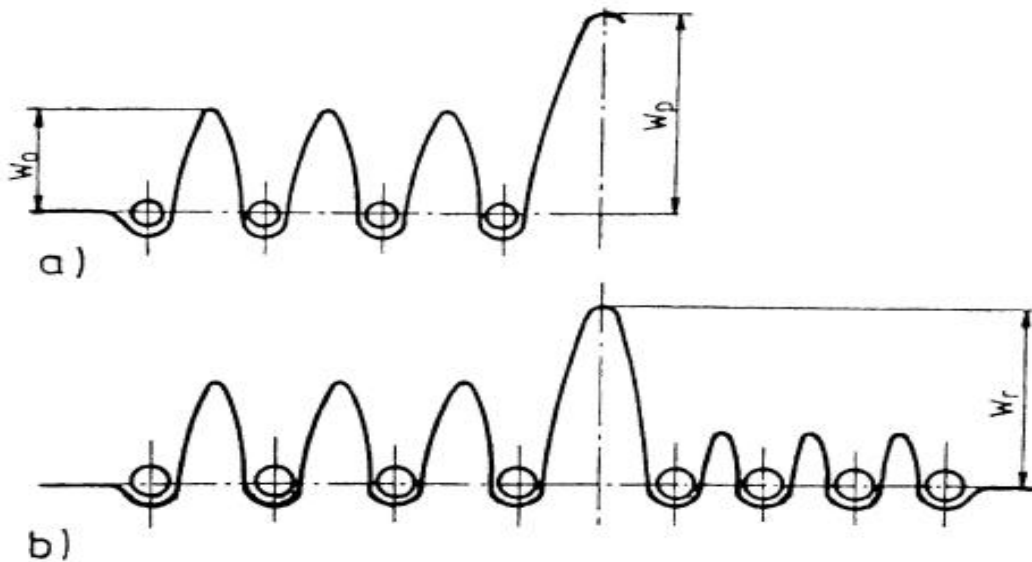
Letecké odvětví bylo dalším důležitým oborem, kdy pánové Russ Meredith a V.H. Pavleck navázali na kroky Langmuira, Deverse, Hobarta a vznikl nový postup svařování s netavicí se wolframovou elektrodou, zejména při svařování hořčíku, hliníku a niklu v ochranné atmosféře helia. Následující práce se bude zabývat provedením svarů za různých podmínek, jeho vlivem na mechanické vlastnosti materiálu, zejména nízkouhlíkových ocelí a materiálů z polymerů. [2]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY VZNIKU SVAROVÝCH SPOJŮ

1.1 Teorie vzniku svarového spoje

Svařování kovů a jeho slitin je definováno jako nerozebíratelné spojení pomocí tepelné, mechanické nebo radiační energie. Spojení nastává pomocí působení meziatomových sil a také adhezních vazeb na teplem nebo tlakem aktivovaných kontaktních plochách. Pevné látky mají různý typ vazby a ty odpovídají různým typům rozložení elektronů a iontů. Ionty jsou v atomu uspořádány tak, aby potenciální energie krystalu byla co možná nejmenší. Základem vazby je mrak valenčních elektronů, které mohou volně přecházet mezi atomy. Ke kovové vazbě tedy dojde, pokud přitažlivé síly mezi kovovými ionty a elektronovým mrakem převýší odpudivé síly elektronů v tomto mraku. Ionty jsou rozloženy podle přesně definovaného uspořádání, podle něhož existují v pevných látkách mezi ionty síly přitažlivé a odpudivé. Svařovací proces vyžaduje aktivaci kontaktních ploch tzn. dodání energie aktivace pro překonání bariéry potenciální energie povrchových atomů. [2]



Obr. 1 Energetické bariéry potenciální energie

W_0 – potenciální energie nutná pro změnu polohy iontu uvnitř krystalu

W_p – vliv povrchu krystalu na velikost potenciální energie (energie nutná pro změnu polohy iontu)

W_r – potenciální energie na rozhraní tuhé a kapalné fáze

1.2 Formy aktivační energie pro svařování

termická aktivace – zvýšením teploty - tavné svařování

mechanická aktivace – pružnými a plastickými deformacemi - tlakové svařování

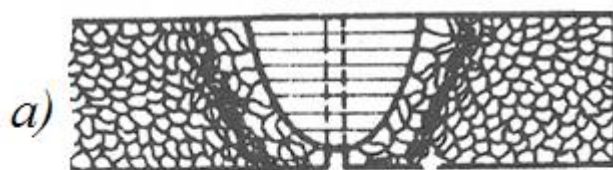
radiační aktivace – elektronové, fotonové nebo iontové ozáření - tavné svařování

Všechny běžné metody svařování lze rozdělit na dvě velké skupiny, tavné a tlakové svařování. Při tavném svařování se vytvoření spoje dosahuje přívodem tepelné energie do oblasti vzniku sváru, kdy dochází k natavení základního, eventuelně přídavného materiálu. Tekutá fáze je vázána na povrch tuhé fáze pomocí adhezních sil a při tuhnutí taveniny se slabé adhezní síly mění na chemickou vazbu ve formě krystalové mřížky. Začíná růst nových zrn a zároveň zaniká původní rozhraní tuhá fáze, tavenina. Svarový kov je charakterizován tzv. dendritickou krystalizací, přičemž velikost dendritů přímo závisí na množství přivedeného tepla a růst zrn je orientován proti směru odvodu tepla a kolmo na izotermy. [2] [4]

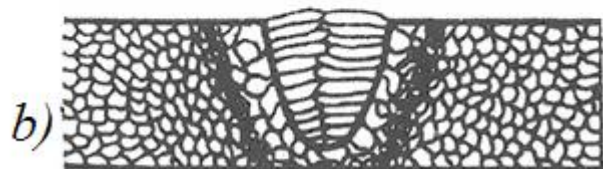
1.3 Princip vzniku svarového spoje při tavném svařování

Intenzivním zdrojem tepla se provede termická aktivace svarových ploch až do té míry, kdy se obě svařované plochy dílů nataví. (Na obrázku je schematicky znázorněn vznik svarového spoje tavným svařováním, ale kvůli jednoduchosti zde není uvažováno použití přídavného materiálu). Roztavený svarový kov se nachází mezi stěnami svařovaných materiálů. Atomy tohoto kovu se mohou v tavenině volně pohybovat a přibližovat k nenataveným plochám na vzdálenost odpovídající parametru mřížky spojovaného kovu a pokud svarový kov stěny smáčí, tak vznikají podmínky pro vytvoření kovové vazby.

V době kdy přestane působit aktivní ohřev nastává tuhnutí roztaveného kovu, přičemž krystalizace kovu začíná nejprve na stěnách které odvádějí teplo. Mezi tuhým kovem a vznikajícími krystaly se uplatňují obvyklé kovové vazby. Krystalizace vede ke vzniku společných krystalitů, které vyrůstají z hranice roztaveného a neroztaveného kovu až k hranici ztavení. Po úplném ztuhnutí roztaveného kovu vznikne nerozebíratelný spoj z původních kovových dílů bez použití vnějšího tlaku. [2] [4]



Výchozí ustavení svarových ploch svařovaných dílů vč. roztavené oblasti svarových ploch, oblast svarového kovu je naznačena vodorovnými čarami.



Svarový spoj po ukončení krystalizace svarového kovu

Obr. 2 Vznik svarového spoje tavným svařováním

1.3.1 Zdroje tepla používané pro tavné svařování

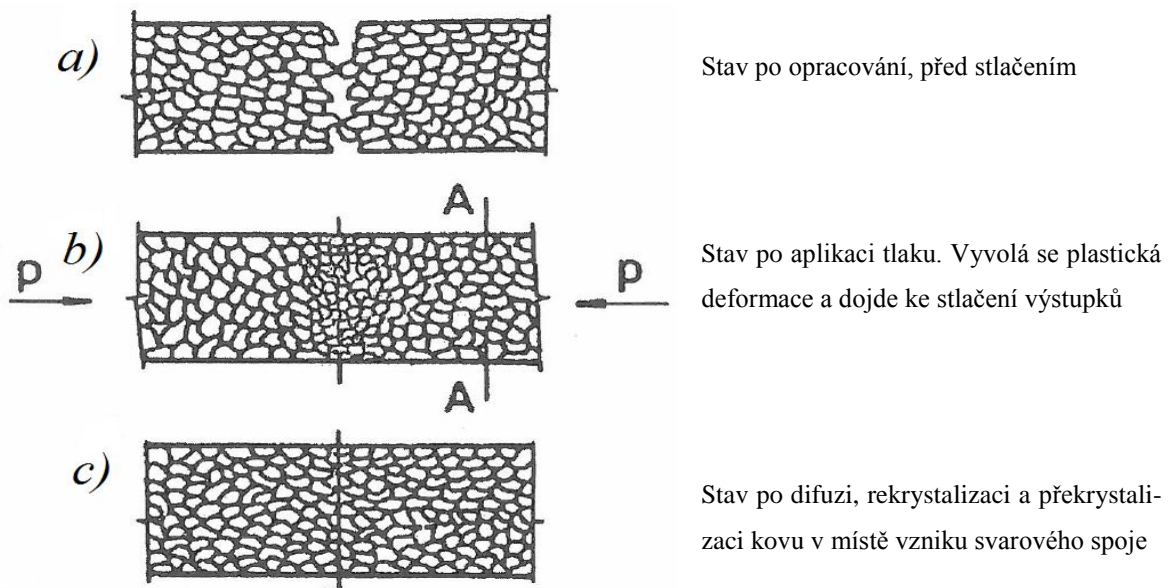
Vliv zdrojů tepla používaných pro tavné svařování na strukturu a vlastnosti svar. spojů se posuzují pomocí tzv. teplotních cyklů při svařování. Znalost teplotních cyklů se využívá také pro výzkum a vývoj svařitelnosti materiálů, při studiu praskavosti svarových spojů a detailním studiu mikrostruktury a mechanických vlastností jednotlivých oblastí svarového spoje. Znalost teplotních cyklů při svařování je také základním předpokladem pro modelování svařovacích procesů pomocí nejmodernější počítačové techniky. V současnosti se pro tavné svařování používají nejčastěji zdroje tepla uvedené v tabulce. Důsledkem působení těchto velmi koncentrovaných zdrojů tepla na svařovaný materiál jsou změny jeho mikrostruktury a mechanických vlastností, které posuzujeme dle konkrétního průběhu teplotního cyklu při svařování v posuzovaném místě svarového spoje. Teplotní cyklus vyjadřuje závislost průběhu teploty na čase. [2] [4]

Zdroj tepla	Nejmenší plocha ohřevu [cm ²]	Max. tepelný výkon [W.cm ⁻²]
Plamen C ₂ H ₂ – O ₂	1*10 ⁻²	1*10 ³
El. oblouk, technologie 111	1*10 ⁻³	1*10 ⁴
El. oblouk, technologie 131,141	1*10 ⁻⁴	1*10 ⁵
Plazmový oblouk	1*10 ⁻⁶	1*10 ⁷
Elektronový paprsek	1*10 ⁻⁷	1*10 ⁸
Laser	1*10 ⁻⁸ - 1*10 ⁻¹¹	1*10 ⁹ - 1*10 ¹³

Tab. 1 Zdroje tepla pro tavné svařování

1.4 Princip vzniku svarového spoje při tlakovém svařování

Aby se na povrchu dvou částí ve výchozím stavu mohly uskutečnit vzájemné vazby povrchových krystalů je nutné použít ve směru šipek (viz.obr.) dostatečně vysoký tlak ke stlačení výstupků, tzn. uskutečnit místní plastickou deformaci. Pro zjednodušení není brán zřetel na povrchové nečistoty. [2] [4]



Stav po opracování, před stlačením

Stav po aplikaci tlaku. Vyvolá se plastická deformace a dojde ke stlačení výstupků

Stav po difuzi, rekrytalizaci a překrytalizaci kovu v místě vzniku svarového spoje

Obr. 3 Vznik svarového spoje tlakovým svařováním

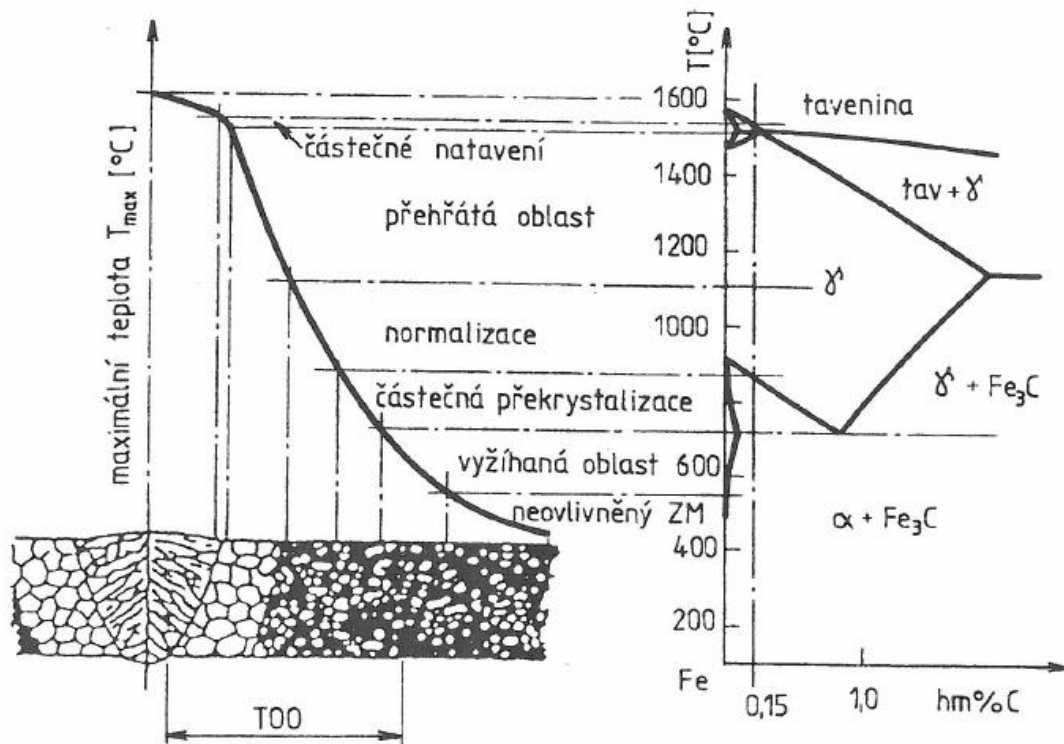
1.5 Tepelně ovlivněná oblast

U tavných metod svařování, kde teplota dosáhla hodnoty překrytalizačních pochodů a zároveň proběhla částečná rekrytalizace, se tato oblast nazývá tepelně ovlivněná oblast (TOO).

V případě svařování kovů a slitin bez polymorfni přeměny (měď, nikl, hliník) nedochází ke změně mikrostruktury a probíhá pouze substrukturní změna, rekrytalizace, růst zrn.

V kovech a slitinách s polymorfni přeměnou (u ocelí) dochází v TOO k významným strukturním změnám, které mají zásadní vliv na vlastnosti svarových spojů. [2] [4]

Při svařování nelegovaných, případně legovaných ocelí, s polymorfní přeměnou, můžeme TOO rozdělit na jednotlivé charakteristické pásma. (obr.4)



Obr. 4 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje

1. **Oblast částečného natavení** tvoří přechod z TOO do svar. kovu. U velké většiny ocelí se tato oblast redukuje na křivku (hranici ztavení) popř. plochu, poněvadž rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je minimální.
2. **Oblast přehřátí**, tj. oblast s teplotami nad A_{c3} , překračující teplotu intenzivního růstu primárních zrn. Pro nelegované oceli je to teplota kolem 1050°C a pro mikrolegované oceli je tato teplota asi $1250 - 1300^{\circ}\text{C}$.
3. **Oblast normalizace** vyhřátá nad teplotu A_{c3} s úplnou transformací $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$
4. **Oblast částečné rekystalizace** nad teplotou A_{c1} s neúplnou polymorfní přeměnou, t.j. mezi teplotami A_{c1} až A_{c3} .
5. **Vyžíhaná oblast** pod teplotou A_{c1} , ve které probíhají změny buď v rámci tuhého roztoku α Fe, příp. substrukturní. [4]

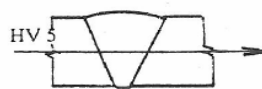
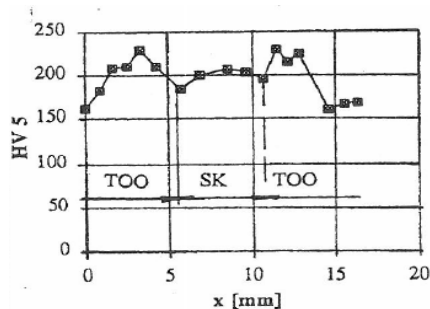
Šířka jednotlivých pásem TOO je rozdílná pro různé technologie svařování a ve velké míře je závislá na svařovacích parametrech. Pro jednotlivé technologie lze charakterizovat šířku pásem viz. tab. [1]

Technologie svařování	Šířka TOO (mm)		
	Nad A ₁	Nad A ₃	Přehřátá oblast
ROS	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
MAG	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
APT	3 až 15	0,3 až 2	0,1 až 0,5
Elektrostruskové svařování	5 až 50	1 až 10	0,5 až 5
Svař. elektronovým paprsk.	0,3 až 1	0,1 až 0,3	0 až 0,1
Svařování plazmou	0,3 až 1	0,1 až 0,3	0 až 0,1

Tab. 2 Orientační šířky jednotlivých pásem TOO

Účinky deformací vlivem tepla při svařování lze pozorovat v teplem ovlivněné oblasti zejména při svařování legovaných, zušlechťených a termomechanicky zpracovaných ocelí.

V takových případech se doporučuje limitovat použitý svařovací příkon, tak aby šířka popuštěné oblasti byla co nejmenší. S ohledem na malou šířku TOO zkusíme pevnost jednotlivých pásem na vzorcích s nasimulovaným svářecím cyklem nebo nepřímo měřením tvrdosti. (obr.5). Z obrázku je patrné výrazné zvýšení tvrdosti v oblasti nad teplotou přehřátí a pokles v okolí teploty A₁. Maximální dosažená tvrdost závisí na chemickém složení



oceli a použitým příkonu svařování (ovlivňuje čas chladnutí $\Delta t_{8/5}$). V průběhu svařování, většinou technologií, dochází v pásmu přehřátí k růstu zrn. Relativně malý růst zrn lze pozorovat při svařová-

Obr. 5 Průběh tvrdosti svarovým spojem

ni el. obloukem obalenou elektrodou, větší ovlivněná oblast je při svařování automatem a extrémních hodnot dosahuje u elektrostruskového svařování. Zhrubnutí zrna výrazně zhoršuje plasticitu (vrubovou a lomovou houževnatost), zvyšuje náchylnost k praskání, snižuje pevnost a dále pak může negativně ovlivnit zejména odolnost proti korozi nebo žárupevné vlastnosti oceli. [1] [2] [4]

2 ELEKTRICKÝ OBLOUK

2.1 Podstata elektrického oblouku

Elektrický oblouk je výboj v plynech tzn. že pro vznik a udržení oblouku je zapotřebí přítomnost ionizovaného plynu mezi elektrodami. Při svařování se elektrického oblouku využívá k přeměně elektrické energie na energii tepelnou a vzniká mezi elektrodou a základním materiálem při značné intenzitě proudu (10 až 2000 A) a za docela nízkého napětí (10 až 50 V). Elektrický oblouk vzniká za předpokladu, že napětí mezi elektrodou a materiálem je vyšší než ionizační napětí plynu při dostatečné proudové hustotě a trvalý elektrický výboj nastane, když vznikající teplo zabezpečí ohřátí plynu na teplotu potřebnou pro tepelnou ionizaci obklopující atmosféry.

Ionizovaný plyn vede el. proud a samotnou ionizací se plyn dostává do plazmatického skupenství. Z elektricky neutrálních atomů plynu se uvolní záporně nabitě elektrony a zůstanou kladně nabitě ionty. Ionizace probíhá tak, že na povrchu záporné elektrody – katody se vytvoří tzv. katodová skvrna s největší teplotou a z ní jsou emitovány elektrony, které se srážejí s atomy plynu, čímž jim předávají kinetickou energii a dochází k rozbití atomů na elektrony a kladné ionty. Elektrony i kladné ionty jsou pomocí vnějšího napětí mezi elektrodami uváděny do pohybu, čímž dochází k jejich srážkám s neutrálními atomy, které jsou rozbíjeny na další kladné ionty a elektrony. Na konci své dráhy dopadají elektrony na anodu, přičemž se jejich kinetická energie mění na teplo a tím se anoda ohřívá na vysokou teplotu cca. 2400 °C. Kladné ionty narážejí na katodu, předávají jí svou kinetickou energii a dochází k ohřevu. Ohřátí katody na teplotu kolem 2100 °C umožňuje další emisi elektronů. Na hranici obloukového sloupce je teplota nízká a tak zde dochází ke slučování elektronů s kladnými ionty tzv. rekombinace. U stabilního oblouku jsou oba popsány pochody v rovnováze.

Teplota v obloukovém sloupci dosahuje 6000 až 8000 °C a u plazmového oblouku, jehož průřez je extrémně zmenšen je to až 30000 °C v důsledku velké proudové hustoty. [2]

2.2 Charakteristiky elektrického oblouku

2.2.1 Zapálení oblouku

Zapálení oblouku probíhá při napětí zdroje naprázdno, které bývá obvykle vyšší než při ustáleném hoření oblouku. Velikost zápalného napětí (60 až 70 V) závisí na materiálu a tvaru elektrod a také na ionizační schopnosti okolní plynné atmosféry.

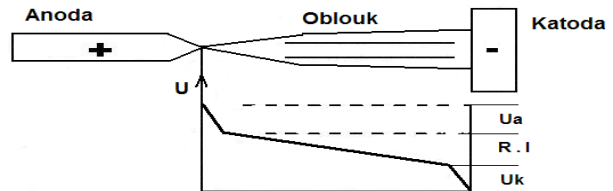
Prvotní zapálení elektrického oblouku lze uskutečnit následujícími způsoby:

- 1) krátkodobým dotykem elektrody se základním materiálem a následným rozpojením. Dotykem elektrody s materiálem při průchodu zkratového proudu vysokým přechodovým odporem na rozhraní elektroda – materiál se konec elektrody rozžhává a po jejím oddálení od materiálu v důsledku tepelné emise elektronů dojde k ionizaci okolního plynného prostředí a zapálení elektrického oblouku. Pro zapálení oblouku stačí relativně nízká intenzita proudu.
- 2) vytvořením vysokoionizovaného prostředí mezi elektrodou a materiálem na základě přivedení vysokonapěťového impulsu na elektrody a to buď pomocí výboje jiskry, která ionizuje okolní plynné prostředí (u střídavého proudu), anebo přechodem tohoto jiskrového výboje v následný obloukový výboj (u stejnosměrného proudu). Zařízení generující vysokonapěťové impulsy se nazývá ionizátor.
- 3) pomocí takzvaného startovacího proudu při dotykovém zapalování. Tento způsob zapalování je umožněn současným řízením a kontrolou svařovacích parametrů a jeho použití je u metody svařování v ochraně plynu WIG. Startovací proud, jehož intenzita je nízká a dosahuje maximálně 10 A, ohřívá pouze hrot wolframové elektrody. Tento stav může trvat delší dobu a při oddalování elektrody se zvyšuje proud řízeným nárůstem na svařovací hodnotu, přičemž dojde k zapálení oblouku. Výhodou uvedeného způsobu je mimo jiné přesné umístění začátku sváru svařovaném materiálu. [2]

2.2.2 Skladba oblouku

Každý elektrický svařovací oblouk má tři základní oblasti, které se vyznačují různými úbytky napětí :

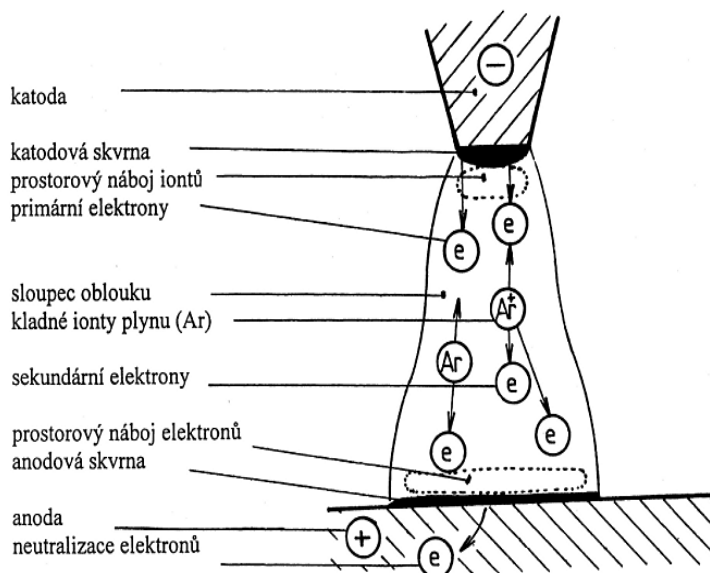
- sloupec oblouku
- katodová skvrna
- anodová skvrna



Obr. 6 Průběh napětí na oblouku

Nejvhodnější pro popis jednotlivých částí je stejnosměrný oblouk, hořící mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem v ochranném prostředí argonu, protože při stejnosměrném proudu a konstantní délce hoří oblouk velmi stabilně a beze změny napětí i proudu. Každý oblouk představuje v el. obvodu odpor, který závisí na parametrech výboje.

Sloupec oblouku tvoří největší část elektrického oblouku, má tvar lehce se rozšiřujícího komolého kužele a je zářivě svítící oblastí ionizovaného plynu ve formě plazmy o vysoké teplotě, jejíž maximální hodnota závisí na řadě faktorů. Zejména na složení a s tím souvisejícím stupněm ionizace a disociace a také na intenzitě proudu a hodnotě napětí.



Obr. 7 Schéma elektrického oblouku u metody WIG

Elektrická vodivost sloupce oblouku je způsobena přítomností elektronů a iontů, které vznikají v důsledku termické ionizace. Víceatomové molekuly plynů se za vysokých teplot štěpí na atomy, které při vzájemných srážkách mezi sebou a srážkách s primárními elektrony uvolněnými teplem z katody se ionizují, ztrácejí z obálky elektrony a mění se ve směs atomů, iontů a elektrónů.

Vzniklé kladné ionty jsou přitahovány katodou, záporné elektrony anodou. Elektronic-

ký oblouk je obvykle ve stavu „kvazineutrálním“ tzn. v daném objemu a okamžiku se předpokládá stejný počet kladných a záporných částic. Vedení proudu sloupcem oblouku zajišťují především elektrony (mají nižší hmotu než ionty a proto se pohybují ve spádu napětí mnohem rychleji). Překročí-li proud určitou kritickou hodnotu, začne veškerá plazma proudit směrem od elektrody k základnímu materiálu bez ohledu na polaritu jednotlivých částic. Tento děj souvisí s intenzitou kruhového magnetického pole indukovaného proudem protékajícím obloukem. Toto pole působí na plazmu silou F , která směřuje vždy od elektrody k základnímu materiálu a při určité hodnotě proudu může být vyšší než elektrostatické síly přitahující ionty ke katodě a změni tím směr proudění plazmy. Rychlost proudění plazmy ovlivňuje tepelné a mechanické účinky oblouku. Maximální teploty oblouku jsou ve středu a směrem k okraji klesají, přičemž nejvyšší teplota je pod katodovou skvrnou kde dosahuje až 16000°C . Při ručním svařování obalenou elektrodou se teplota oblouku pohybuje mezi 4200 až 6400°C , při svařování pod tavidlem 6200 až 7800°C , v ochranné atmosféře WIG 6500 až 9000°C a u svařování MIG\MAG vytváří vysoká proudová hustota velmi vhodné podmínky pro ionizaci a proto se zde teploty pohybují v rozmezí 8000 až 15000°C . Změna napětí na sloupci je odvislá od jeho délky. Se zvětšující se vzdáleností musí napětí růst, aby se hoření oblouku udrželo. Přibližný úbytek napětí je asi 2V na 1mm délky oblouku. [2]

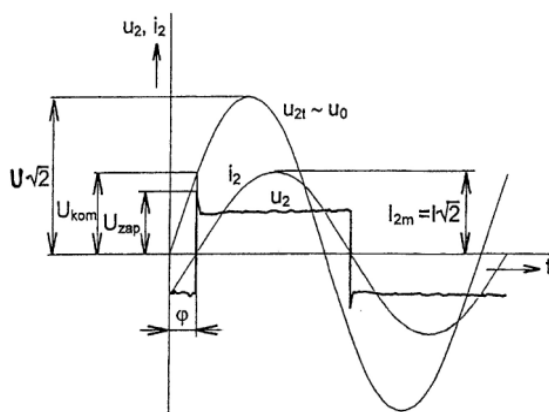
Katodová skvrna je ostře ohraničená oblast, která emituje pomocí termické emise prvotní elektrony důležité pro zapálení oblouku a ionizaci plynného okolí. Elektrony získávají v oblasti katodového úbytku napětí tak velkou kinetickou energii, že jsou schopné při srážkách ionizovat neutrální atomy na kladné ionty a sekundární elektrony. Skvrna je stabilní, nebo se přesunuje po povrchu katody v závislosti na teplotě, proudu a tvaru elektrody. Teplota katodové skvrny není konstantní a zvyšuje se s nárůstem proudu. Teplota katody se pohybuje kolem 2400 až 3000°C .

Na katodovou skvrnu dopadají kladné ionty, které se pohybují ve směru záporného pólu vlivem elektrostatických sil. Ionty se na povrchu neutralizují a předávají na katodu svoji energii, která přispívá k termoemisi elektronů. Bezprostředně ke katodové skvrně přiléhá oblast katodového úbytku napětí a tento pokles je výsledkem spotřeby energie oblouku pro emisi elektronů a udělení dostatečné kinetické energie potřebné k ionizaci sloupce oblouku. Tloušťka úbytku napětí je přibližně $0,1\text{mm}$ a hodnota úbytku napětí je u metody WIG asi polovina celkového spádu napětí (8V při 100A). S poklesem proudu tento úbytek narůstá. [2] [4]

Anodová skvrna zde jsou odváděny (pohlčovány) a neutralizovány dopadající elektrony a jejich kinetická energie se mění na energii tepelnou. V oblasti anodové skvrny se nachází prostorový náboj elektronů, který způsobuje anodový úbytek napětí 4 až 8V. Úbytek napětí v anodové oblasti se prakticky nemění se zvyšováním proudu. Kritický je proud, při kterém teplota povrchu anody dosáhne bodu varu materiálu anody. Při nadkritickém proudu se dostávají vlivem varu do anodové oblasti páry kovu, ze kterého je anoda a to vede ke snížení ionizačního potenciálu směsi plynů a ke snížení úbytku napětí na anodové části.

2.2.3 Elektrický oblouk v obvodu střídavého proudu

V zásadě platí, že lépe se zajišťuje stabilita hoření oblouku při svařování stejnosměrným proudem než proudem střídavým. Oblouk napájený střídavým proudem hoří méně klidně než oblouk napájený stejnosměrným proudem z toho důvodu, že zhasíná po dobu, kdy napětí na oblouku klesne pod napětí ionizační a znovu se zapálí při napětí podstatně vyšším. Toto je způsobeno tím, že napětí a intenzita proudu periodicky mění směr i velikost. Prochází-li proud nulovým bodem na začátku a na konci každé půlperiody oblouk zhasne a sníží se teplota elektrod a sloupce plynu. Současně nastává deionizace plynu a důsledkem toho klesá i elektrická vodivost ve sloupci. Pokud je doba zhasnutí oblouku kratší než doba dozrívání ionizace sloupce plazmy, samočinně se v další polovině cyklu oblouk zapálí. Pro opětovné zapálení oblouku na začátku každé půlperiody je potřebné zvýšené napětí tzv. zápalné. Toto je možné vytvořit pomocí fázového posuvu mezi proudem a napětím např. zapojením indukčnosti do elektrického obvodu (vřadit tlumivku do obvodu svařovacího zdroje). [2]



- u_2 - průběh napětí na oblouku
- i_2 - střídavý proud jdoucí obloukem
- u_{2t} - průběh napětí zdroje
- U_{zap} - zápalné napětí
- U_{kom} - komutační napětí
- φ - fázový posuv mezi proudem a napětím
- $U_{kom} > U_{zap}$

Obr. 8 Časový průběh napětí na oblouku při svařování střídavým proudem

2.3 Přenos materiálu elektrickým obloukem

V porovnání s metodou TIG jsou pochody spojené se svařováním tavící se elektrodou daleko složitější, protože zde působí řada dalších faktorů, např. chemické složení kovu elektrody, složení obalu, tavidla, ochranného plynu, délka volného konce elektrody a rychlost podávání. Základní podmínka stability hoření oblouku je taková, aby rychlost podávání elektrody, rychlost tavení a přenos kovu elektrody obloukem byly v rovnováze. [2]

2.3.1 Druhy přenosu kovu elektrickým obloukem

Svařování pomocí elektrického oblouku tavící se elektrodou v ochranné atmosféře vytváří velkou škálu možností přenosu materiálu z tavící se elektrody do svarové lázně, zejména v závislosti na proudu, napětí, velikosti elektrod a složení ochranného plynu.

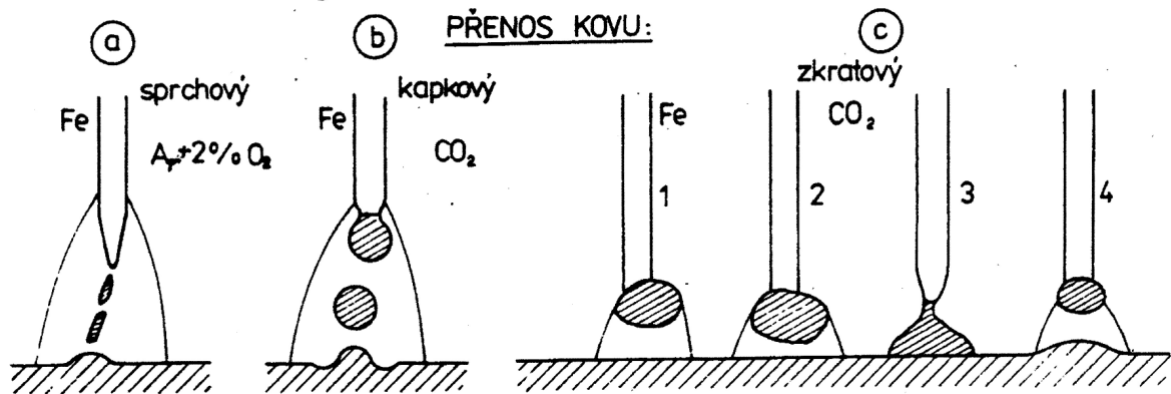
Jde o celý komplex fyzikálních podmínek svařování, které určují charakter procesu a výrazně ovlivňují metalurgické reakce mezi ochranným plynem a svarovým kovem a také tedy výsledné vlastnosti svarového kovu.

V závislosti na uvedených aspektech lze rozlišovat tyto způsoby přenosu kovu.

sprchový přenos – je pro něj charakteristický relativně dlouhý oblouk, vysoká proudová hustota a vyšší napětí na oblouku. Roztavený kov prochází obloukem jako proud oddělených drobných kapek. Při použití pulsního průběhu proudu a optimální volbě parametrů lze dosáhnout stavu, kdy při každém pulsu se uvolní elektrody přesně jedna kapka kovu. Tento způsob přenosu je vhodný zejména při svařování v ochranných plynech, které jsou bohaté na argon.

kapkový přenos – vhodný zejména při svařování v ochraně plynu CO₂, kdy při parametrech ($U_s = 24$ až $28V$, $I_s = 200$ až $500A$) a kratším oblouku se odtavují kapky frekvencí 5 až 10 kapek za vteřinu. S rostoucím proudem velikost rozměru kapek klesá a zvyšuje se frekvence jejich oddělování. [2]

zkratový přenos – při krátkém oblouku, který je charakteristický pravidelným střídáním fáze hoření oblouku a fáze zkratu se kapka roztaveného kovu na konci elektrody dotkne tavné lázně, vytvoří zkrat a po jeho přerušení se zase oblouk zapálí. Proudová hustota je spíše střední a taktéž napětí na oblouku. [2] [4]



Obr. 9 Způsoby přenosu kovu elektrody v oblouku

2.4 Svařovací zdroje pro obloukové svařování

Úkolem svařovacích zdrojů je dodání elektrické energie potřebné pro zapálení a hoření elektrického oblouku tzn. že dodávají do uzavřeného svařovacího obvodu proud, který má požadované vlastnosti pro konkrétní metody svařování.

Požadavky kladené na svařovací zdroje:

- spolehlivé zapálení oblouku a jeho stabilní hoření
- plynulá a citlivá regulace svařovacího proudu, eventuelně napětí
- stálý výkon, vysoká účinnost
- provozní spolehlivost, nízké provozní náklady, přiměřené pořizovací náklady
- nenáročná obsluha, bezpečný provoz
- odolnost proti krátkodobým zkratům při zkratovém přenosu kovu
- statická charakteristika musí odpovídat způsobu svařování
- dynamická charakteristika musí zabezpečit po zkratu rychlý nárůst svař. napětí

2.4.1 Rozdělení svařovacích zdrojů

Svařovací zdroje dělíme dle:

1. způsobu přeměny energie

- zdroje rotační (svařovací dynamo)
- zdroje statické, netočivé (svařovací transformátory, usměřovače, měniče)

2. druhu dodávaného proudu

- zdroje stejnosměrného proudu (svařovací dynamo)
- zdroje usměrněného proudu (svařovací usměřovače, měniče)
- zdroje střídavého proudu (svařovací transformátory)

2.4.1.1 Rotační svařovací zdroje

Rotační svařovací zdroje generují stejnosměrný proud. Nejčastěji jsou tvořeny svařovacím dynamem, které pohání nejčastěji třífázový asynchronní nebo spalovací motor, tam kde není k dispozici elektrorozvodná soustava. Svařovací dynamo a motor tvoří jeden celek na společném podvozku tzv. svařovací agregát. Svařovací dynamo má strmou statickou charakteristiku, dává měkký oblouk vhodný pro ruční svařování obalenou elektrodou, ale také pro metodu TIG případně MIG\MAG. Regulace proudu v celém jeho regulačním rozsahu je plynulá a zajišťuje se změnou buzení magnetického pole statoru dynamu. Nevýhodou těchto zdrojů je značná hmotnost, hlučnost a také vysoká spotřeba elektrické energie.

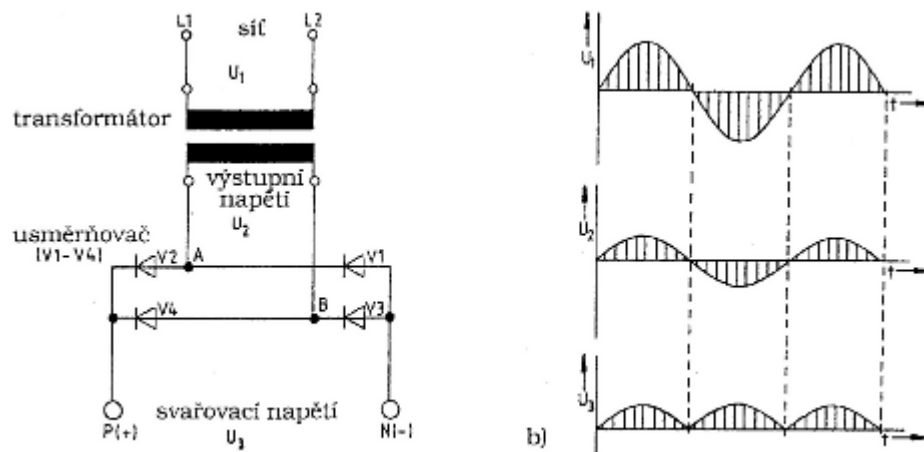
2.4.1.2 Svařovací transformátory

Svařovací transformátor pro obloukové svařování je většinou zdrojem jednofázového střídavého proudu. Každý transformátor se skládá ze železného jádra, který tvoří tenké ocelové pláty, primární a sekundární cívky, kde vnutí obou cívek je z měděných nebo hliníkových vodičů. Primární vnutí je připojeno k síti a sekundární do svařovacího obvodu. Střídavý proud ze sítě protékající vnutím primární cívky indukuje střídavé elektromagnetické pole procházející převážně železným jádrem transformátoru. V důsledku toho vzniká ve vnutí sekundární cívky střídavé napětí, které po zapálení oblouku vyvolá v obvodu vznik

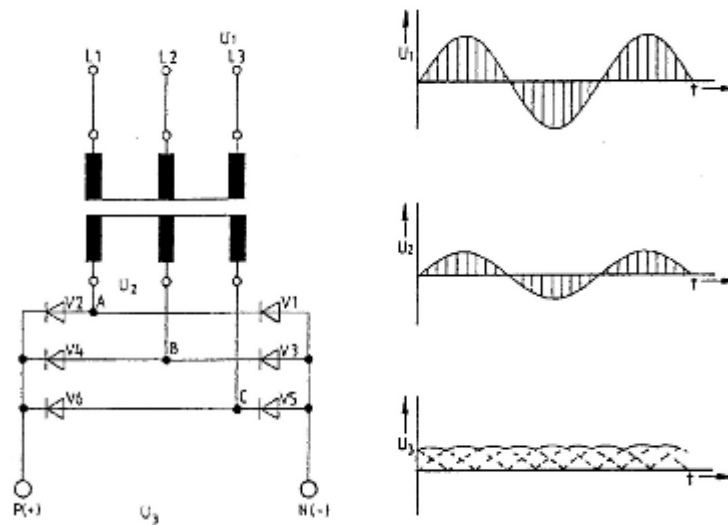
sekundárního svařovacího proudu. Regulace proudu je buď stupňovitá nebo plynulá a statická charakteristika mírně klesající. Svařovací transformátory jsou vhodné zejména pro ruční svařování obalenou elektrodou, popřípadě také pro metodu TIG. V porovnání s rotačními zdroji mají transformátory nižší spotřebu a vyšší účinnost. Regulace svařovacího proudu je závislá na konstrukčním uspořádání transformátoru. [2]

2.4.1.3 Svařovací usměrňovače

Svařovací usměrňovač je zdrojem stejnosměrného (usměrněného) proudu. Základním prvkem je síťový transformátor a příslušné usměrňovací elementy zapojené v sekundárním obvodu transformátoru. Transformátor je buď jedno nebo třífázový. Usměrňovací elementy jsou polovodičové křemíkové diody nebo tyristory u jednofázových zdrojů v zapojení dvoucestného můstkového usměrňovače nebo šesticestného můstkového usměrňovače u třífázových svařovacích zdrojů. U jednofázového usměrňovače je zvlnění výstupního usměrněného napětí relativně velké a frekvence zvlnění odpovídá dvojnásobku síťové frekvence. U třífázového usměrňovače je zvlnění výstupního usměrněného napětí podstatně menší a frekvence zvlnění je šestinásobkem síťové frekvence. Třífázový usměrňovač je vhodný pro značná proudová zatížení, má velmi dobré svařovací vlastnosti a ve srovnání s jednofázovým zatěžuje napájecí síť symetricky. Svařovací usměrňovače ve srovnání s rotačními zdroji mají nižší spotřebu elektrické energie, mají takřka nehlukný chod, vyšší účinnost, nižší hmotnost a dobré dynam. vlastnosti při rychlých změnách napětí a proudu.



Obr. 10 Jednofázový usměrňovač



Obr. 11 Třífázový usměrňovač

2.4.1.4 Svařovací invertorové zdroje

Invertorový svařovací zdroj je řízený zdroj s výkonovým tranzistorem, pracujícím na principu středofrekvenčních měničů o frekvenci 20 až 100 kHz a v současné době patří k nejprogresivnější koncepci moderního svařovacího zdroje. Základním rysem invertorového zdroje je umístění transformátoru v energetickém řetězci až za spínací tranzistor. Hlavní důvod tohoto umístění je závislost hmotnosti a objemu transformátoru na jeho pracovní frekvenci tzn. čím vyšší frekvence, tím menší objem a také hmotnost. Z těchto důvodů má tento zdroj nízkou hmotnost a malé rozměry, aniž by to omezovalo nebo snižovalo nějak jeho výkonnost. Proudová hmotnost nepřesahuje 0,05 kg/A a další velkou předností je jeho vysoká elektrická účinnost, která se pohybuje kolem 90%. Základem celého zařízení je řídicí elektronická jednotka, která reguluje vzájemnou součinnost všech funkčních bloků svařovacího zdroje s jednotkou podávání drátu a dodávkou ochranného plynu.

Konstrukce invertorového svařovacího zdroje dává předpoklady pro:

- vysoký a stabilní svařovací výkon
- různě nastavitelnou charakteristiku v režimech MIG, MAG, TIG a MMA
- jednoduchou a nenáročnou obsluhu
- univerzálnost použití
- možnost výstupu dat na PC při řízení a kontrole jakosti
- provozní spolehlivost, snadnou detekci závad
- přiměřené pořizovací a velmi nízké provozní náklady

3 SVAŘITELNOST, TRHLINY A ZKOUŠKY SVARŮ

3.1 Svařitelnost polymerů

Spoj se vytváří při styku teplem aktivovaných povrchů za pomoci tlaku při případném použití přídavného materiálu nebo i bez něj. Pro vytvoření pevného spoje je důležitý těsný kontakt povrchů, aby se makromolekuly přiblížily na takovou vzdálenost, že se projeví mezimolekulární síly. Pro nárůst pevnosti je důležité vzájemné mísení mikroobjemů povrchových vrstev. Tato tavitelnost společně s reologickými vlastnostmi vzniklé taveniny je označována jako svařitelnost a určuje snadnost vzniku a kvalitu sváru. [2]

3.2 Svařitelnost ocelí

Svařitelnost ocelí je komplexní charakteristika, která vyjadřuje vhodnost oceli vytvořit svarový spoj požadovaných mechanických, fyzikálních, chemických a technologických vlastností za určitých podmínek s cílem dosáhnout jeho požadované kvality, spolehlivosti a životnosti. Svařitelnost se určuje dle normy, především dle chemického složení, síly svařovaného plechu, obsahu difuzního vodíku a tepelného příkonu. Dále závisí na teplotě předehřevu a teplotě interpass. Při svařování a po svařování mohou vznikat různé trhliny a vady.

3.3 Trhliny ve svarových spojích

Trhliny, které vznikají ve svarových spojích, jsou jednou z nejčastějších příčin nevyhovujících vlastností svarového spoje. Jejich vznik je prakticky nepřijatelný a to ve všech stupních hodnocení svarových spojů. [5]

3.3.1 Trhliny za tepla

Teplé trhliny vznikají jak ve svarovém kovu tak i v TOO mezi teplotami solidu a likvidu nebo i při teplotách těsně pod křivkou solidu. Z hlediska jejich vzniku je dělíme na:

- Krystalizační trhliny
- Likvační trhliny
- Polygonizační trhliny

3.3.1.1 Krystalizační trhliny

Vznikají v průběhu tuhnutí (krystalizace) okolo teploty solidu. Při teplotě vyšší než teplota solidu je pevná fáze (dendrity) ve svarovém kovu obklopena taveninou. Deformace tohoto systému, kterou vyvolá pokles teploty, bude probíhat především v tavenině a již přítomné dendrity se budou pouze natačovat. Deformační schopnost systému se výrazně sníží zaklíněním dendritů. Pokud viskozita svarového kovu umožní při dané rychlosti deformace zalézt mezidendritický prostor, trhlina nevznikne, pokud ovšem ne, vzniknou ve svarovém kovu kavity a jejich spojováním krystalizační trhliny. Nejčastější příčinou vzniku krystalizačních trhlin je zvýšený obsah fosforu a síry. Vznikají nejčastěji v té části svarového kovu, která tuhne jako poslední. [5]

3.3.1.2 Likvační trhliny

Likvační trhliny mohou vznikat v TOO, ale i svaru při vícevrstevném svařování. Hlavní příčinou vzniku je zvýšený obsah prvků S,P,B,Ti,Nb,Si v oceli nebo ve svarovém kovu. Tyto prvky vytvářejí sulfidy, oxisulfidy, karbosulfidy nebo se železem a niklem eutektika popř. intermetalické fáze. Pokud je teplota tavení těchto fází nižší než teplota solidu svařované oceli, fáze se rozpouští a vzniklá tavenina penetruje na hranice austenitických zrn a zde velmi výrazně snižuje jejich pevnost. Oslabené hranice zrn nejsou schopné přenést napětí,

kteří vzniká při objemových změnách (smrštění) při ochlazování a vznikají mezikrystalické likvační trhliny.

3.3.1.3 Polygonizační trhliny

Hlavní příčinou polygonizačních trhlín, nebo také trhlín z poklesu tažnosti, je vznik polygonizace dislokací tj. vytváření dislokačních sítí při vysokých teplotách. Polygonizovaná síť dislokací omezuje jejich další pohyb a tím se zhoršují podmínky pro plastickou deformaci materiálu a snižuje se jeho tažnost při ochlazování. Pokud tato deformace svaru překročí hodnotu, kterou je ocel schopna kompenzovat tažností, vznikají polygonizační interkrystalické trhliny. Vznikají především ve svarech austenitických ocelí a slitin hliníku.

K zamezení vzniku trhlín za tepla je nutné zejména používat oceli a přídavné materiály s velmi nízkým obsahem nečistot, zejména síry a fosforu. Dalším krokem je snížení tepelného příkonu při svařování a tím i množství nataveného kovu, dále pak omezit deformace a stavy napjatosti vhodným tvarem svarového spoje, použít vhodnou technologii svařování a nepřekračovat hodnoty interpass teploty. [1] [5]

3.3.2 Trhliny za studena

Jsou trhliny indukované vodíkem, které vznikají při teplotách pod 250°C. Nejčastěji se vyskytují v podhousenkové oblasti, ale mohou se vyskytnout i v kořenové oblasti, koncové oblasti i ve svarovém kovu. Hlavní příčinou vzniku trhlín za studena je přítomnost zákalné martenzitické struktury, citlivé na přítomnost vodíku. Zdrojem vodíku ve svaru je nejčastěji atmosférická vlhkost, vlhkost z obalu elektrod, tavidel a ze svařovacích drátů po jejich nevhodném skladování. Ke snížení rizika vzniku studených trhlín se doporučuje používat nízkovodíkové metody svařování, před svařováním vysušit přídavný materiál, aplikovat předehřev, dohřev, minimalizovat vznik zbytkových napětí a vyvarovat se ostrých vad zejména v kořenové oblasti. [1] [5]

3.3.3 Lamelární trhliny

Lamelární (terasovité) trhliny vznikají v základním materiálu v důsledku namáhání kolmo k jeho povrchu. Mají kaskádovitý tvar, většinou rovnoběžný s povrchem materiálu. Hlavními činiteli jež ovlivňují vznik lamelárních trhlin jsou plastické vlastnosti ve směru kolmém k povrchu plechu, jmenovitě kontrakce, způsob svařování, přítomnost rozválcovaných vměstků, zvýšený obsah difuzního vodíku. Dle hodnoty poměrného zúžení se hodnotí ocel k náchylnosti k trhlinám. Do hodnoty 10% je ocel náchylná, od 10 až 25% je ocel běžně odolná vůči trhlinám a nad hodnotu 25% ocel není náchylná k tvorbě lamelárních trhlin. K omezení vzniku je třeba používat materiály s nízkým obsahem nečistot (fosfor, síra), vměstků a vodíku a eliminovat tahová napětí. [1] [5]

3.3.4 Žíhací trhliny

Žíhací trhliny vznikají při tepelném zpracování svarů, popřípadě při vícevrstevném svařování. Náchylnost oceli k trhlinám zvyšují povrchově aktivní prvky (Cd,Sn,Sb,As) jejichž množství by nemělo přesáhnout 0,005 hm%. Důsledky náchylnosti lze minimalizovat snížením rychlosti ohřevu nebo dohřevem po svařování popř. použitím dvojvrstvého navařování na principu funkce žíhací housenky. [1] [5]

3.4 Zkoušky svarů

Zkoušky svarů rozdělujeme dle vlivu, který mají na svarový spoj. Pokud dojde k porušení svaru, jedná se o zkoušku destruktivní, pokud k porušení svaru nedojde, jedná se o zkoušku nedestruktivní. Vady ve svaru je nutné považovat za nebezpečné koncentrátoři napětí, které velmi nepříznivě působí na velikost meze únavy a tím i předčasné vyřazení svařovaného dílce nebo sestavy z provozu. Do provozu lze připustit pouze takový typ svarů, který

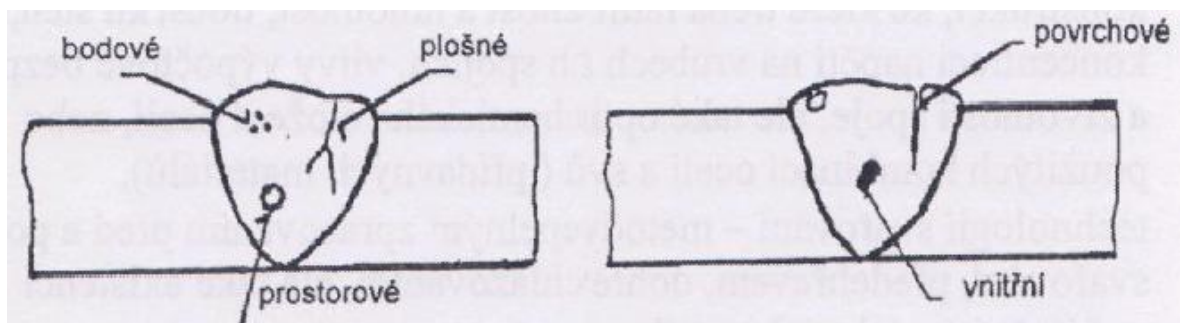
je bez vad nebo se u něj jedná o takový typ vady, o které víme, že při známém zatížení nijak neohrozí bezpečnost konstrukce.

Dle tvaru rozlišujeme vady

- Bodové
- Plošné
- Prostorové

a dle polohy rozlišujeme vady

- Povrchové
- Vnitřní



Obr. 12 Typy vad

3.4.1 Nedestruktivní zkoušky svarů

Nedestruktivní zkoušky představují důležitou operaci při zjišťování kvality ve všech etapách výroby a provozní spolehlivosti. Nedestruktivní zkoušky svařování kvality svarů dělíme podle toho, jaké vady identifikujeme. Ke zjišťování povrchových vad se používají metody, vizuální VT (ČSN EN 970), kapilární (penetrační) PT (ČSN EN 571-1, 1289) a magnetická prášková MT (ČSN EN 1290, 1291). Vnitřní vady zjišťujeme metodou prozáření RT (ČSN EN 1435) a ultrazvukem UT (ČSN EN 1712, 1714). [6]

3.4.1.1 *Vizuální kontrola*

Vizuální zkouška je jediná metoda u které se hodnotí přímo samotná vada a slouží ke zjišťování zjevných povrchových defektů. Kontrola musí být provedena po dostatečném očištění svaru a před dalšími technologickými operacemi (např. nátěry). Závěry a výsledky jsou velmi důležité a tato zkouška by měla vždy předcházet všem ostatním kontrolám.

Dle použitých kontrolních prostředků rozlišujeme vizuální kontrolu přímou a nepřímou.

Přímá kontrola se provádí pouhým okem nebo za pomoci jednoduchých optických pomůcek, musí být použita na dobře přístupném povrchu a také musí být zaručena dobrá zraková schopnost proškoleného pracovníka.

Nepřímá kontrola se provádí za pomoci optických nebo optoelektronických přístrojů tzv. endoskopů. Používá se tam kde je nepřístupný povrch a to z důvodu geometrie nebo ohrožení bezpečnosti pracovníka. [6] [23]

3.4.1.2 *Kapilární (Penetrační) zkouška*

Tato zkouška poskytuje s docela velkou citlivostí zjišťovat vady, které přímo souvisí s povrchem, tzn. že musí být otevřené, aby do nich mohla vniknout detekční tekutina. Využívá se zde kapilárních jevů, zejména smáčivosti a vzlínivosti. Nejprve se zkoušený povrch řádně očistí, odmastí a osuší, poté se nanese penetrant a nechá se určitou dobu působit. Po uplynutí této doby se přebytek penetrantu odstraní tak, aby se zabránilo vymytí kapaliny z vad a zase nedostatečné odstranění vede k indikaci nepravých vad. Na takto připravený povrch se nanese vývojka a ihned po nanesení se provádí vizuální kontrola. [6] [24]

3.4.1.3 *Prášková magnetická metoda*

Vhodná metoda pro zjišťování povrchových i těsně podpovrchových vad. Nevyžaduje velké nároky na kvalitu zkoušeného povrchu, ovšem určitým omezením je, že metodu lze využívat jen pro magnetické materiály. Princip metody je založen na zjišťování rozptylu

magnetického toku, který vznikne ve zmagnetizovaném materiálu v místě výskytu vady. [26]

3.4.1.4 Zkouška prozářením

Jedná se o nejstarší metodu nedestruktivního zkoušení určenou pro vnitřní a špatně přístupné vady, založenou na principu pohlcování ionizačního, pronikavého elektromagnetického záření, v kontrolovaném místě a následné zviditelnění prošlého záření vhodným detektorem a lze tak zjistit místa, kde se vyskytují vady. V místech vad je pohlcování menší a na filmu se potom zobrazí jako tmavší místa. [6] [28]

3.4.1.5 Zkouška ultrazvukem

Metoda vhodná ke zjišťování vnitřních vad je založena na principu šíření akustického vlnění zkoušeným předmětem a detekci změn vyvolaných interakcí na rozhraní dvou prostředí s rozdílnými akustickými vlastnostmi. Změny se zobrazují na obrazovce a vyhodnocuje se rozdíl intenzit vysílací a přijímací sondy a časové posunutí vln. [6] [29]

3.4.2 Destruktivní zkoušky svarů

Pomocí destruktivních zkoušek zjišťujeme chemické složení, strukturní charakteristiky, mechanické vlastnosti a technologické vlastnosti.

3.4.2.1 Zkouška tahem

Podstatou zkoušky je plynulé zatěžování zkušební tyče, odebrané napříč svarovým kovem až do přetržení. Tahovou zkouškou zjišťujeme tyto mechanické vlastnosti mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakci. ČSN EN 895 [5] [31]

3.4.2.2 Zkouška lámavosti

Podstatou zkoušky je ohybová deformace. Zkoušejí se 2 tělesa ze strany kořene a 2 ze strany líce svaru. V průběhu zkoušení nesmí zkušební kus vykazovat žádné samostatné vady 3mm v jakémkoli směru. Vady, které se vyskytují na hraně zkoušeného kusu se neuvažují. ČSN EN 910 [5] [32]

3.4.2.3 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška spočívá v přeražení zkušební tyče rázem kyvadlového kladiva, uprostřed zkušební tyče je vrub a je podepřena na obou koncích. Nárazová práce se stanovuje v joulech a je měřítkem proti rázovému namáhání. Zkušební tyč je dlouhá 55mm, čtvercového profilu o hraně 10mm. Jsou určeny 2 druhy vrubů, V-vrub a U- vrub. ČSN EN 10045-1 [5] [33]

3.4.2.4 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti se provádí na příčném řezu svarového spoje svařovaného kovového materiálu dle Vickerse s běžným zatížením HV5 nebo HV10. Účelem zkoušky je stanovení tvrdosti v jednotlivých pásmech svarového spoje a základního materiálu. ČSN EN 1043-1

3.4.2.5 Makroskopická kontrola svarů

Účelem makroskopické kontroly je stanovení makroskopického charakteru svarového spoje obvykle kontrolou příčného řezu zkušební vzorku. Kontrola se provádí na vzorcích

orientovaných příčně k ose svaru, která zahrnuje svarový kov a tepelně ovlivněnou oblast.
ČSN EN 1321 [5] [34]

3.4.2.6 Zkouška rozlomením

Tato zkouška je nejjednodušší zkouškou pro zjištění typů, rozměrů a rozmístění vnitřních vad, např. trhliny, dutiny, studené spoje, neprůvary a vměstky na ploše lomu. Zkouška spočívá v rozlomení spoje ve svarovém kovu tak, aby bylo možno pozorovat lomovou plochu. Rozlomení může být vyvoláno statickým nebo dynamickým ohybem nebo krutem.
ČSN EN 1320 [5] [35]

4 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

4.1 Rozdělení metod svařování

Rozdělení metod svařování řeší norma ČSN ISO 857 a norma ČSN EN ISO 4063 což je svařování a příbuzné procesy, řeší přehled metod a jejich číslování.

Tavné svařování (0)

Svařování elektrickým obloukem (1)

Obloukové svařování tavící se elektrodou (11)

Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (111)

Gravitační obloukové svařování obalenou elektrodou (112)

Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu (114)

Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem (12)

Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem drátovou elektrodou (121)

Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem páskovou elektrodou (122)

Obloukové svařování v ochranné atmosféře (13)

Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu – MIG (131)

Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu (132)

Obloukové svařování elektrodou plněnou kovovým práškem v inertním plynu (133)

Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu – MAG (135)

Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu (136)

Obloukové svařování elektrodou plněnou kovovým práškem v aktivním plynu (137)

Obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atm. inertního plynu –WIG (141)

Obloukové svařování netavící se elektrodou WIG bez přídavného drátu (142)

Obloukové svařování netavící se elektrodou WIG s plněnou elektrodou nebo tyčí (143)

Plazmové svařování (15)

Plazmové svařování MIG (151)

Svařování magneticky ovládaným obloukem (185)

Odporové svařování (2)

Přepřátováním

Bodové odporové svařování (21)

Švové odporové svařování (22)

Rozválcovací švové svařování (222)

Výstupkové (23)

Stykové

Odtavovací stykové svařování (24)

Stlačovací stykové svařování (25)

Vysokofrekvenční odporové svařování (291)

Plamenové svařování (3)

Kyslíko-acetylenové svařování (311)

Kyslíko-propanové svařování (312)

Kyslíko-vodíkové svařování (313)

Tlakové svařování (4)

Ultrazvukové svařování (41)

Třecí svařování (42)

Kovářské svařování (43)

Výbuchové svařování (441)

Difúzní svařování (45)

Tlakové svařování s plamenovým ohřevem (47)

Tlakové svařování za studena (48)

Ostatní způsoby svařování (7)

Aluminotermické svařování (71)

Elektrostruskové svařování (72)

Elektroplynové svařování (73)

Indukční svařování (74)

Svařování světelným zářením (75)

Laserové svařování (751)

Elektronové svařování (76)

Přivařování svorníků (78)

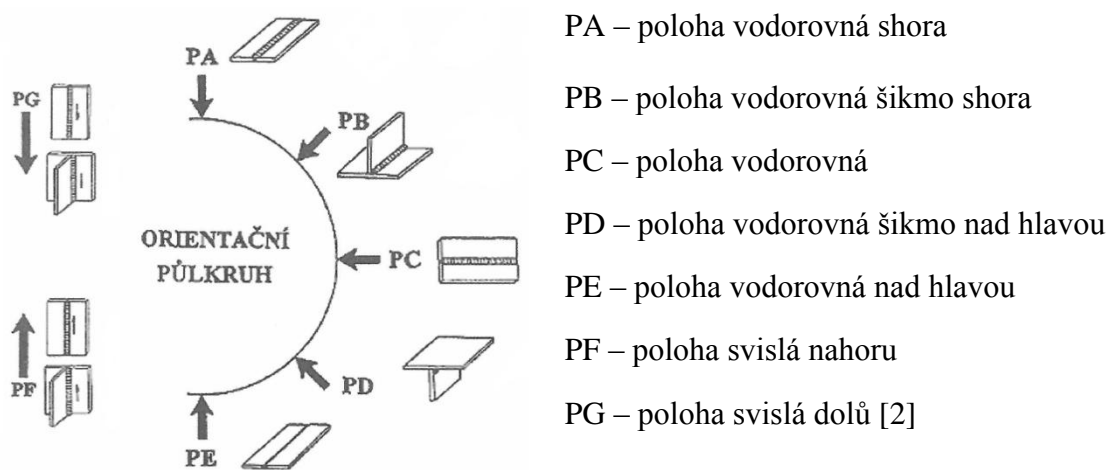
Pájení (9)

Pájení tvrdé (91)

Pájení měkké (94) [2]

4.2 Pracovní polohy při svařování

Svařování konstrukcí probíhá v různých svařovacích polohách. Pro potřeby zkoušek svářečů, technologických postupů aj. jsou polohy normalizovány dle ČSN EN ISO 6947.



Obr. 13 Polohy svařování

4.3 Svařování metodou TIG

V angličtině je tato metoda označována zkratkou TIG (Tungsten Inert Gas) a v němčině WIG (Wolfram Inert Gas). Metoda při které hoří oblouk mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Ochranu elektrody i tavné lázně před okolní atmosférou zajišťuje inertní plyn argonu, helia a jejich směsí o čistotě minimálně 99,995%. Svařovat lze bez přídavného materiálu nebo s přídavným materiálem ve formě drátu ručně, nebo automaticky s podavačem drátu. Lze svařovat střídavým proudem, který je vhodný pro materiály jako je hliník, hořčík a jejich slitiny a také lze svařovat stejnosměrným proudem, který je vhodný pro středně a vysokolegované oceli, měď, nikl, titan, zirkon, molybden a další. Pro svařování uhlíkových ocelí se metoda TIG používá minimálně a to z důvodu nebezpečí vzniku pórů ve svarovém kovu a také z ekonomického hlediska.

Netavící se elektrody se vyrábějí čisté bez příměsí o čistotě 99,9%W nebo legované oxidy kovů thoria, lanthanu, ceru, zirkonu nebo yttria, které jsou v elektrodě rozptýleny rovnoměrně. Přísady těchto oxidů snižují teplotu ohřevu elektrody až o 1000°C, zvyšují životnost, zlepšují zapalování oblouku a díky zvýšené emisi elektronů také stabilitu hoření oblouku.

Ochranné plyny zabezpečují ochranu elektrody, svarové lázně a jeho okolí proti vlivům okolního vzduchu, zejména proti oxidaci a naplynění. Zároveň vytvářejí příznivé podmínky pro zapálení oblouku a jeho stabilní hoření, přenos tepla do svaru i jeho tvarování.

Argon, bezbarvý, jednoatomový plyn, bez chuti a zápachu, který je inertní a nevytváří s žádným prvkem chemické sloučeniny. Vyrábí se destilací zkapalněného vzduchu. Dnes vyráběná a běžně dostupná čistota plynu je 99,995%. Ochranu argonem lze použít pro všechny svařitelné materiály a jeho použití je nejběžnější i s cenových důvodů.

Helium, je jednoatomový inertní plyn, bez barvy a zápachu. Vyrábí se separací některých druhů zemního plynu. Je to velmi lehký plyn s hustotou $0,178 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a právě tato skutečnost snižuje jeho efektivitu plynové ochrany. Proto pro dokonalou ochranu svaru je zapotřebí vyššího průtoku plynu. [2]

4.4 Svařování metodou MIG\MAG

Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranně aktivního plynu MAG, patří vedle svařování obalenou elektrodou celosvětově k nejrozšířenějším metodám svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Svařování tavící se elektrodou v ochraně inertního plynu MIG získává na důležitosti díky růstu objemu hliníkových konstrukcí. Svařování těmito metodami je založeno na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře. Napájení drátu elektrickým proudem je zajištěno pomocí třetího kontaktu v ústí hořáku tak, aby elektricky zatížená délka drátu bylo co možná nejmenší. Drát je podáván podávacími kladkami z cívky o běžné hmotnosti 15 kg. Charakter přenosu kovu obloukem závisí na parametrech svařování a ochranném plynu, zkratový přenos je běžný pro tenké plechy a sprchový je vhodný pro větší tloušťky plechů. U vyšších proudů se mění charakter přenosu kovu a vlivem elektromagnetických sil se dosahuje rotujícího oblouku. Jako ochranných plynů se používá CO_2 , argon, kyslík nebo helium a jejich kombinace $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ a $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$.

Hlavním úkolem plynů je zamezit přístupu vzduchu do oblasti svařování. Především chránit elektrodu, oblouk i tavnou lázeň a kořen svaru před účinky vzdušného kyslíku, který způsobuje oxidaci, naplynění, pórovitost a propal prvků. Ochranné plyny mají také nezanedbatelný vliv na přenos kovu, přenos tepelné energie, hloubku závaru, rychlost svařování a další.

CO_2 je nehořlavý, nejedovatý a bezbarvý plyn, je těžší než vzduch a hranice udušení pro člověka je přibližně 15% CO_2 ve vzduchu. Vysoká hustota plynu příznivě ovlivňuje funkci plynové ochrany, má vysokou tepelnou vodivost s vysokým přenosem tepla do svarové lázně. Toto zajišťuje velmi dobré natavení svarových hran, hluboký závar a dobré odplynění svarové lázně. Při svařování se používá CO_2 s minimální čistotou 99,5%, zbytek tvoří nečistoty a vlhkost, která ovšem nesmí přesáhnout 0,04%.

Kyslík O_2 nehořlavý plyn, ovšem hoření podporuje. Je těžší než vzduch a vyrábí se destilací zkapalněného vzduchu stejně jako argon a dusík. Používá se ve směsích a výrazně zvyšuje tekutost svarové lázně a povrchové napětí roztaveného kovu, což je jeho hlavní důvod přidávání do ochranných plynů. Působením kyslíku se zlepšuje odplynění svarové lázně, profil svarové housenky a přechod svarového kovu do základního materiálu. [2] [4]

4.5 Svařování polymerů

Vedle kovových materiálů mají své nezastupitelné místo i plasty. Plasty patří mezi nejvýznamnější nekovové materiály. V porovnání s kovy mají nízkou měrnou hmotnost, za normálních teplot vysokou měrnou pevnost, nepotřebují žádnou povrchovou úpravu, jsou korozně odolné, mají nízkou teplotní a elektrickou vodivost, tlumí kmity a vibrace, mají dobré kluzné vlastnosti atd. Nejčastěji se svařují plasty u kterých je problematická výroba z jednoho kusu nebo výroba není možná vůbec. Ke svařování plastů dochází obvykle ve formě polotovarů (folie, desky, profily) a méně už ve formě vstřikovaných součástek. Uplatnění se nachází například v obalové technice při svařování folií, ve spojování trubek a velkorozměrových rour, v chemickém a potravinářském průmyslu (nádrže, vany, žlaby).

Z materiálového hlediska lze svařovat pouze termoplasty, přičemž i vzájemná svařitelnost mezi jednotlivými druhy termoplastů je omezena. Z chemického hlediska struktura plastů vyžaduje pečlivé dodržování technologických parametrů svařovacího procesu, aby nedocházelo k degradaci materiálu a tím ke znehodnocení svarového spoje.

Svařování je pochod, při kterém vzniká nerozebíratelný spoj dvou nebo více prvků za úplného nebo částečného zániknutí povrchového rozhraní. Spoj se vytvoří při styku teplem aktivovaných povrchů za pomoci tlaku a případném použití přídavného materiálu nebo i bez něj. Proto je svařování podmíněno schopností materiálu přejít do tekutého stavu.

Teplu potřebné k ohřátí spojovaných povrchů může být předáno buď přímo nosiči tepla např. kontaktem s ohřátým povrchem (kontaktní svařování), horkým plynem či přídavným materiálem nebo přeměnou jiných druhů energie na teplo (svařování třením, ultrazvukem), elektrickou energií nebo zářením. Z široké škály polymerních materiálů lze svařovat pouze termoplasty, reaktoplasty a elastomery svařovat nelze. [2]

Přímé svařování horkým tělesem (kontaktní svařování) – svařované díly se ohřívají v místě budoucího sváru přímým dotykem s vytápěným tělesem a po natavení povrchu se při vyvození tlaku mezi oběma díly vytvoří svarový spoj. Pevnost svarového spoje dosahuje 90 až 95% pevnosti základního materiálu. Podmínkou však je dokonalá příprava povrchu, který musí být rovný, čistý a rovnoběžný. Svařovací tělesa se nejčastěji vyhřívají elektricky a mohou mít tvar desky nebo šablony přizpůsobené tvaru svařovaných dílců. Na povrchu jsou opatřeny teflonovou vrstvou PTFE, aby se zabránilo nalepování svařovaných

dílců na těleso. Mezi metody, které využívají tuto technologii patří svařování natupo, profilové, polyfúzní, ohraňováním, horkým klínem nebo elektrotvarovkou.

Nepřímé svařování horkým tělesem – horké těleso působí ze strany protilehlé ke svařované ploše, svařovací teplo musí projít celou tloušťkou jednoho případně obou svařovacích materiálů. Rozdělení teplot je nevýhodné a v místě svaru není dosažena nejvyšší teplota. Proto se těmito postupy nedají svařovat silné materiály. Do metod využívající tuto technologii patří svařování tepelným impulsem a svařování tepelně kontaktní.

Svařování horkým plynem – při svařování horkým plynem se spojované plochy a vnější zóny přídavného materiálu přivedou horkým plynem do plastického stavu a vzájemně se pod tlakem spojí. Postup je výhodný pro tlusté materiály. Při svařování plastů se používá obdobných svarů jako u kovů. U dílů do tloušťky 5mm se používá V svar a při větších tloušťkách X svar. Do metod využívající tuto technologii patří svařování ruční horkým plynem, svařování horkým plynem s rychlodýzou, svařování horkým plynem překlátovací a svařování horkým plynem extruzní.

Svařování pohybem – do této technologie patří zejména dvě metody, svařování třením a svařování ultrazvukem. Při **svařování třením** se k ohřevu spojovaných dílů využívá přeměny mechanické energie na energii tepelnou třením svařovaných povrchů. Intenzita uvolňování tepla je dána třecím výkonem, který je určen přitlačnou silou, koeficientem tření a vzájemnou rychlostí třecích ploch.

Při **svařování ultrazvukem** se styčné plochy spojovaných dílů ohřívají a natavují teplem, která vzniká přeměnou mechanické energie kmitavého pohybu, jehož zdrojem je ultrazvukový generátor.

Svařování elektrickým proudem – *vysokofrekvenční svařování* je založeno na ohřevu plastu teplem vznikajícím uvnitř materiálu v důsledku dielektrických ztrát, k nimž dochází při průchodu elektrického proudu o vysoké frekvenci svařovaným materiálem.

Cílem teoretické části této práce bylo popsat podstatu vzniku elektrického oblouku, popsat jednotlivé technologie svařování a jejich vhodnost použití pro určité materiály v závislosti na použití různých ochranných plynů a v neposlední řadě popsat vady a způsoby jejich odhalování, které vznikají ve svarech.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části této diplomové práce je zvolit takové podmínky pro svařování, které v daných možnostech firmy zajistí co možná nejefektivnější a nejrychlejší svaření daných konstrukčních prvků, ovšem za podmínky, že veškeré svary budou splňovat veškeré náležitosti a nebudou obsahovat jakékoli nepřijatelné vady. Jedná se zejména o výrobu obytných kontejnerů, které se v mnoha případech stohují na sebe a ze kterých se montují velké komplexy, jako jsou například mateřské školky, a v takovém případě je bezpečnost a správně provedený svar na prvním místě. Protože tupé svary a tloušťka plechů 8mm a 4mm tvoří převážnou část svařované konstrukce, bude tento experiment zaměřen právě na ně.

5 VOLBA A ROZMĚRY MATERIÁLŮ

5.1 Volba materiálu vzorků

Kovové vzorky tloušťky 8mm byly vyhotoveny z materiálu S235JRC+N, dle ČSN odpovídá tento materiál, materiálu 11 373. Jedná se o konstrukční uhlíkovou ocel, vhodnou pro svařování. Označení S235 označuje, že se jedná o válcovanou ocel vhodnou pro ocelové konstrukce, se zaručenou mezí kluzu 235 MPa, JR značí nárazovou práci 27J při teplotě 20°C, označení C značí vhodnost pro tváření za studena a N materiál je normalizačně žíháný. Dle atestu EN 10204-3.1 bylo zjištěno toto chemické složení a mechanické vlastnosti.

- Pevnost v tahu R_m – 416 MPa rozmezí (min/max - 360/510)
- Horní mez kluzu ReH – 275 MPa rozmezí (min/max - 235/)
- Prodloužení A_5 – 38,5% rozmezí (min/max - 24/)

- C - 0,15 %
- Si - 0,009 %
- Al - 0,037 %
- S - 0,005 %
- Cu - 0,02 %
- Mo - 0,002 %
- V - 0,003 %
- Mn - 0,52 %
- P - 0,01 %
- N - 0,005 %
- Cr - 0,015 %
- Ni - 0,01 %
- CEV - 0,245 %

Kovové vzorky tloušťky 4mm byly vyhotoveny z materiálu S235JR+AR, dle ČSN odpovídá tento materiál, materiálu 11 373. Jedná se o konstrukční uhlíkovou ocel, vhodnou pro svařování. Označení S235 označuje, že se jedná o válcovanou ocel vhodnou pro ocelové konstrukce, se zaručenou mezí kluzu 235 MPa, JR značí nárazovou práci 27J při teplotě 20°C. Dle atestu EN 10204-3.1 bylo zjištěno toto chemické složení a mechanické vlastnosti.

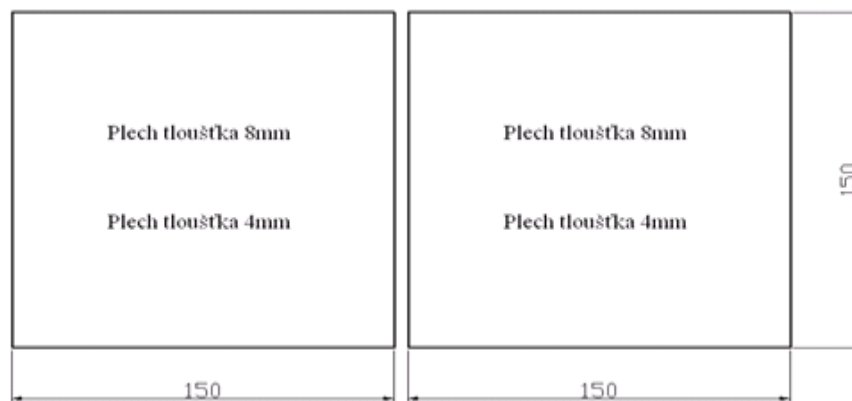
- Pevnost v tahu R_m – 424 MPa rozmezí (min/max - 360/510)
 - Horní mez kluzu ReH – 280 MPa rozmezí (min/max - 235/)
 - Prodloužení A_5 – 35,3% rozmezí (min/max - 24/)
-
- C - 0,12 %
 - Si - 0,006 %
 - Al - 0,045 %
 - S - 0,009 %
 - Cu - 0,04 %
 - Mo - 0,015 %
 - V - 0,001 %
 - Mn - 0,39 %
 - P - 0,013 %
 - N - 0,0055 %
 - Cr - 0,03 %
 - Ni - 0,02 %
 - CEV - 0,1982 %

Polypropylen

Plastové vzorky tloušťky 4 mm byly zhotoveny z polypropylenu. Polypropylen je částečně krystalický, nepolární materiál, patřící do skupiny polyolefinů. Stupeň krystalinity výrazně ovlivňuje vlastnosti tohoto materiálu. Se zvyšující se krystalinitou roste modul pružnosti v tahu, mez kluzu a pevnost v ohybu, chemická odolnost, ovšem klesá rázová houževnatost. Teplota skleného přechodu, pro čistý polypropylen, je 0°C, teplota tání je kolem 170°C. Je vysoce chemicky odolný, má dobré elektroizolační vlastnosti, vysoká teplotní i tvarová stálost, vysoká povrchová tvrdost. K nevýhodám patří nízká otěruvzdornost, odolnost vůči oxidaci a špatná lepitelnou. PP nelze vysokofrekvenčně svařovat.

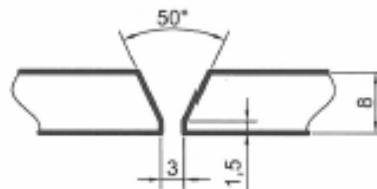
5.2 Příprava vzorků a svarových ploch

Vzorky tloušťky 4 a 8mm, byly vypáleny s přídavkem na plazmovém pálicím stroji, poté očištěny, zbaveny nežádoucích otřepů a následně zarovnány frézováním na požadovaný rozměr 150x150mm.



Obr. 14 Výkres vzorků pro svařování

Pro svaření kovových zkušebních dílů tloušťky 8mm, bylo nutné nejprve svarové plochy připravit do požadovaného tvaru, který předepisuje norma ČSN EN ISO 9692-1. Na samotnou přípravu svarových ploch byla použita technologie frézování dle výkresu obr.15. Zkušební kovové i plastové díly tloušťky 4mm nebyly nijak upraveny, protože zde byl proveden tupý svar tvaru I a tudíž nebylo třeba svarové plochy opracovávat.



Obr. 16 Úprava svarové plochy pro vzorek 8mm



Obr. 15 Úprava svarové plochy pro vzorek 4mm

Rozměry v mm



Ref. č.	Tloušťka materiálu t	Název svaru	Značka (podle ISO 2553)	Řez	Rozměry				Doporučená metoda svařování (číslo podle ISO 4063)	Zobrazení svaru	Poznámky
					Úhel ^a α, β	Mezera ^b b	Otupení c	Výška úkosu h			
1.2.3	≤ 100	I – svar s podložkou			—	—	—	—	51		—
1.2.4		I – svar se středním osazením			—	—	—	—	—		—
1.3	$3 < t \leq 10$	V – svar	V		$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	≤ 4	—	—	3 111 13 141		Kde je to vhodné použít podložku
	$8 < t \leq 12$				$6^\circ \leq \alpha \leq 8^\circ$	—	≤ 2	—	52 ^d		
1.4	> 16	V – svar se strmým úkosem	V		$5^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$5 \leq b \leq 15$	—	—	111 13		S podložkou

ČSN EN ISO 9692-1

Tab. 3 Úprava svařových ploch dle normy ČSN EN ISO 9692-1

5.3 Svařovací drát

Jako přídatný materiál byl použit svařovací drát $\varnothing 1\text{mm}$, OK ARISTOROD 12.50 od firmy ESAB. Jedná se o lesklý nepoměděný svařovací drát určený pro svařování nelegovaných konstrukčních ocelí s pevností v tahu do 530 MPa, např. pro výrobu ocelových konstrukcí, tlakových nádob apod. Je vhodný i pro svařování jemnozrných ocelí s mezí kluzu nad 420 MPa.

DIN EN ISO 9001:2008
Zertifikat: 01 100 3079

ATEST ČSN EN 10204 - 2.2
TEST REPORT

Odběratel
Customer:

Obj. č./Your order No: _____ Zakáz. č./Our ref.: _____

Číslo výrobku Item no	Název výrobku Description	Množství Quantity	Jedn. Unit	LOT
	OK ARISTOROD 12.50	1.0	1008	kg PV139033138B

Chemické složení/Chemical composition (%)

Drát Wire	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
	0,081	1,44	0,86	0,014	0,011	0,03	0,03
	Mo	V	Cu	Al	Fe	Zr+Ti	
	0,005	0,002	0,04	0,002	zbytek	0,006	

Zkouška tahem/Tensile test

Svarový kov Weld metal	Temp °C	Rp 0.2 N/mm 2	Re H N/mm 2	Rm N/mm 2	A5 %
	+20		470	560	26

Zkouška rázem/Impact test

Svarový kov Weld metal	Temp °C	J	Temp °C	J
	+20	130	-40	60
	-20	90		
	-30	70		

Doplňující data/Additional data

Classifications Weld Metal: EN ISO 14341-A: G 42 4 M21 3Si1; EN ISO 14341-A: G 38 2 C1 3Si1
 Classifications Wire Elektrode: EN ISO 14341-A: G 3Si1; SFA/AWS A5.18: ER70S-6; CSA W48: ER49S-B

Tab. 4 Atest svařovacího drátu ČSN EN 10204-2.2

5.4 Ochranný svařovací plyn

Jako ochranný plyn byl použit Ferromaxx 7 od firmy Air Product. Ferromaxx 7 je trojsložkový plyn, směs 90,5% Ar, 7% CO₂ a 2,5% O₂, speciálně určený pro svařování uhlíkových ocelí a ocelí s galvanicky upraveným povrchem. Poskytuje stabilní oblouk, zejména

při nízkých napětích, při svařování tenkých a středně silných materiálech (do 10mm) a zajišťuje velmi malý rozstřík svarového kovu.

5.5 Svářecí poloautomat

Klasický svářecí poloautomat pro sváření v ochranné atmosféře MIG-MAG, Omicron OMI 385 s konstrukcí svařovacích poloautomatů OMI zaručuje vysokou spolehlivost zdroje, výborné svařovací vlastnosti v široké oblasti použití. Při použití vhodné ochranné atmosféry lze svářet všechny druhy nízkolegovaných a vysocelegovaných ocelí. Měděné vinutí trafo a výkonné chlazení umožňuje užití svařovacích poloautomatů pro dlouhodobé nasazení. Výbava OMI 385 umožňuje elektronicky nastavit délku bodu, hodnoty sváření dlou-



hými pulzy, předfuk, dofuk, dohoření, výlet či přepnout stroj do režimu čtyřtakt. Svářecí

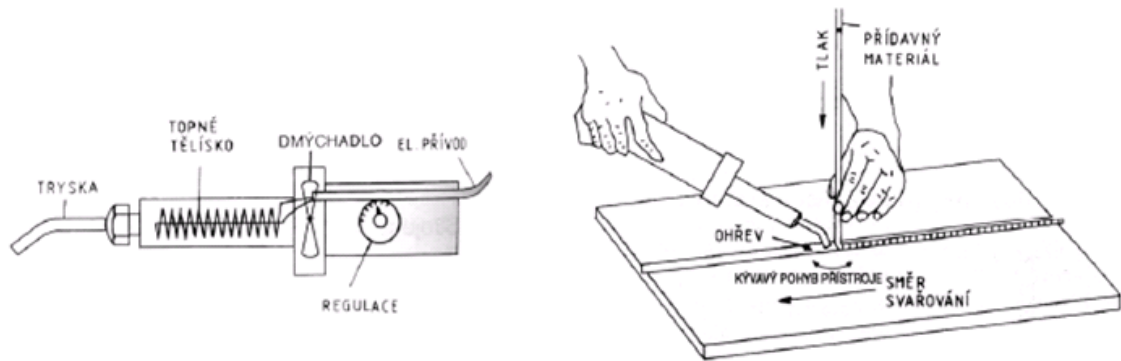
zdroj je navíc vybaven zpětnovazebním regulátorem, voltmetrem a ampérmetrem, který zaznamenává poslední údaje o sváření a všechny tyto funkce jsou řízeny mikroprocesorem. Eurokoncovkou je možné připojení hořáků 3,4,5 m. Proudový rozsah 25- 350A, rychlost posuvu drátu 5-20 m/min.

Obr. 17 Svářecí poloautomat OMI 385

5.5.1 Svařování horkým plynem a přídavným materiálem

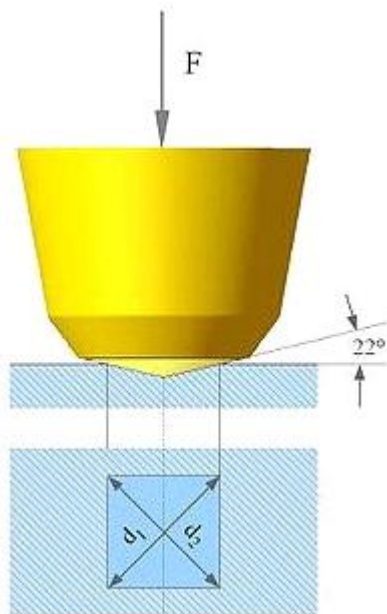
Plastové vzorky byly spojeny metodou ručního svařování horkým plynem. Při tomto způsobu se nejprve spojované plochy a vnější zony přídavného materiálu přivedou horkými plyny, zpravidla horkým vzduchem, do plastického stavu a pak se pod tlakem vzájemně spojí. Zahřívání základního a přídavného materiálu probíhá ručně, kývavým pohybem svařovacího přístroje vedeného ve směru svařování. Plastifikovaný přídavný materiál je ručně zatlačován do plastifikovaného základního materiálu. Přístroj byl vybaven elektronickou regulací s digitálním ukazatelem teploty svařovacího plynu. Před

samotným svařováním se provedla kontrola materiálu, svařovacího zařízení. Příprava ploch proběhla řezáním a poté se povrch očistil a odmastil. Spojovací plochy musí být čisté, bez stop olejů a tuků, bez vrubů, bez ulpěných třísek a ostaních rušivých povrchových vrstev. Teplota horkého vzduchu při svařování polypropylenových vzorků byla 220°C, průtok plynu 60 litrů za sekundu a rychlost svařování 10 cm za minutu.



Obr. 18 Schéma svařování horkým plynem

5.6 Měření tvrdosti ve svarech

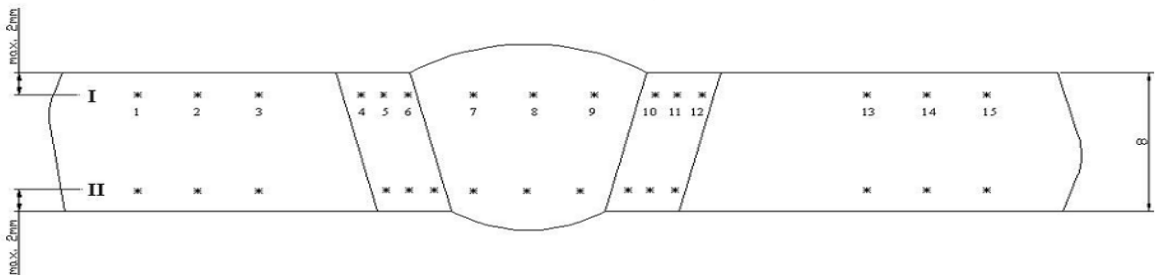


Obr. 19 Schéma měření tvrdosti

Tvrdot je odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Zkouška tvrdosti dle Vickerse patří mezi zkoušky statické. Princip spočívá ve vnikání zkušební tělesa do zkoumaného materiálu a následně se zjišťuje míra deformace. Jako vnikací těleso se používá diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° a měřítkem tvrdosti jsou délky dvou úhlopříček vtisknutého jehlanu. Zkouška je značně universální a lze ji použít jak pro materiály měkké tak i tvrdé. Další výhodou je též že výsledná hodnota tvrdosti nezávisí na zatěžovací síle, jelikož vtisky jsou pro různé síly geometricky přibližně stejné. Zkoušení tvrdosti dle Vickerse HV 10 musí být provedeno dle EN 1043-1. Měření tvrdosti musí být provedeno ve svarovém kovu, v tepelně ovlivněné oblasti a v základním materiálu a to v počtu minimálně 3 vtisků v každé z uvedených oblastí, aby se vyhodnotil

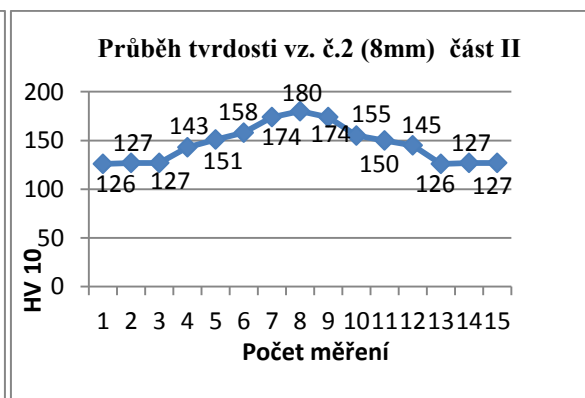
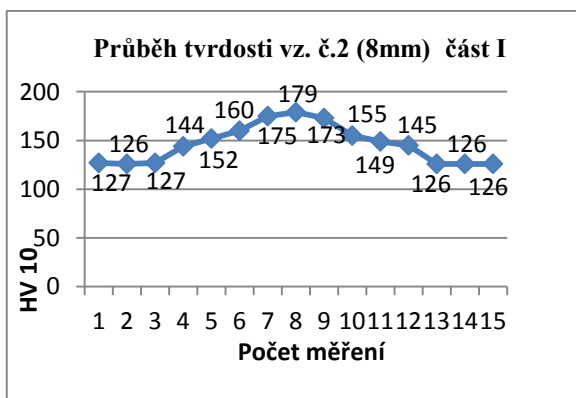
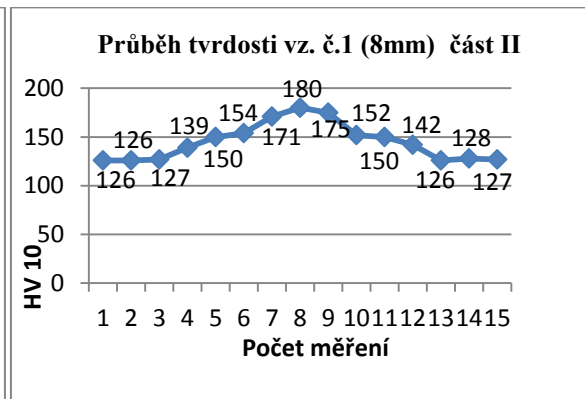
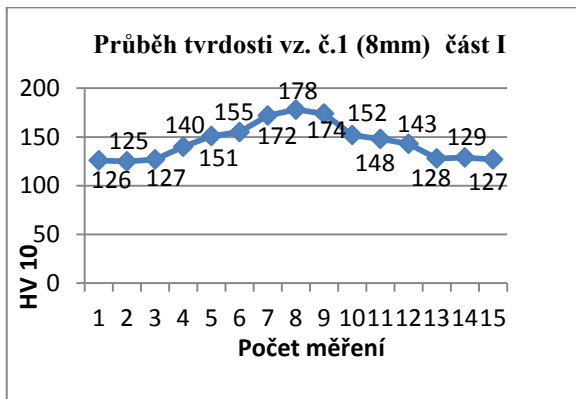
průběh tvrdosti napříč celým svarovým spojem. Pro materiály tloušťky 5mm a menší, musí být provedena zkouška pouze v jedné řadě a maximálně 2mm pod horním okrajem. U materiálů o větší tloušťce než 5mm musí být provedeny zkoušky dvě, které budou maximálně 2mm pod horním a 2mm nad spodním okrajem svařovaného spoje. Měření proběhlo na laboratorním stroji Easydur Integral 2E.

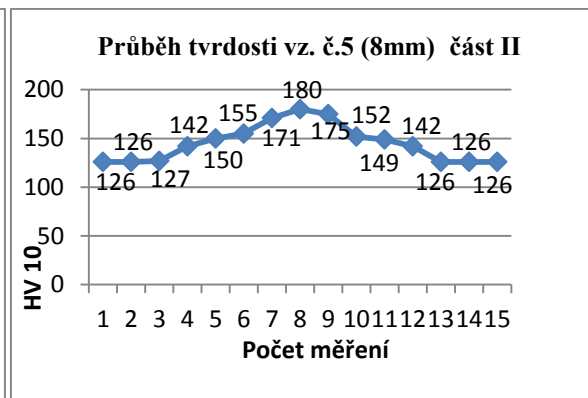
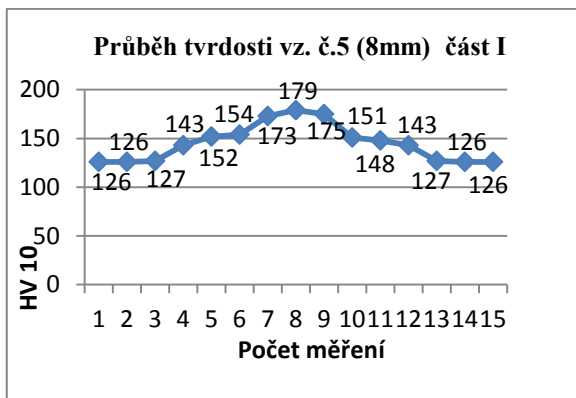
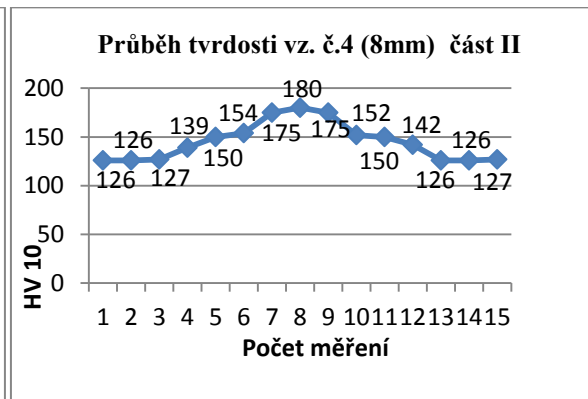
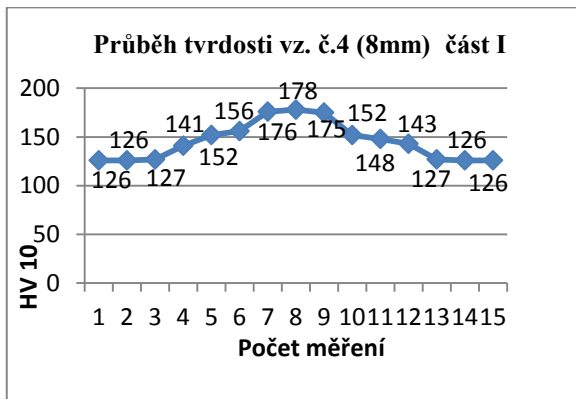
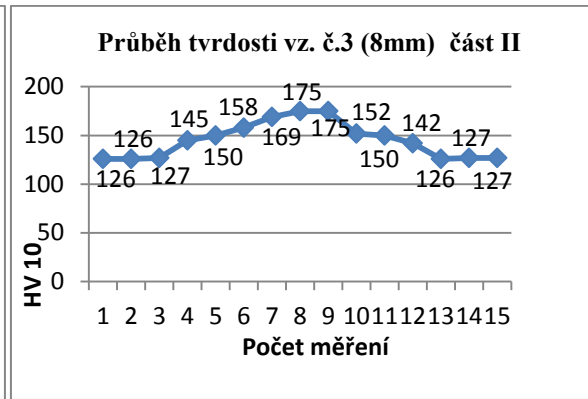
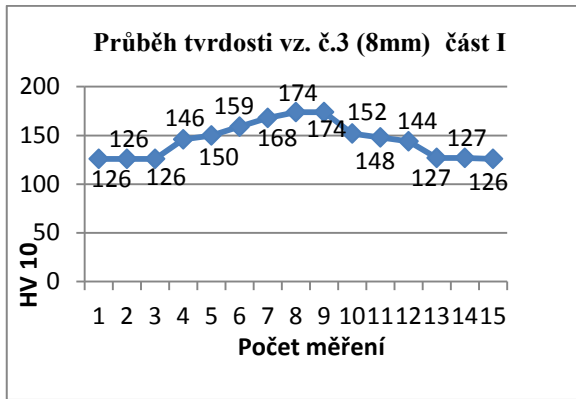
Naměřené hodnoty průběhu tvrdosti HV 10 pro vzorky tloušťky 8mm



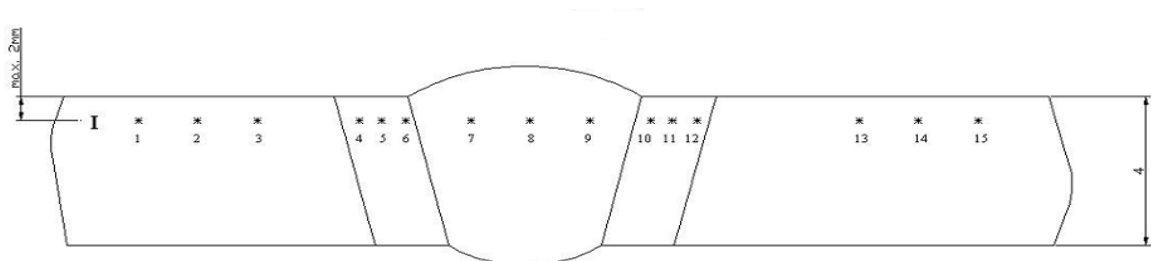
Obr. 20 Schéma měření tvrdosti na vzorku tloušťky 8mm

Naměřené hodnoty tvrdosti (8mm)



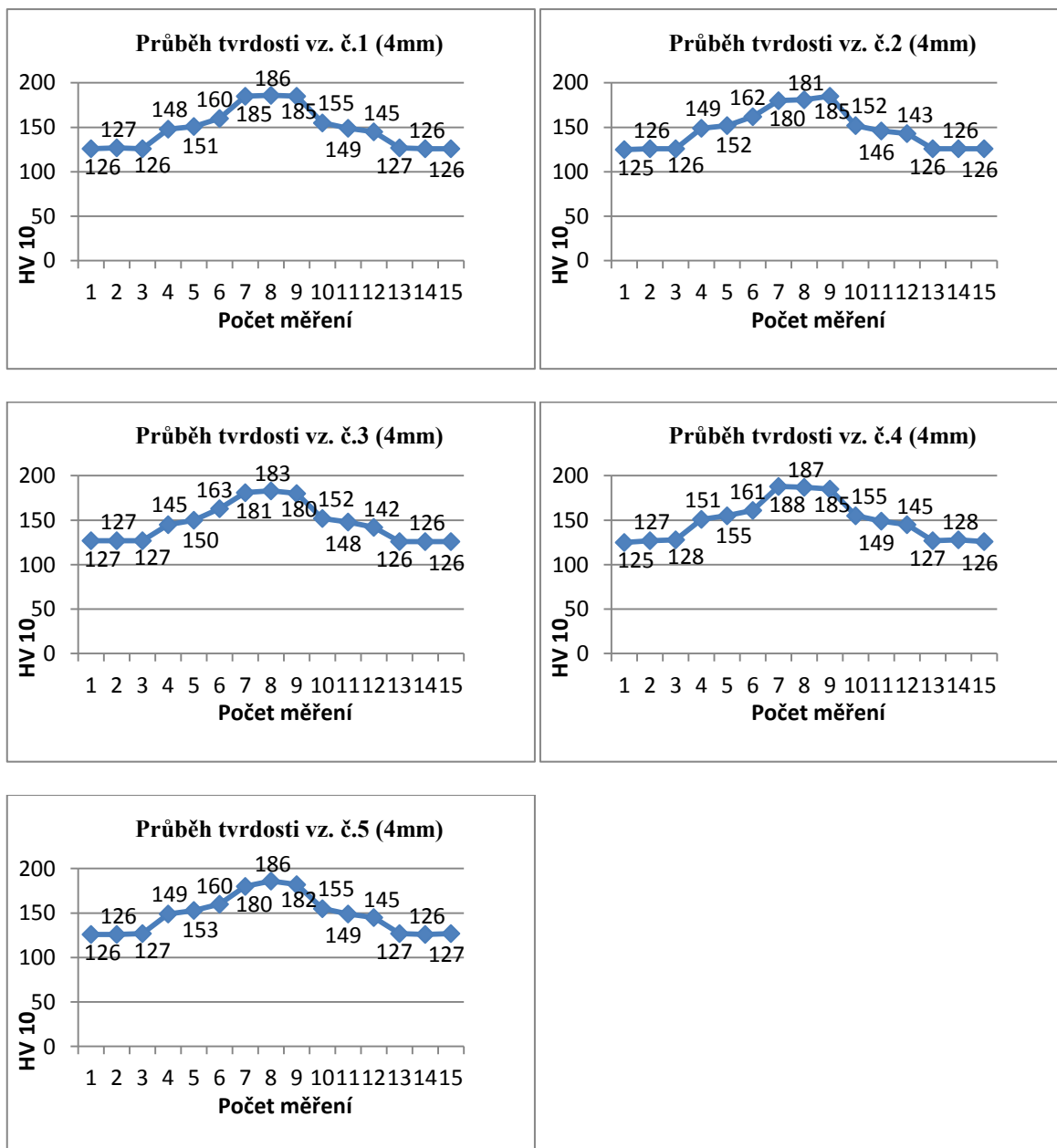


Naměřené hodnoty průběhu tvrdosti HV 10 pro vzorky tloušťky 4mm

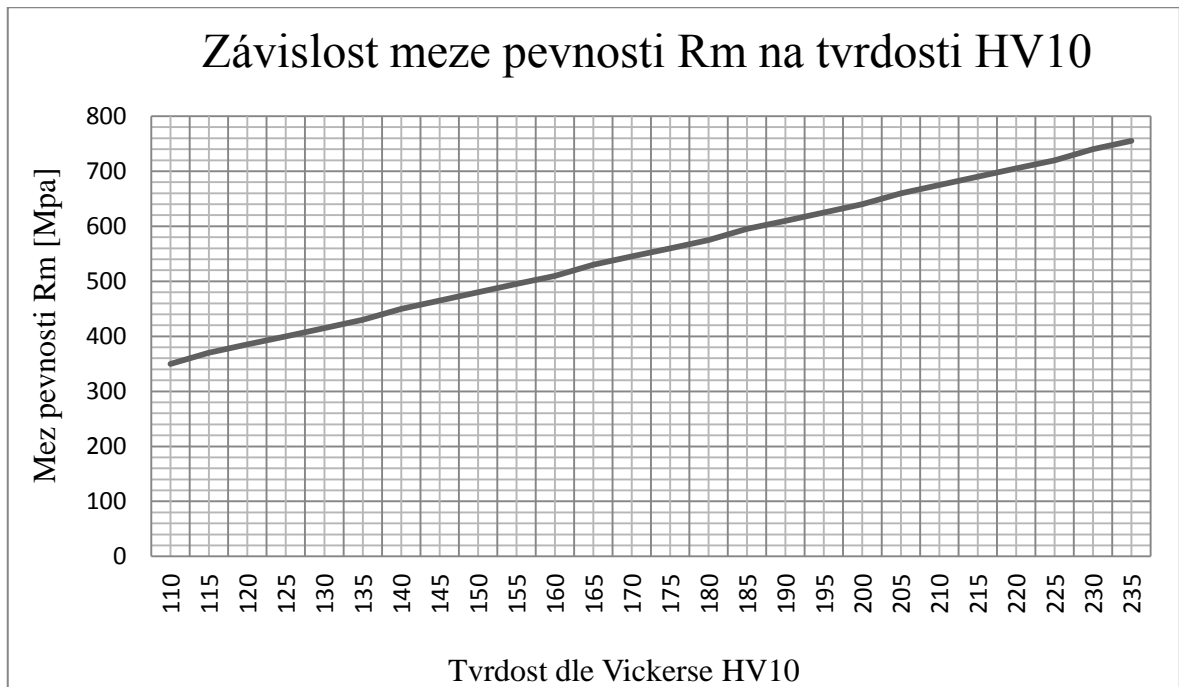


Obr. 21 Schéma měření tvrdosti na vzorku tloušťky 8mm

Naměřené hodnoty tvrdosti (4mm)



Norma 15614-1 předepisuje maximální přípustnou hodnotu tvrdosti 380 (HV10), pro tepelně nezpracovaný materiál a skupinu ocelí 1. Ani v jednom případě nebyla naměřená hodnota vyšší a tudíž je svar po stránce tvrdosti vyhovující. Různé naměřené hodnoty závisí zejména na homogenitě materiálu a dále pak na různém promísení základního materiálu se svarovým kovem.



Tab. 5 Závislost pevnosti a tvrdosti

5.7 Vnesené teplo do svaru

Při svařování dochází krátkodobě k intenzivnímu místnímu ohřevu materiálu na velmi vysokou teplotu. Pomocí vneseného tepla se nataví malý objem materiálu a důsledkem tepelné vodivosti se ohřeje i okolní oblast základního materiálu. Rychlost změn teplot, které se při svařování vyskytují v okolí svaru způsobují to, že jak ve svarovém, tak i základním materiálu probíhají složité metalurgické procesy. Pomocí transformačních diagramů lze určit výslednou strukturu materiálu po svařování. Problém nastává ovšem v případě, kdy pro daný materiál neexistuje tento diagram. Proto se pro některé materiály určuje přípustné množství přivedené energie za dodržení předepsané svařovací rychlosti a tento postup poté zajistí výslednou požadovanou strukturu.

5.7.1 Vzorky tloušťka 8 mm

Vzorky tloušťky 8mm byly svařeny na dvě vrstvy. První vrstvou bylo svaření kořene a druhá vrstva byla krycí. Při svařování kořene byly svařovací hodnoty u všech vzorků tloušťky 8mm nastaveny na stejné parametry, aby se experiment přiblížil co nejvíce reálné situaci. U krycí vrstvy byly nastaveny pro každý vzorek odlišné hodnoty svařování.

5.7.1.1 Vnesené teplo a hodnoty svařování pro kořenovou vrstvu



Obr. 22 Zaznačení kořenové vrstvy (8mm)

Číslo vzorku	1/1	1/2	2/1	2/2	3/1	3/2	4/1	4/2	5/1	5/2
Metoda svařování	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Svařovací proud I [A]	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
Svařovací napětí U [V]	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9
Ø přidav. drátu [mm]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Svař. délka l [mm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Čas svařování t [s]	88	89	90	90	89	90	88	89	90	89
Rychl. svař. v [mm/s]	1,704	1,685	1,666	1,666	1,685	1,666	1,704	1,685	1,666	1,685
Účinnost procesu η [%]	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Vnes. teplo $Q_{koř.}$ [kJ/mm]	1,040	1,051	1,064	1,064	1,051	1,064	1,040	1,051	1,064	1,051

Tab. 6 Hodnoty pro svařování kořene a vnesené teplo (8mm)

Technologie svařování	Účinnost procesu - η	
	Rozsah	Doporučená hodnota
11- Obloukové svařování tavící se elektrodou	0,75	0,75
111- Ruční obloukové svař. obalenou elektrodou	0,66 – 0,85	0,8
121- Svař. elektrickým obloukem pod tavidlem drátovou elektrodou	0,9-0,99	0,95
135- MAG	0,75-0,93	0,85
136- Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8	0,8
137- Obloukové svařování elektrodou plněnou kovovým práškem v aktivním plynu	0,8	0,8
141- WIG	0,55-0,8	0,6

Tab. 7 Účinnost procesu u vybraných technologií svařování

Rychlost svařování kořene

$$v_{kořen_{1/1}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{88} = 1,704 \text{ mm/s}$$

$$v_{kořen_{1/2}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{89} = 1,685 \text{ mm/s}$$

$$v_{kořen_{2/1}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{90} = 1,666 \text{ mm/s}$$

$$v_{kořen_{2/2}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{90} = 1,666 \text{ mm/s}$$

$$v_{kořen_{3/1}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{89} = 1,685 \text{ mm/s}$$

$$v_{kořen_{3/2}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{90} = 1,666 \text{ mm/s}$$

$$v_{kořen_{4/1}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{88} = 1,704 \text{ mm/s}$$

$$v_{kořen_{4/2}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{89} = 1,685 \text{ mm/s}$$

$$v_{kořen_{5/1}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{90} = 1,666 \text{ mm/s}$$

$$v_{kořen_{5/2}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{89} = 1,685 \text{ mm/s}$$

Vnesené teplo do svaru - kořenová vrstva

$$Q_{kořen_{1/1}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{1/1}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 140}{1000 \cdot 1,704} \cdot 0,85 = 1,040 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{kořen_{1/2}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{1/2}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 140}{1000 \cdot 1,685} \cdot 0,85 = 1,051 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{kořen_{2/1}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{2/1}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 140}{1000 \cdot 1,666} \cdot 0,85 = 1,064 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{kořen_{2/2}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{2/2}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 140}{1000 \cdot 1,666} \cdot 0,85 = 1,064 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{kořen_{3/1}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{3/1}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 140}{1000 \cdot 1,685} \cdot 0,85 = 1,051 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{kořen_{3/2}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{3/2}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 140}{1000 \cdot 1,666} \cdot 0,85 = 1,064 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{kořen_{4/1}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{4/1}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 140}{1000 \cdot 1,704} \cdot 0,85 = 1,040 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{kořen_{4/2}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{4/2}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 140}{1000 \cdot 1,685} \cdot 0,85 = 1,051 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{kořen_{5/1}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{5/1}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 140}{1000 \cdot 1,666} \cdot 0,85 = 1,064 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{kořen_{5/2}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{5/2}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 140}{1000 \cdot 1,685} \cdot 0,85 = 1,051 \text{ kJ/mm}$$

5.7.1.2 Vnesené teplo a hodnoty svařování pro krycí vrstvu



Obr. 23 Zaznačení krycí vrstvy (8mm)

Číslo vzorku	1/1	1/2	2/1	2/2	3/1	3/2	4/1	4/2	5/1	5/2
Metoda svařování	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Svařovací proud I [A]	150	150	210	210	240	240	270	270	305	305
Svařovací napětí U [V]	15,3	15,3	17,2	17,2	19,3	19,3	24	24	27,8	27,8
Ø přídav. drátu [mm]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Svař. délka l [mm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Čas svařování t [s]	105	105	77	79	59	60	40	40	31	30
Rychl. svař. v [mm/s]	1,428	1,428	1,948	1,898	2,542	2,5	3,75	3,75	4,838	5
Účinnost procesu η [%]	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Vnes. teplo Q_{kr} [kJ/mm]	1,366	1,366	1,575	1,617	1,548	1,574	1,468	1,468	1,489	1,441

Tab. 8 Hodnoty pro svařování krycí vrstvy a vnesené teplo (8mm)

Rychlost svařování krycí vrstvy

$$v_{krycí_{1/1}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{105} = 1,428 \text{ mm/s}$$

$$v_{krycí_{1/2}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{105} = 1,428 \text{ mm/s}$$

$$v_{krycí_{2/1}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{77} = 1,948 \text{ mm/s}$$

$$v_{krycí_{2/2}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{79} = 1,898 \text{ mm/s}$$

$$v_{krycí_{3/1}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{59} = 2,542 \text{ mm/s}$$

$$v_{krycí_{3/2}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{60} = 2,500 \text{ mm/s}$$

$$v_{krycí_{4/1}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{40} = 3,750 \text{ mm/s}$$

$$v_{krycí_{4/2}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{40} = 3,750 \text{ mm/s}$$

$$v_{krycí_{5/1}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{31} = 4,838 \text{ mm/s}$$

$$v_{krycí_{5/2}} = \frac{l}{t} = \frac{150}{30} = 5,000 \text{ mm/s}$$

Vnesené teplo do svaru - krycí vrstva

$$Q_{krycí_{1/1}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{1/1}} \cdot \eta = \frac{15,3 \cdot 150}{1000 \cdot 1,428} \cdot 0,85 = 1,366 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{krycí_{1/2}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{1/2}} \cdot \eta = \frac{15,3 \cdot 150}{1000 \cdot 1,428} \cdot 0,85 = 1,366 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{krycí_{2/1}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{2/1}} \cdot \eta = \frac{17,2 \cdot 210}{1000 \cdot 1,948} \cdot 0,85 = 1,575 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{krycí_{2/2}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{2/2}} \cdot \eta = \frac{17,2 \cdot 210}{1000 \cdot 1,898} \cdot 0,85 = 1,617 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{krycí_{3/1}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{3/1}} \cdot \eta = \frac{19,3 \cdot 240}{1000 \cdot 2,542} \cdot 0,85 = 1,548 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{krycí_{3/2}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{3/2}} \cdot \eta = \frac{19,3 \cdot 240}{1000 \cdot 2,500} \cdot 0,85 = 1,574 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{krycí_{4/1}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{4/1}} \cdot \eta = \frac{24 \cdot 270}{1000 \cdot 3,750} \cdot 0,85 = 1,468 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{krycí_{4/2}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{4/2}} \cdot \eta = \frac{24 \cdot 270}{1000 \cdot 3,750} \cdot 0,85 = 1,468 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{krycí_{5/1}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{5/1}} \cdot \eta = \frac{27,8 \cdot 305}{1000 \cdot 4,838} \cdot 0,85 = 1,489 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{krycí_{5/2}} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{5/2}} \cdot \eta = \frac{27,8 \cdot 305}{1000 \cdot 5,000} \cdot 0,85 = 1,441 \text{ kJ/mm}$$

5.7.1.3 Celkové vnesené teplo do jednotlivých vzorků (8mm)

$$Q_{\text{celkové}} = Q_{\text{kořen}} + Q_{\text{krycí}}$$

Číslo vzorku	1/1	1/2	2/1	2/2	3/1	3/2	4/1	4/2	5/1	5/2
Vnes. teplo $Q_{\text{koř.}}$ [kJ/mm]	1,040	1,051	1,064	1,064	1,051	1,064	1,040	1,051	1,064	1,051
Vnes. teplo $Q_{\text{kr.}}$ [kJ/mm]	1,366	1,366	1,575	1,617	1,548	1,574	1,468	1,468	1,489	1,441
Vnes. teplo $Q_{\text{cel.}}$ [kJ/mm]	2,406	2,417	2,639	2,681	2,599	2,638	2,508	2,519	2,553	2,492

Tab. 9 Celkové vnesené teplo (8mm)

5.7.2 Vzorky tloušťka 4 mm

Vzorky tloušťky 4mm byly svařeny tupým svarem tvaru I a bylo použito pouze jedné svařovací vrstvy. Hodnoty svařování pro jednotlivé vzorky byly nastaveny odlišně.

5.7.2.1 Vnesené teplo a hodnoty svařování



Obr. 24 Zaznačení tupého svaru (4mm)

Číslo vzorku	1/1	1/2	2/1	2/2	3/1	3/2	4/1	4/2	5/1	5/2
Metoda svařování	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Svařovací proud I [A]	135	135	160	160	180	180	210	210	230	230
Svařovací napětí U [V]	14,9	14,9	15,9	15,9	16,2	16,2	17,5	17,5	18,5	18,5
Ø přídav. drátu [mm]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Svař. délka l [mm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Čas svařování t [s]	90	90	62	62	55	55	51	51	45	45
Rychl. svař. v [mm/s]	1,666	1,666	2,419	2,419	2,727	2,727	2,941	2,941	3,333	3,333
Účinnost procesu η [%]	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Vnes. teplo $Q_{\text{cel.}}$ [kJ/mm]	1,026	1,026	0,893	0,893	0,908	0,908	1,062	1,062	1,085	1,085

Tab. 10 Hodnoty svařování a vnesené teplo (4mm)

Rychlost svařování

$$v_{1/1} = \frac{l}{t} = \frac{150}{90} = 1,666 \text{ mm/s} \quad v_{1/2} = \frac{l}{t} = \frac{150}{90} = 1,666 \text{ mm/s}$$

$$v_{2/1} = \frac{l}{t} = \frac{150}{62} = 2,419 \text{ mm/s} \quad v_{2/2} = \frac{l}{t} = \frac{150}{62} = 2,419 \text{ mm/s}$$

$$v_{3/1} = \frac{l}{t} = \frac{150}{55} = 2,727 \text{ mm/s} \quad v_{3/2} = \frac{l}{t} = \frac{150}{55} = 2,727 \text{ mm/s}$$

$$v_{4/1} = \frac{l}{t} = \frac{150}{51} = 2,941 \text{ mm/s} \quad v_{4/2} = \frac{l}{t} = \frac{150}{51} = 2,941 \text{ mm/s}$$

$$v_{5/1} = \frac{l}{t} = \frac{150}{45} = 3,333 \text{ mm/s} \quad v_{5/2} = \frac{l}{t} = \frac{150}{45} = 3,333 \text{ mm/s}$$

Vnesené teplo do svaru

$$Q_{1/1} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{1/1}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 135}{1000 \cdot 1,666} \cdot 0,85 = 1,026 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{1/2} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{1/2}} \cdot \eta = \frac{14,9 \cdot 135}{1000 \cdot 1,666} \cdot 0,85 = 1,026 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{2/1} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{2/1}} \cdot \eta = \frac{15,9 \cdot 160}{1000 \cdot 2,419} \cdot 0,85 = 0,893 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{2/2} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{2/2}} \cdot \eta = \frac{15,9 \cdot 160}{1000 \cdot 2,419} \cdot 0,85 = 0,893 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{3/1} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{3/1}} \cdot \eta = \frac{16,2 \cdot 180}{1000 \cdot 2,727} \cdot 0,85 = 0,908 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{3/2} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{3/2}} \cdot \eta = \frac{16,2 \cdot 180}{1000 \cdot 2,727} \cdot 0,85 = 0,908 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{4/1} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{4/1}} \cdot \eta = \frac{17,5 \cdot 210}{1000 \cdot 2,941} \cdot 0,85 = 1,062 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{4/2} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{4/2}} \cdot \eta = \frac{17,5 \cdot 210}{1000 \cdot 2,941} \cdot 0,85 = 1,062 \text{ kJ/mm}$$

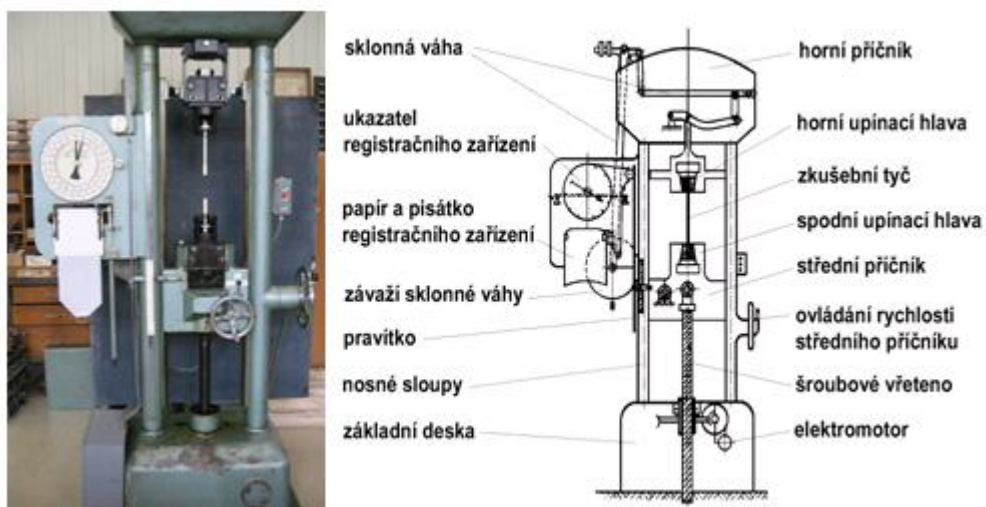
$$Q_{5/1} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{5/1}} \cdot \eta = \frac{18,5 \cdot 230}{1000 \cdot 3,333} \cdot 0,85 = 1,085 \text{ kJ/mm}$$

$$Q_{5/2} = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_{5/2}} \cdot \eta = \frac{18,5 \cdot 230}{1000 \cdot 3,333} \cdot 0,85 = 1,085 \text{ kJ/mm}$$

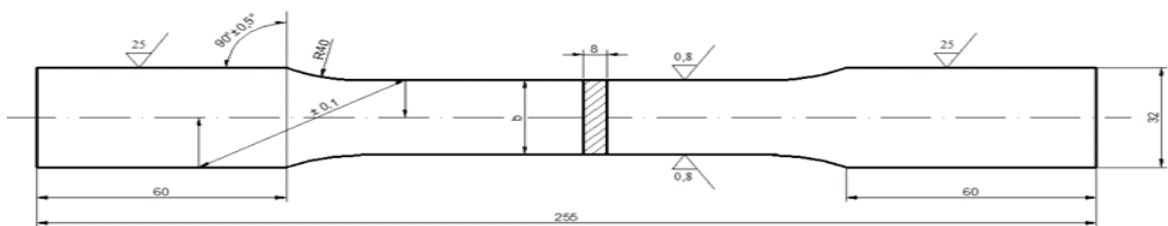
Z naměřených a vypočítaných hodnot vneseného tepla vyplývá, že když byly hodnoty svařovacích parametrů nastaveny pro každý vzorek odlišně, tak výsledné vnesené teplo se prakticky mění jen minimálně, což je způsobeno rozdílnou svařovací rychlostí, tudíž i výsledná struktura po svaření bude u všech pozorovaných vzorků stejná.

5.8 Tahová zkouška kovových vzorků

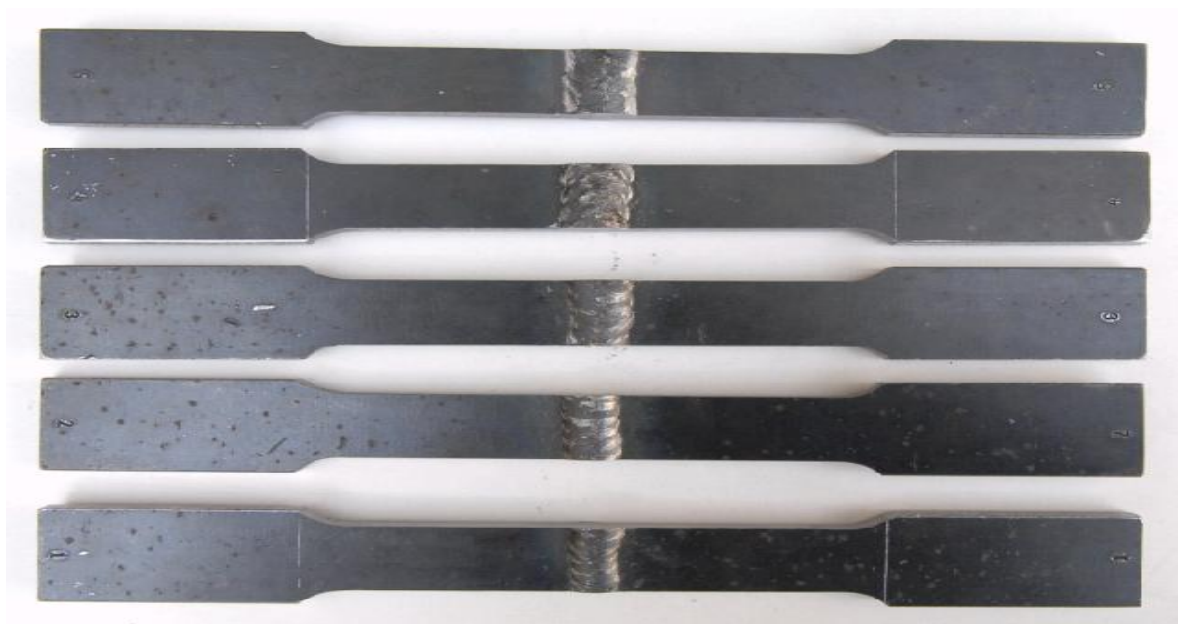
Představuje základní zkoušku jednoosým tahem, která slouží k zhodnocení mechanických vlastností materiálu. Princip zkoušky spočívá v deformaci zkušební tyče za předem definovaných podmínek uvedených v normě ČSN EN 10002 – 1. Dochází k natahování tyče od nulového zatížení až k zatížení kdy nastává přerušování zkoušené tyče. Celý záznam zatížení versus prodloužení je zaznamenáván a výstup představuje tzv. tahový diagram. Vzorky pro tahovou zkoušku byly připraveny dle normy a celá zkouška byla provedena na trhacím stroji ZDM 10/91, u kterého je maximální možné zatížení 100 kN.



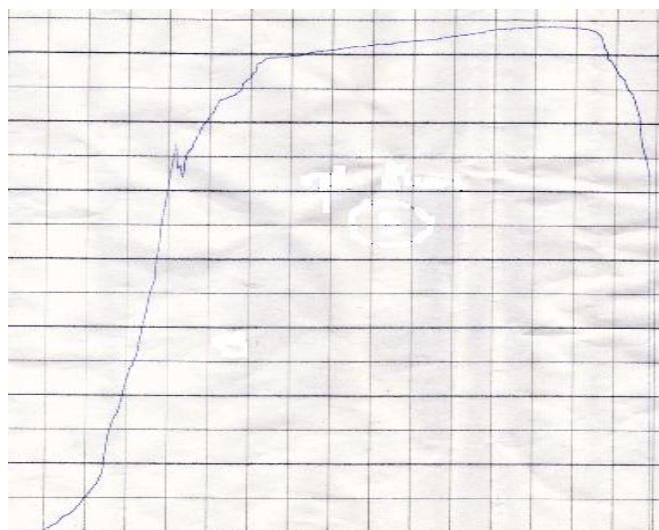
Obr. 25 Trhací stroj ZDM 10/91



Obr. 26 Výkres vzorku 8mm

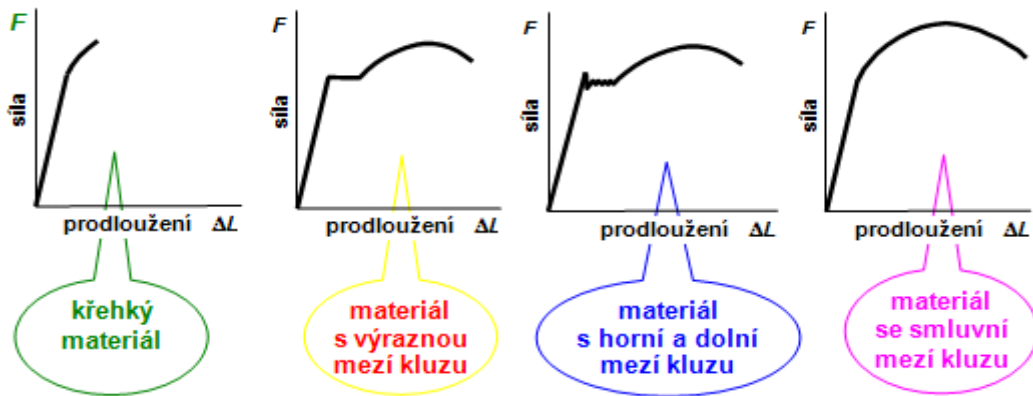


Obr. 27 Foto vzorků 8mm

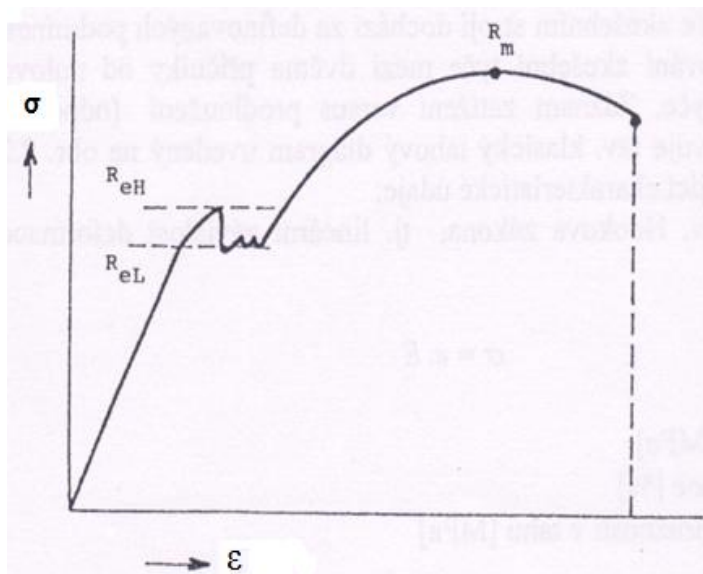


Obr. 28 Záznam výstupu z trhacího stroje

Dle druhu materiálu se mění i tvar tahového diagramu. Na obrázku jsou vyobrazeny některé případy, které mohou nastat.



Obr. 29 Příklady tahových diagramů



R_m – Mez pevnosti v tahu [MPa]

R_{eH} – Horní mez kluzu [MPa]

R_{eL} – Dolní mez kluzu [MPa]

σ – napětí [MPa]

ε – prodloužení, deformace [MPa]

Obr. 30 Tahový diagram

5.8.1 Výsledky měření vzorků tloušťky 8mm

Číslo vzorku	1/1	1/2	2/1	2/2	3/1	3/2	4/1	4/2	5/1	5/2
Tloušťka plechu t [mm]	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98
Šířka plechu b [mm]	21,94	21,92	22,13	22,10	22,17	22,16	22,16	22,16	22,2	22,19
Plocha průřezu S [mm ²]	175,08	174,92	176,59	176,35	176,91	176,83	176,83	176,83	177,15	177,07
Max. zatěžující síla F [kN]	72,5	72,45	73,3	73,27	73,2	73,2	73,1	73,13	74,05	74,02
Horní mez kluzu R_{eH} [MPa]	318	318	310	312	315	315	310	310	315	315
Mez pevnosti R_m [MPa]	414	414	415	415	413	413	413	413	418	418

Tab. 11 Mechanické vlastnosti a rozměry vzorků (8mm)

Hodnoty (t) a (b) byly změřeny digitálním mikrometrem Mitutoyo

Hodnoty meze kluzu byly změřeny a přepočítány přímo z výstupu z trhacího stroje

Výpočet hodnoty (S) plocha průřezu

$$S_{1/1} = t_{1/1} * b_{1/1} = 7,98 * 21,94 = \underline{175,08\text{mm}^2} \quad S_{1/2} = t_{1/2} * b_{1/2} = 7,98 * 21,92 = \underline{174,92\text{mm}^2}$$

$$S_{2/1} = t_{2/1} * b_{2/1} = 7,98 * 22,13 = \underline{176,59\text{mm}^2} \quad S_{2/2} = t_{2/2} * b_{2/2} = 7,98 * 22,10 = \underline{176,35\text{mm}^2}$$

$$S_{3/1} = t_{3/1} * b_{3/1} = 7,98 * 22,17 = \underline{176,91\text{mm}^2} \quad S_{3/2} = t_{3/2} * b_{3/2} = 7,98 * 22,16 = \underline{176,83\text{mm}^2}$$

$$S_{4/1} = t_{4/1} * b_{4/1} = 7,98 * 22,16 = \underline{176,83\text{mm}^2} \quad S_{4/2} = t_{4/2} * b_{4/2} = 7,98 * 22,16 = \underline{176,83\text{mm}^2}$$

$$S_{5/1} = t_{5/1} * b_{5/1} = 7,98 * 22,20 = \underline{177,15\text{mm}^2} \quad S_{5/2} = t_{5/2} * b_{5/2} = 7,98 * 22,19 = \underline{177,07\text{mm}^2}$$

Výpočet meze pevnosti R_m

$$R_{m1/1} = \frac{F_{1/1}}{S_{1/1}} = \frac{72500}{175,08} = 414 \text{ MPa}$$

$$R_{m1/2} = \frac{F_{1/2}}{S_{1/2}} = \frac{72450}{174,92} = 414 \text{ MPa}$$

$$R_{m2/1} = \frac{F_{2/1}}{S_{2/1}} = \frac{73300}{176,59} = 415 \text{ MPa}$$

$$R_{m2/2} = \frac{F_{2/2}}{S_{2/2}} = \frac{73270}{176,35} = 415 \text{ MPa}$$

$$R_{m3/1} = \frac{F_{3/1}}{S_{3/1}} = \frac{73200}{176,91} = 413 \text{ MPa}$$

$$R_{m3/2} = \frac{F_{3/2}}{S_{3/2}} = \frac{73200}{176,83} = 413 \text{ MPa}$$

$$R_{m4/1} = \frac{F_{4/1}}{S_{4/1}} = \frac{73100}{176,83} = 413 \text{ MPa}$$

$$R_{m4/2} = \frac{F_{4/2}}{S_{4/2}} = \frac{73130}{176,83} = 413 \text{ MPa}$$

$$R_{m5/1} = \frac{F_{5/1}}{S_{5/1}} = \frac{74050}{177,15} = 418 \text{ MPa}$$

$$R_{m5/2} = \frac{F_{5/2}}{S_{5/2}} = \frac{74020}{177,07} = 418 \text{ MPa}$$

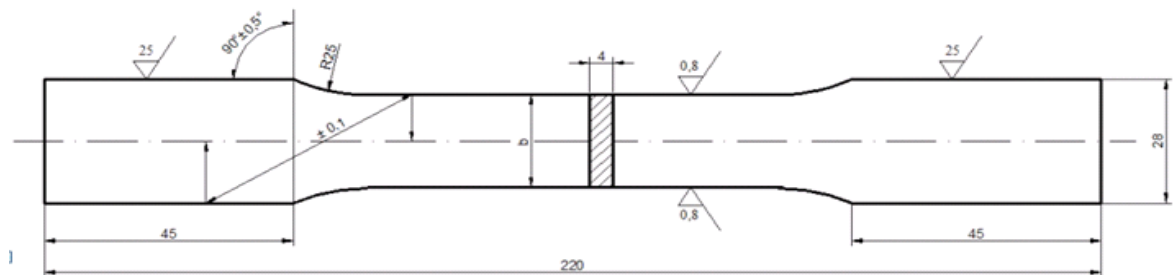


Obr. 31 Foto vzorků po roztržení (8mm)

5.8.2 Výsledky měření vzorků tloušťky 4mm

Číslo vzorku	1/1	1/2	2/1	2/2	3/1	3/2	4/1	4/2	5/1	5/2
Tloušťka plechu t [mm]	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Šířka plechu b [mm]	25,36	25,36	25,41	25,41	25,36	25,36	25,33	25,33	25,46	25,46
Plocha průřezu S [mm ²]	101,44	101,44	101,64	101,64	101,44	101,44	101,32	101,32	101,84	101,84
Max. zatěžující síla F [kN]	41,6	41,6	41,75	41,75	41,75	41,75	42	42	41,7	41,7
Horní mez kluzu R_{eH} [MPa]	310	310	312	312	318	318	315	315	312	312
Mez pevnosti R_m [MPa]	410	410	411	411	411	411	414	414	409	409

Tab. 12 Mechanické vlastnosti a rozměry vzorků (4mm)



Obr. 32 Výkres vzorku 4mm



Obr. 33 Foto vzorků 4mm

Hodnoty (t) a (b) byly změřeny digitálním mikrometrem Mitutoyo

Hodnoty meze kluzu byly změřeny a přepočítány přímo z výstupu z trhacího stroje

Výpočet hodnoty (S) plocha průřezu

$$S_{1/1} = t_{1/1} * b_{1/1} = 4 * 25,36 = \underline{101,44\text{mm}^2}$$

$$S_{1/2} = t_{1/2} * b_{1/2} = 4 * 25,36 = \underline{101,44\text{mm}^2}$$

$$S_{2/1} = t_{2/1} * b_{2/1} = 4 * 25,41 = \underline{101,64\text{mm}^2}$$

$$S_{2/2} = t_{2/2} * b_{2/2} = 4 * 25,41 = \underline{101,64\text{mm}^2}$$

$$S_{3/1} = t_{3/1} * b_{3/1} = 4 * 25,36 = \underline{101,44\text{mm}^2}$$

$$S_{3/2} = t_{3/2} * b_{3/2} = 4 * 25,36 = \underline{101,44\text{mm}^2}$$

$$S_{4/1} = t_{4/1} * b_{4/1} = 4 * 25,33 = \underline{101,32\text{mm}^2}$$

$$S_{4/2} = t_{4/2} * b_{4/2} = 4 * 25,33 = \underline{101,32\text{mm}^2}$$

$$S_{5/1} = t_{5/1} * b_{5/1} = 4 * 25,46 = \underline{101,84\text{mm}^2}$$

$$S_{5/2} = t_{5/2} * b_{5/2} = 4 * 25,46 = \underline{101,84\text{mm}^2}$$

Výpočet meze pevnosti R_m

$$R_{m1/1} = \frac{F_{1/1}}{S_{1/1}} = \frac{72500}{175,08} = 414 \text{ MPa}$$

$$R_{m1/2} = \frac{F_{1/2}}{S_{1/2}} = \frac{72450}{174,92} = 414 \text{ MPa}$$

$$R_{m2/1} = \frac{F_{2/1}}{S_{2/1}} = \frac{73300}{176,59} = 415 \text{ MPa}$$

$$R_{m2/2} = \frac{F_{2/2}}{S_{2/2}} = \frac{73270}{176,35} = 415 \text{ MPa}$$

$$R_{m3/1} = \frac{F_{3/1}}{S_{3/1}} = \frac{73200}{176,91} = 413 \text{ MPa}$$

$$R_{m3/2} = \frac{F_{3/2}}{S_{3/2}} = \frac{73200}{176,83} = 413 \text{ MPa}$$

$$R_{m4/1} = \frac{F_{4/1}}{S_{4/1}} = \frac{73100}{176,83} = 413 \text{ MPa}$$

$$R_{m4/2} = \frac{F_{4/2}}{S_{4/2}} = \frac{73130}{176,83} = 413 \text{ MPa}$$

$$R_{m5/1} = \frac{F_{5/1}}{S_{5/1}} = \frac{74050}{177,15} = 418 \text{ MPa}$$

$$R_{m5/2} = \frac{F_{5/2}}{S_{5/2}} = \frac{74020}{177,07} = 418 \text{ MPa}$$



Obr. 34 Foto vzorků po přetržení (4mm)

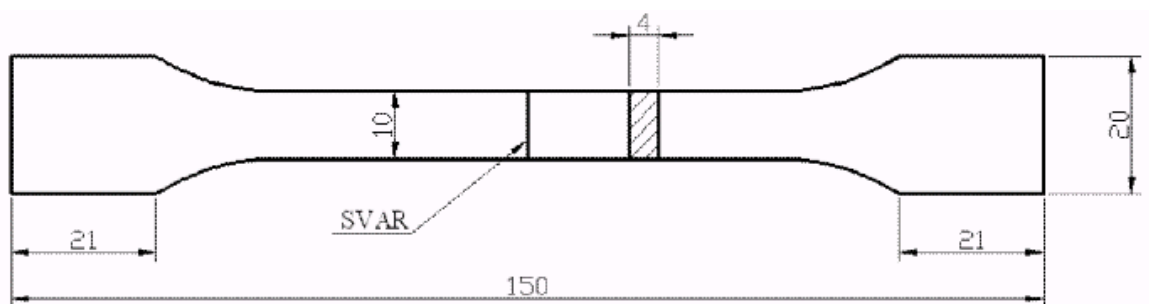
Všechny svary po tahové zkoušce vyhověly pevnostnímu zatížení. Ani jeden ze zkoušených vzorků neprasknul ve svaru, což je známka kvalitního spojení.

5.9 Tahová zkouška polymerních vzorků

Tahová zkouška polypropylenových vzorků proběhla na laboratorním přístroji Zwick Roell 1456, který je vybaven i teplotní komorou a proto rozsah teplot při kterých se mohou měření uskutečnit je -80°C až $+250^{\circ}\text{C}$. Na přístroji lze provádět zkoušky tahem, tlakem a ohybem. Po nastavení parametrů zkoušek, lze reálně sledovat průběh zkoušek a pro jejich výsledky je stroj vybaven počítačem se softwarem testXpert II.

<i>Maximální zkušební síla</i>	<i>20 kN</i>
<i>Maximální posuv příčnicku</i>	<i>800mm/min</i>
<i>Strojová výška</i>	<i>1285mm</i>
<i>Celková výška</i>	<i>2015mm</i>
<i>Celková šířka</i>	<i>630mm</i>
<i>Šířka pracovního prostoru</i>	<i>420mm</i>
<i>Hmotnost</i>	<i>150kg</i>
<i>Extenzometry na měření protažení</i>	<i>ano, přídavné</i>

Tab. 13 Technické parametry stroje Zwick Roell 1456



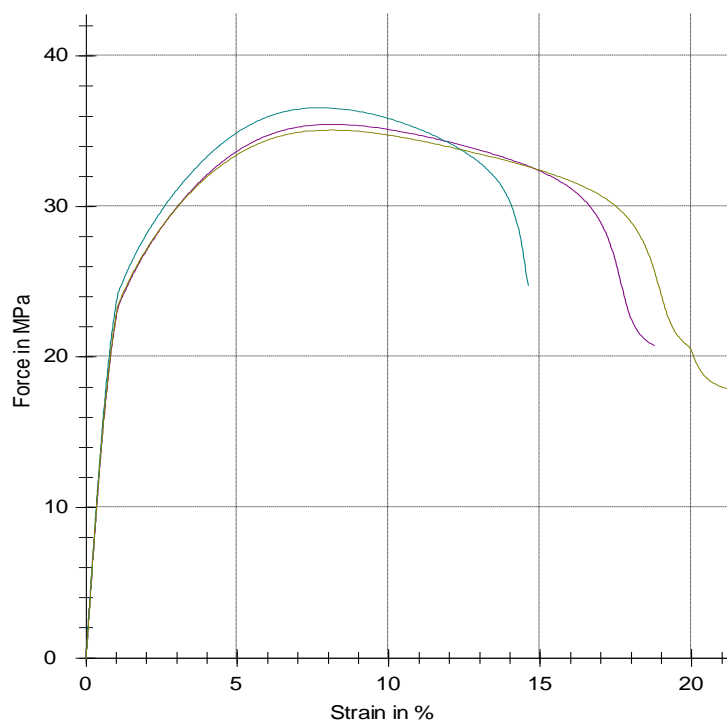
Obr. 35 Výkres vzorku



Obr. 36 Foto vzorku



Obr. 37 Foto vzorků po přetržení bez svaření

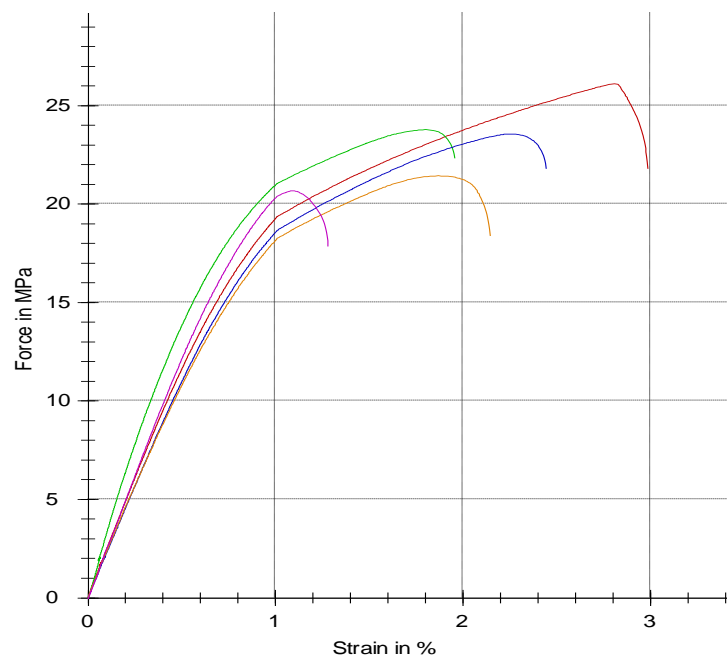


Obr. 38 Tahový diagram vzorků bez svaření

Při tahové zkoušce nesvařených polypropylenových vzorků dosahovala mez pevnosti materiálu hodnot od 34 až 36 MPa a modul pružnosti v tahu E dosahoval hodnot 1320 až 1390 MPa.



Obr. 39 Svařené vzorky po přetržení



Obr. 40 Tahový diagram vzorků po svaření

Při tahové zkoušce svařených polypropylenových vzorků dosahovala mez pevnosti materiálu hodnot od 21 až 27 MPa a modul pružnosti v tahu E dosahoval hodnot 1300 až 1390 MPa. Z naměřených hodnot vyplývá, že vzorky svařené touto technologií a za daných svařovacích podmínek, dosahovaly nižších pevnostních hodnot, než vzorky nesvařené. U sva-

rů, které jsou dimenzovány na určitou hodnotu pevnosti, je důležité, aby pevnostní hodnoty po zkouškách byly minimálně takové, jako u základního materiálu, jinak použití takových svarů je nepřipustné a ohrožuje samotnou konstrukci a bezpečnost. V našem případě toto zjištění není zase tolik závažné a svary i za těchto hodnot jsou přípustné, protože v konstrukci plní takovou funkci, u které se nevyžaduje žádné pevnostní ani únavové zatížení.

5.10 Makrostruktura

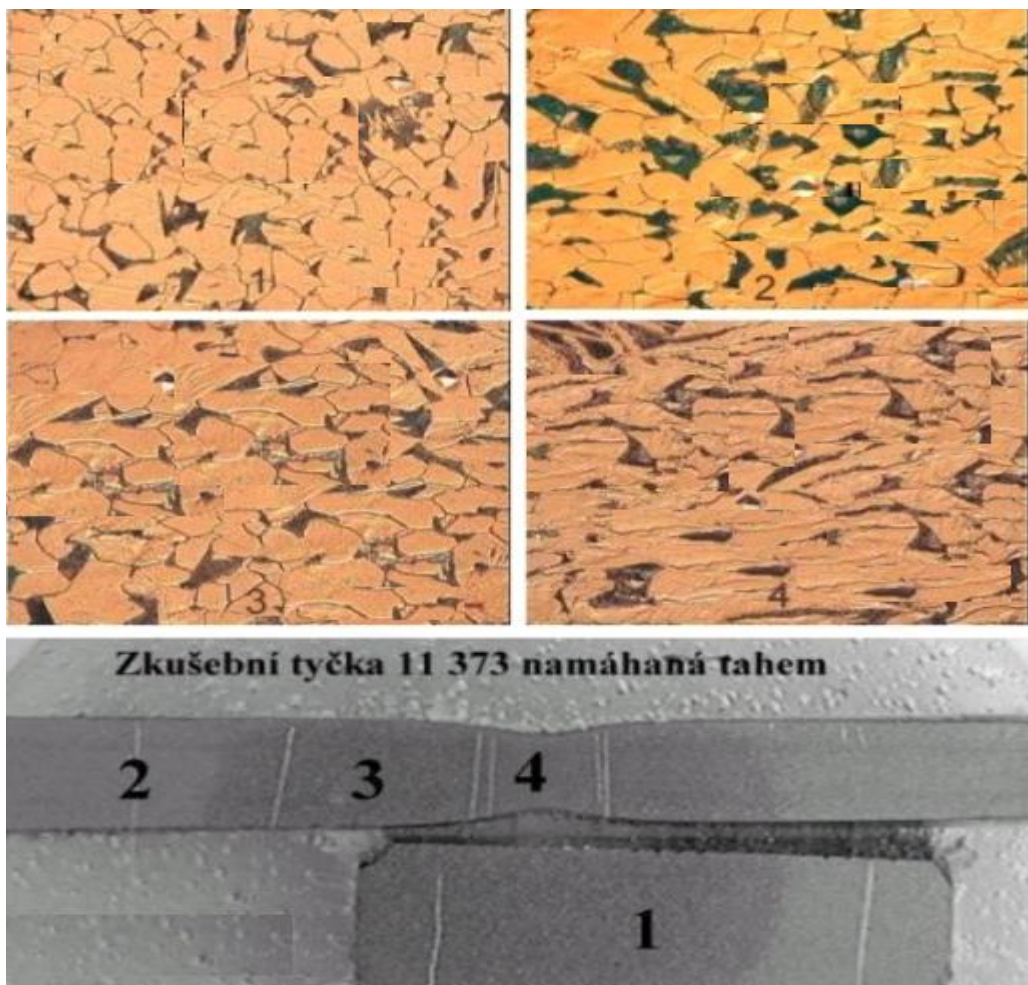
Cílem makroskopické kontroly je stanovit charakter svarového spoje pomocí příčného řezu zkušebního vzorku. Řez musí zahrnovat jak svarový kov tak tepelně ovlivněnou oblast po obou stranách svaru. Řezná plocha se vybrousí a poté vyleští. Takto připravená plocha se naleptá, osvítlí a pozoruje se. Makroskopická kontrola se provádí pouhým okem nebo při velmi malém zvětšení např. pod lupou. Většinou se takto kontrolují vady typu studený svar nebo vměstky, dále pak spojení jednotlivých svarových housenek a také velikost tepelně ovlivněné oblasti. Provedení makrostruktury se řídí normou ČSN EN 1321.



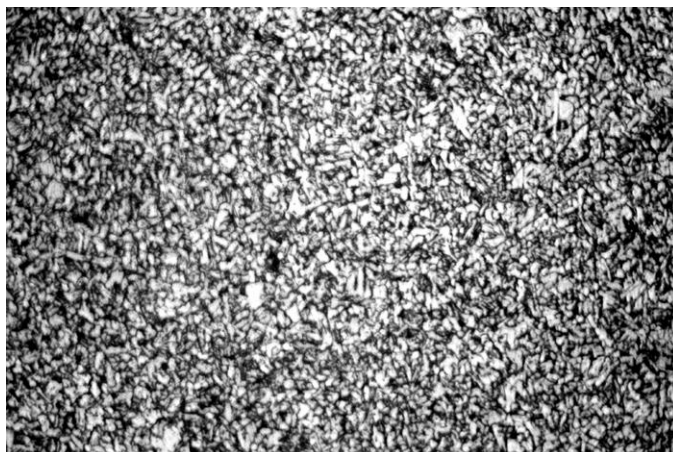
Obr. 41 Makrostruktura vzorku 8mm

5.11 Mikrostruktura

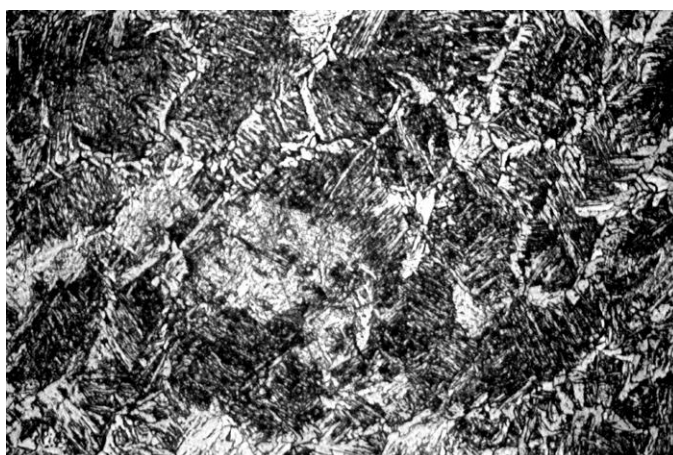
Mikroskopická kontrola se provádí výhradně pod mikroskopem s velkým zvětšením až (500x). Lze pozorovat jednotlivá zrna, hranice zrn, strukturní složky materiálu a tepelně ovlivněnou oblast. Nejprve se provede příčný řez zkušebního vzorku, který musí obsahovat jak svarový kov tak tepelně ovlivněnou oblast po obou stranách svaru. Poté se vzorek za-preparuje, tzn. zalije kapalinou, která ztuhne. Dále následuje broušení a jako dokončovací operace mechanické leštění, pak se vzorek naleptá, pro nízkolegované oceli je vhodný 2-5% nital, a na mikroskopu se pozoruje struktura materiálu. Pozorují se takto vady svarů jako jsou například trhliny, dutiny, vměstky, studené spoje. Provedení mikrostruktury se řídí normou ČSN EN 1321.



Obr. 42 Mikrostruktura materiálu v různých fázích tahové zkoušky



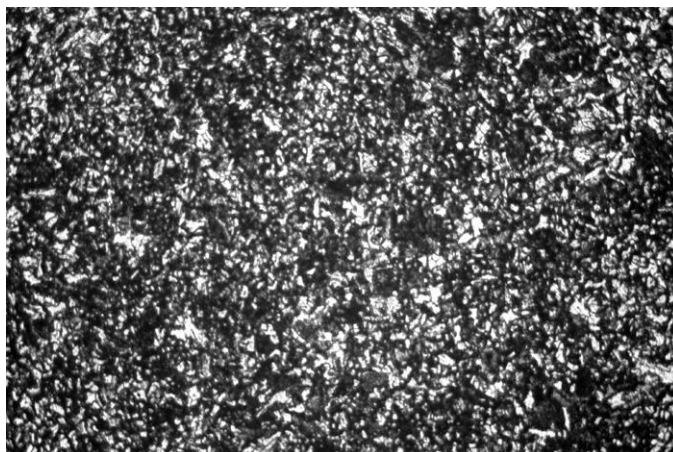
Obr. 43 Struktura základního materiálu (4mm)



Obr. 44 Struktura ve svarovém kovu (4mm)



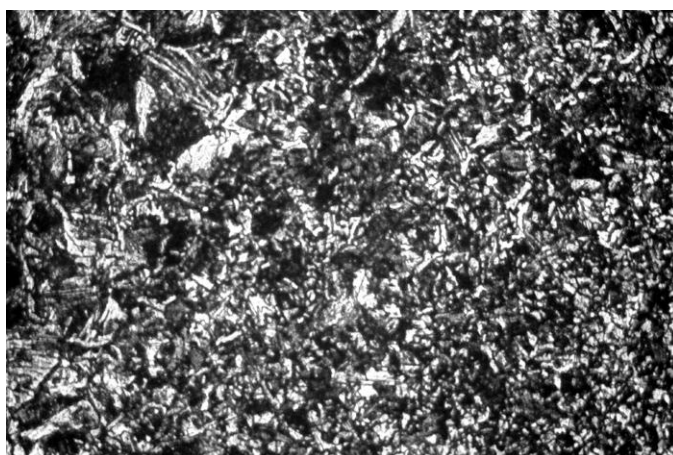
Obr. 45 Struktura v přechodové části (4mm)



Obr. 46 Struktura základního materiálu (8mm)



Obr. 47 Struktura ve svarovém kovu (8mm)



Obr. 48 Struktura v přechodové části (8mm)

5.12 Vyhodnocení vad ve svarech

Metoda zkoušení	Vizuální kontrola	Ultrazvuk	RTG zkouška prozářením	Magnetická zkouška
Vzorek č.				
1/1 (8mm)	✓	✓	✓	✓
1/2 (8mm)	✓	✓	✓	✓
2/1 (8mm)	✓	✓	✓	✓
2/2 (8mm)	✓	✓	✓	✓
3/1 (8mm)	Souvislý zápal	Pór	Pór	✓
3/2 (8mm)	✓	✓	✓	Trhlina
4/1 (8mm)	Studený spoj	Vměstek	Vměstek	✓
4/2 (8mm)	Studený spoj	✓	Vměstek	✓
5/1 (8mm)	Studený spoj	Póry	Póry	Trhlina
5/2 (8mm)	Neprovařený kořen	Póry	Póry	✓
1/1 (4mm)	Studený spoj	✓	✓	✓
1/2 (4mm)	Neprovařený kořen	✓	✓	✓
2/1 (4mm)	✓	✓	✓	✓
2/2 (4mm)	✓	✓	✓	✓
3/1 (4mm)	✓	✓	✓	✓
3/2 (4mm)	✓	✓	✓	✓
4/1 (4mm)	Přetečený kořen	✓	✓	Trhlina
4/2 (4mm)	Studený spoj	Póry	✓	Zápal
5/1 (4mm)	Přetečený kořen	✓	Póry	Zápal
5/2 (4mm)	Přetečený kořen	✓	Póry	✓

Tab. 14 Vyhodnocení vad ve svarech

Všechny svary označené jako dobré splňují veškeré náležitosti dané normou, u svarů kde je zaznamenána chyba je vada natolik velká, že překračuje přípustnou hodnotu danou normou.

Z výsledků experimentu vyplývá, že vysoké rychlosti svařování sice sníží čas potřebný pro vytvoření svarového spoje, ale zkoušky, ať už destruktivní nebo nedestruktivní, provedené na těchto vzorcích odhalily nepřijatelné vady, které se nesmí za žádných okolností ve svarech vyskytovat. Zjištěné vady snižují výrazně pevnost svaru popřípadě nastává vysoké

nebezpečí šíření trhlin materiálem a tudíž je velmi ohrožena bezpečnost celé konstrukce. Na mikrostrukturních snímcích (zvětšeno 100x) jsou patrné jednotlivé přechody ve svařovém kovu. U vzorku 4mm nebyly patrné žádné vady, ovšem u vzorku viz. obr. 47 je v některých místech patrná tzv. Widmanstättenova struktura, která vzniká je-li ocel více přehřátá a poměrně rychle zchlazena. Za těchto podmínek vznikají tzv. feritické šipky, které jsou poměrně dlouhé a taky četné, protínají celé zrna a tvoří charakteristický obrazec.

Widmanstättenova struktura je nežádoucí a většinou vede ke zkřehnutí oceli, což má za následek snížení vrubové houževnatosti. Tuto strukturu lze eliminovat normalizačním žíháním nebo se musí zajistit plynulé chládnutí po svařování.

Pro materiály tloušťky 8mm se jeví jako nejvhodnější, nejméně rizikové a velmi produktivní hodnoty proudu 140A; napětí 14,9V a rychlosti svařování 1,7mm/s pro svařování kořene a svařovací proud 210A; napětí 17,2V a rychlosti svařování 1,9mm/s pro svařování krycí vrstvy. Pro materiály tloušťky 4mm se jako optimální hodnoty pro svařování jeví hodnoty proudu 180A; napětí 16,2V a rychlost svařování 2,72mm/s. U polymerních materiálů, při použití technologie svařování horkým vzduchem, byla naměřena výstupní teplota plynu z hořáku 220°C, přídavný materiál se vtlačoval do svařovaných vzorků silou 6-10N a rychlost svařování se pohybovala okolo 10 cm/min.

ZÁVĚR

Cílem teoretické části této diplomové práce bylo popsat podstatu vzniku elektrického oblouku, dále pak popsat jednotlivé technologie svařování a jejich vhodnost použití pro určité materiály v závislosti na použití různých ochranných plynů, popsat vady a způsoby jejich odhalení, které vznikají ve svarech.

V praktické části byly navrženy konkrétní materiály, metody a hodnoty svařování a také byly provedeny zkoušky svarů s cílem zjistit nejvhodnější podmínky pro svařování, tak aby výsledný svar byl proveden co možná nejrychleji, ovšem za podmínky že bude splňovat veškeré náležitosti a nebude obsahovat žádné nepřijatelné vady. Dodržením těchto podmínek se zajistí nejen bezpečnost celé konstrukce, ale také se zajistí vysoká a spolehlivá produktivita celé výroby.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PILOUS Václav, *Materiály a jejich chování při svařování*,
Vydal: ŠKODA WELDING s.r.o. Tř. E. Beneše 27, 316 00 Plzeň, 2009
- [2] KUBÍČEK Jaroslav, DANĚK Ladislav, KANDUS Bohumil
Technologie svařování a zařízení, Počet stran 242,
Vydal: ŠKODA WELDING s.r.o. Tř. E. Beneše 27, 316 00 Plzeň, 2011
- [3] MENTL Václav, VLK Miloš, BARTÁK Jiří, ROTTER Tomáš,
Konstrukce a provedení, Počet stran 168,
Vydal: ŠKODA WELDING s.r.o. Tř. E. Beneše 27, 316 00 Plzeň, 2011
- [4] KOUKAL Jaroslav, HAJDÍK Jiří, *Materiály a jejich svařitelnost*, Ostrava, 2009, 1. vyd.
Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, VŠB, ISBN 978-80-248-2025-5
- [5] Kolektiv autorů, *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*
Ostrava 2002, Česká svářečská společnost ANB, ISBN 80-85771-97-7
- [6] Kolektiv autorů, *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*,
Ostrava 2000, Česká svářečská společnost ANB, ISBN 80-85771-72-1
- [7] ČABELKA J. a kol., *Mechanická technológia*, VSAV Bratislava, 1967
- [8] LUKOVICS Imrich, *Konstrukční materiály a technologie*,
NVUT Brno 1991, ISBN 80-214-0399-3
- [9] VASILKO K., *Téoria výrobných technológií*, TU Košice, FVT Prešov 2010,
ISBN 978-80-553-03367
- [10] KUČERA J., *Teorie svařování*, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1991. 408 s.
- [11] KUNCIPÁL J. a kol., *Nové technologie ve svařování*, Praha, SNTL, 1984. 292 s.
- [12] KOUKAL J., ZMYDLENÝ T., *Svařování I*, VŠB-Technická univerzita Ostrava,
2005, 136 s. ISBN 80-248-0870-6
- [13] HRIVŇÁK I., *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*, Bratislava: Veda, vydavateľství
Slovenskej akademie vied, 1989. 343 s. ISBN 80-224-0016-5
- [14] PILOUS Václav, *Konstruktér a tavné svařování ocelí*, Praha 1964
- [15] HUDEC Z., *Deformace a napětí při svařování*, Liberec: TU-Liberec 1998, 76 s.
ISBN 80-7083-313-0

- [16] Internet: www.csni.cz, Český normalizační institut
- [17] Internet: www.cws-anb.cz, Česká svářečská společnost ANB
- [18] Internet: www.tesydo.cz
- [19] ČSN EN ISO 9692-1 *Svařování a příbuzné procesy – Doporučení pro přípravu svarových spojů – Část 1: Svařování ocelí ručně obloukovým svařováním obalenou elektrodou, tavící se elektrodou v ochranném plynu, plamenovým svařováním, svařováním wolframovou elektrodou v inertním plynu a svařováním svazkem paprsků*
- [20] EN 1043-1 *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*
- [21] ČSN EN ISO 15614-1 *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*
- [22] www.hadyna.cz
- [23] ČSN EN 970 - *Nedestruktivní zkoušení tavných svarů – Vizuální kontrola*
- [24] ČSN EN 571-1 - *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady*
- [25] ČSN EN 1289 - *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení svarů kapilární metodou – Stupně přípustnosti*
- [26] ČSN EN 1290 - *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení svarů magnetickou metodou práškovou*
- [27] ČSN EN 1291 - *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení svarů magnetickou metodou práškovou - Stupně přípustnosti*
- [28] ČSN EN 1435 - *Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení svarových spojů*
- [29] ČSN EN 1712 - *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení svarových spojů ultrazvukem - Stupně přípustnosti*
- [30] ČSN EN 1714 - *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení svarových spojů ultrazvukem*
- [31] ČSN EN 895 – *Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů – příčná zkouška tahem*

- [32] ČSN EN 910 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky lámavosti*
- [33] ČSN EN 10045-1 - *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho – Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby)*
- [34] ČSN EN 1321 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*
- [35] ČSN EN 1320-*Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů–Zkouška rozlomením*
- [36] ČSN EN ISO 4063 - *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*
- [37] ČSN EN ISO 6947 - *Svařování a příbuzné procesy – Polohy svařování*
- [38] ČSN EN 10204 - *Kovové výrobky - Druhy dokumentů kontroly*
- [39] ČSN EN 10002-1- *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty*
- [40] Barták Jiří a kolektiv autorů – *Svařování kovů v praxi*
- [41] OCHODEK Vladislav, VŠB TU Ostrava, Katedra mechanické technologie- ústav svařování, *Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů - I*
- [42] Kovařík R., Černý F., ZČU Plzeň r.2000 *Technologie svařování*
- [43] KUDĚLKA, Vladimír, *Návod na zavedení ČSN EN ISO 3834 – 1 až 6*
- [44] LOYDA, Miloslav; ŠPONER, Vlastimil; ONDRÁČEK, Ladislav. *Svařování termo-plastů. 2. vyd. Praha : UNO Praha, 2011.*
- [45] ČSN EN ISO 527-1- *Plasty-stanovení tahových vlastností –Část 1: Základní principy*
- [46] ČSN EN ISO 527-2-*Plasty - Stanovení tahových vlastností Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*
- [47] Internet: http://www.ateam.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

b – šířka plechu [mm]

t – tloušťka plechu [mm]

v – rychlost svařování [mm/s]

l – svařovací délka [mm]

I – proud [A]

U – napětí [V]

S – plocha průřezu [mm²]

F – zatěžující síla [N]

Q – vnesené teplo [kJ/mm]

R_m – mez pevnosti v tahu [MPa]

R_{eH} – horní mez kluzu [MPa]

R_{eL} – dolní mez kluzu [MPa]

W_o – potenciální energie nutná pro změnu polohy iontu uvnitř krystalu

W_p – vliv povrchu krystalu na velikost potenciální energie (energie nutná pro změnu polohy iontu)

W_r - potenciální energie na rozhraní tuhé a kapalné fáze

u_2 - průběh napětí na oblouku

i_2 – střídavý proud jdoucí obloukem

u_{2t} – průběh napětí zdroje

U_{zap} – zápalné napětí

U_{kom} – komutační napětí

φ – fázový posuv mezi proudem a napětím

η – účinnost procesu svařování

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Energetické bariéry potenciální energie</i>	12
<i>Obr. 2 Vznik svarového spoje tavným svařováním</i>	14
<i>Obr. 3 Vznik svarového spoje tlakovým svařováním</i>	15
<i>Obr. 4 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje</i>	16
<i>Obr. 5 Průběh tvrdosti svarovým spojem</i>	17
<i>Obr. 6 Průběh napětí na oblouku</i>	20
<i>Obr. 7 Schéma elektrického oblouku u metody WIG</i>	20
<i>Obr. 8 Časový průběh napětí na oblouku při svařování střídavým proudem.....</i>	22
<i>Obr. 9 Způsoby přenosu kovu elektrody v oblouku</i>	24
<i>Obr. 10 Jednofázový usměrňovač</i>	26
<i>Obr. 11 Třífázový usměrňovač.....</i>	27
<i>Obr. 12 Typy vad</i>	32
<i>Obr. 13 Polohy svařování</i>	39
<i>Obr. 14 Výkres vzorků pro svařování</i>	48
<i>Obr. 15 Úprava svarové plochy pro vzorek 4mm</i>	48
<i>Obr. 16 Úprava svarové plochy pro vzorek 8mm</i>	48
<i>Obr. 17 Svářecí poloautomat OMI 385</i>	51
<i>Obr. 18 Schéma svařování horkým plynem</i>	52
<i>Obr. 19 Schéma měření tvrdosti</i>	52
<i>Obr. 20 Schéma měření tvrdosti na vzorku tloušťky 8mm</i>	53
<i>Obr. 21 Schéma měření tvrdosti na vzorku tloušťky 8mm</i>	54
<i>Obr. 22 Zaznačení kořenové vrstvy (8mm)</i>	57
<i>Obr. 23 Zaznačení krycí vrstvy (8mm).....</i>	59
<i>Obr. 24 Zaznačení tupého svaru (4mm)</i>	61
<i>Obr. 25 Trhací stroj ZDM 10/91</i>	63
<i>Obr. 26 Výkres vzorku 8mm.....</i>	64
<i>Obr. 27 Foto vzorků 8mm</i>	64
<i>Obr. 28 Záznam výstupu z trhacího stroje.....</i>	64
<i>Obr. 29 Příklady tahových diagramů</i>	65
<i>Obr. 30 Tahový diagram.....</i>	65
<i>Obr. 31 Foto vzorků po roztržení (8mm)</i>	67
<i>Obr. 32 Výkres vzorku 4mm.....</i>	67

<i>Obr. 33 Foto vzorků 4mm</i>	68
<i>Obr. 34 Foto vzorků po přetržení (4mm)</i>	69
<i>Obr. 35 Výkres vzorku</i>	70
<i>Obr. 36 Foto vzorku</i>	70
<i>Obr. 37 Foto vzorků po přetržení bez svaření</i>	71
<i>Obr. 38 Tahový diagram vzorků bez svaření</i>	71
<i>Obr. 39 Svařené vzorky po přetržení</i>	72
<i>Obr. 40 Tahový diagram vzorků po svaření</i>	72
<i>Obr. 41 Makrostruktura vzorku 8mm</i>	73
<i>Obr. 42 Mikrostruktura materiálu v různých fázích tahové zkoušky</i>	74
<i>Obr. 43 Struktura základního materiálu (4mm)</i>	75
<i>Obr. 44 Struktura ve svarovém kovu (4mm)</i>	75
<i>Obr. 45 Struktura v přechodové části (4mm)</i>	75
<i>Obr. 46 Struktura základního materiálu (8mm)</i>	76
<i>Obr. 47 Struktura ve svarovém kovu (8mm)</i>	76
<i>Obr. 48 Struktura v přechodové části (8mm)</i>	76

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Zdroje tepla pro tavné svařování.....</i>	14
<i>Tab. 2 Orientační šířky jednotlivých pásem TOO</i>	17
<i>Tab. 3 Úprava svarových ploch dle normy ČSN EN ISO 9692-1</i>	49
<i>Tab. 4 Atest svařovacího drátu ČSN EN 10204-2.2</i>	50
<i>Tab. 5 Závislost pevnosti a tvrdosti</i>	56
<i>Tab. 6 Hodnoty pro svařování kořene a vnesené teplo (8mm)</i>	57
<i>Tab. 7 Účinnost procesu u vybraných technologií svařování.....</i>	58
<i>Tab. 8 Hodnoty pro svařování krycí vrstvy a vnesené teplo (8mm)</i>	59
<i>Tab. 9 Celkové vnesené teplo (8mm)</i>	61
<i>Tab. 10 Hodnoty svařování a vnesené teplo (4mm).....</i>	61
<i>Tab. 11 Mechanické vlastnosti a rozměry vzorků (8mm)</i>	66
<i>Tab. 12 Mechanické vlastnosti a rozměry vzorků (4mm)</i>	67
<i>Tab. 13 Technické parametry stroje Zwick Roell 1456</i>	70
<i>Tab. 14 Vyhodnocení vad ve svarech.....</i>	77