



Vliv způsobu chlazení na životnost elektrodových čepiček u bodového odporového svařování

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Jan Otřísal**
Vedoucí práce: doc. Ing. Heinz Neumann, CSc.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Otřísal**
Osobní číslo: **S13000146**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Vliv způsobu chlazení na životnost elektrodo-
vých čepiček u bodového odporového svařování**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s teoretickými zákonitostmi bodového odporového svařování.
2. Svařovací parametry bodového odporového svařování a kvalita svaru.
3. Elektrodové materiály pro odporové svařování a životnost elektrod.
4. Navrhněte experimentální program pro stanovení vlivu podmínek chlazení elektrodo-
vých čepiček na jejich životnost.
5. Realizujte experimentální program a proveďte celkové vyhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací: **grafy, tabulky**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


- [1] **PLÍVA, L.** *Odporové svařování.* SNTL Praha, 1975.
[2] **NEUMANN, H.** *Sledování a řízení svařovacího procesu při bodovém odporovém svařování žárově pohliníkových ocelových plechů. /Disertační práce/, Liberec 1990, Fakulta strojní, VŠST.[3] **PACÁK, J.** *Bodové odporové svařování vysokopevnostních plechů v automobilovém průmyslu. /Diplomová práce/, Liberec 2006, TU Liberec, FS.[4] **Dokumenty IIW, časopisy, normy ČSN EN ISO.****

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Heinz Neumann, CSc.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. ledna 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Anotace

Cílem bakalářské práce bylo zjistit, jakým způsobem se projeví chlazení kapalným oxidem uhličitým na životnosti elektrodových čepiček při odporovém bodovém svařování. Práce byla rozdělena do dvou částí, teoretické a praktické. Teoretická část obsahuje seznámení s technologií odporového svařování a způsobem hodnocení životnosti elektrod. V praktické části je popsán postup a vyhodnocení zkoušky životnosti elektrodových čepiček, která byla realizována při svařování pozinkovaných plechů v režimu FIX.

Klíčová slova:

odporové bodové svařování, elektrodové čepičky, svařovací podmínky, chlazení elektrodových čepiček, oxid uhličitý, životnost elektrodových čepiček

Anotation

The aim of the bachelor thesis was to find out, how the cooling with liquid carbon dioxide affects lifetime of the electrode caps for resistance spot welding. The work was divided into two parts, theoretical and practical. The theoretical part includes familiarization with the technology of resistance welding and a method of evaluating electrode life. The practical part describes the process and evaluate the durability of tested electrode caps, which was implemented in welding galvanized sheets in FIX mode.

Keywords:

resistance spot welding, electrode caps, resistance welding parameters, electrode caps cooling, liquid carbon dioxide, electrode caps lifetime

Obsah

Obsah	5
Seznam použitých zkratek a symbolů	7
Úvod	9
Teoretická část	10
1 Odporové svařování.....	10
1.1 Základní metody odporového svařování:	11
1.1.1 Bodové svařování.....	11
1.1.2 Švové svařování	15
1.1.3 Výstupkové svařování	16
1.1.4 Stykové svařování.....	17
1.2 Svařovací stroje pro odporové svařování	18
1.2.1 Svařovací stroje pro bodové svařování	20
1.3 Elektrody pro odporové svařování.....	21
1.3.1 Elektrody pro bodové svařování.....	22
1.4 Chlazení elektrod.....	24
1.4.1 Chlazení pomocí kapalného oxidu uhličitého	26
1.5 Životnost elektrod.....	28
1.5.1 Zkoušky životnosti.....	31
1.6 Hodnocení kvality svarů:.....	32
1.6.1 Odlupovací zkouška	33
1.6.2 Zkouška stříhem	35
Praktická část	37
2 Experimentální pracoviště	37
2.1 Svařovací stroj TECNA 6124	38
2.2 Řídicí jednotka TE 700	40
2.3 Měřicí zařízení Miyachi MG3 Digital	41
2.4 Chladicí jednotka Hyfra SVK 140/1.....	43
2.5 Držák elektrodoých čepiček.....	44
3 Základní informace.....	46
4 Metodický postup experimentu	48
4.1 Přípravné operace.....	48

4.1.1 Příprava vzorků	48
4.1.2 Příprava experimentálního pracoviště	49
4.2 Zkouška životnosti	51
4.2.1 Určení svařovacích parametrů.....	51
4.2.2 Realizace zkoušky životnosti	54
4.2.3 Odlupovací zkouška	55
4.2.4 Zkouška stříhem	57
4.2.5 Zhodnocení výsledků jednotlivých zkoušek.....	58
4.3 Snímání teploty	63
Závěr	68
Použitá literatura	69
Seznam příloh.....	73

Seznam použitých zkratek a symbolů

Q [J]	Množství tepla
R [Ω]	Celkový odpor soustavy
I [A]	Svařovací proud
t_s [s]	Svařovací čas
R_1, R_7 [Ω]	Odpor materiálu elektrod
R_2, R_6 [Ω]	Kontaktní odpory mezi elektrodou a svařovaným plechem
R_3, R_5 [Ω]	Odpor materiálu svařovaných dílů
R_4 [Ω]	Stykový odpor mezi svařovanými díly
d [mm]	Průměr svarové čočky
t [s]	čas
F [N]	Elektrodová síla
D_z [%]	Zatěžovatel svařovacího stroje
t_p [s]	Doba přestávky mezi časovými úseky, kdy je dodáván proud
N [W]	Výkon svařovacího stroje
N_t [W]	Trvalý výkon svařovacího stroje
N_k [W]	Krátkodobý výkon svařovacího stroje
T_s [$^{\circ}\text{C}$]	Oteplení svařovacího stroje
d_1 [mm]	Příčný rozměr vytržené svarové čočky
d_2, d_3 [mm]	Podélný rozměr vytržené svarové čočky
d_c [mm]	Průměr tepelně ovlivněné oblasti
a [mm]	Velikost přeplátování
b [mm]	Šířka vzorku pro zkoušku stříhem
l_s [mm]	Délka vzorku pro zkoušku stříhem
l_t [mm]	Délka jednotlivých zkušebních výstřížků
l_f [mm]	Volná délka mezi čelistmi
p [Pa]	Tlak
t_{pl} [mm]	Tloušťka plechu
T [K]	Termodynamická teplota
Re [MPa]	Mez kluzu v tahu

R_p [MPa]	Mez pevnosti v tahu
A_{80} [%]	Tažnost
e [mm]	Vzdálenost termočlánku od pracovní plochy elektrodové čepičky
RO [%]	Energie dodávaná invertorem
s [μm]	Dráha pohybu ramen
n [-]	Počet zhotovených svarů
F_o [N]	Odlupovací síla
F_{om} [N]	Maximální odlupovací síla
F_s [N]	Střihová síla
F_{sm} [N]	Maximální střihová síla
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
CO ₂	Oxid uhličitý

Úvod

Odporové svařování je v současnosti velmi rozšířenou technologií, která je používána pro spojování součástí velkého rozsahu rozměrů, tvarů a materiálů. Nejpoužívanějším způsobem odporového svařování je bodové svařování, které nachází uplatnění v automobilovém průmyslu, kde slouží především pro spojování částí karosérií. Vzhledem k nárokům na zvyšování produktivity a kvality svařování dochází v oblasti odporového bodového svařování k neustálému vývoji. Z tohoto důvodu je věnována výrazná pozornost také životnosti elektrod, která ovlivňuje jak kvalitu zhotovených svarů, tak finanční stránku celého svařovacího procesu.

Jedním z nejvýznamnějších faktorů, které ovlivňují životnost elektrod, je způsob chlazení. Výzkum v oblasti chlazení elektrod se v současné době ubírá dvěma směry, kdy dochází buď k zavádění nových způsobů chlazení elektrod, nebo rozvoji konvenčního vodního chlazení.

Na Technické univerzitě v Liberci docházelo v letech 2013 až 2015 k řešení projektu „Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů“, který se mimo jiné zabýval použitím oxidu uhličitého jako chladicího média při odporovém bodovém svařování. V rámci tohoto projektu bylo vytvořeno několik publikací a závěrečných prací, které by mohly v budoucnu sloužit jako podklad pro zavedení tohoto způsobu chlazení do výroby.

Při řešení daného projektu byly prokázány některé výhody použití kapalného oxidu uhličitého pro chlazení elektrod, avšak nebylo možné tyto výhody experimentálně ověřit při svařování ve všech režimech. Tato bakalářská práce navazuje na výsledky projektu a zabývá se hodnocením vlivu chlazení pomocí kapalného oxidu uhličitého při svařování v režimu konstantní energie.

Teoretická část

1 Odporové svařování

Odporové svařování je podle ČSN 05 0003 [1] definováno jako: Svařování s použitím tlaku, při kterém se využívá teplo vznikající průchodem elektrického proudu skrz svařované součásti.

Ke vzniku svarového spoje dochází v místě ohřátém na svařovací teplotu pomocí odporového tepla, které vzniká průchodem svařovacího proudu vysoké intenzity (až 100 000 A) a nízkého napětí (5 až 15V) svařovací soustavou, která je tvořena elektrodami a svařovanými součástmi.

Množství tepla, které vznikne průchodem svařovacího proudu ve svařovací soustavě, lze určit pomocí rovnice (1), která vychází z Joule-Lenzova zákona.

$$Q = \int_0^{t_s} R(t) \cdot I(t)^2 dt, \quad (1)$$

kde: Q - množství vzniklého tepla [J];

R - celkový odpor soustavy [Ω];

I - svařovací proud [A];

t_s - svařovací čas [s].

Během svařovacího procesu dochází především k následujícím dějům: vedení proudu, vzniku Jouleova-Lenzova tepla, vedení tepla materiálem, ztrátám tepla radiací, konvekcí a přestupem do elektrod a deformaci elektrod vlivem ohřátí na vysokou teplotu.

Svařovat lze ve dvou režimech, při kterých dochází k tvorbě stejného množství tepla. První z režimů je označován jako tzv. tvrdý, vyznačuje se použitím vyšší hodnoty svařovacího proudu během kratšího časového úseku, čímž dochází k velmi rychlému ohřátí součásti. Aby bylo možné tímto způsobem vytvořit svar, je potřeba vyvinout vyšší přítlačnou sílu.

Druhý režim je označován jako tzv. měkký, pracuje s nižší hodnotou svařovacího proudu, který je dodáván během delšího časového úseku a ohřátí

součásti na požadovanou teplotu trvá delší dobu, pro vytvoření svaru stačí podstatně nižší hodnota přitlačné síly.

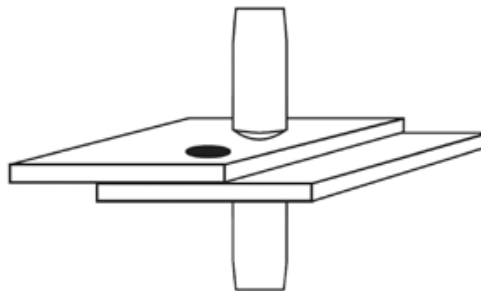
Vzhledem ke zvyšujícím se nárokům na produktivitu, nachází v současné době uplatnění především svařování v tvrdém režimu. Měkký režim je používán pro spojování speciálních typů materiálů.

1.1 Základní metody odporového svařování:

Odporové svařování lze rozdělit do čtyř základních způsobů, které se od sebe liší především výrobním postupem a tvarem elektrod.

1.1.1 Bodové svařování

Bodové svařování je podle ČSN 05 0003 [1] definováno jako: Způsob odporového svařování, při kterém se svar ve tvaru čočky zhotoví na přeplátovaných dílech mezi bodovacími svařovacími elektrodami, přičemž svar má přibližně stejnou plochu jako zakončení elektrod, síla pak působí na svar nepřetržitě během celého procesu. Schematické znázornění technologie bodového svařování je naznačeno na obr. 1.



Obrázek 1: Schéma bodového svařování [8]

Na vzniku potřebného tepla pro vytvoření bodového svaru se podílí především elektrický odpor, který je vždy tvořen jednotlivými složkami, jež mohou ve svařovací soustavě nabývat různých hodnot:

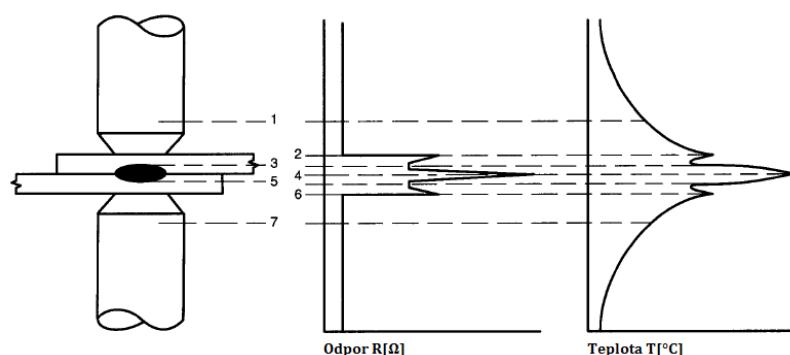
- a) odpor materiálu elektrod,
- b) odpor materiálu svařovaných dílů,
- c) kontaktní odpor mezi čelem elektrody a povrchem plechu,

d) stykový odpor mezi svařovanými díly.

Rozložení a velikosti těchto dílčích odporů, včetně teplot v místě jejich výskytu jsou vyznačeny na obr. 2. Celkovou velikost odporu svařovací soustavy pak lze podle rovnice (2) vyjádřit jako součet jednotlivých dílčích odporů.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7, \quad (2)$$

kde jednotlivé složky odporu odpovídají rozložení podle obr. 2.



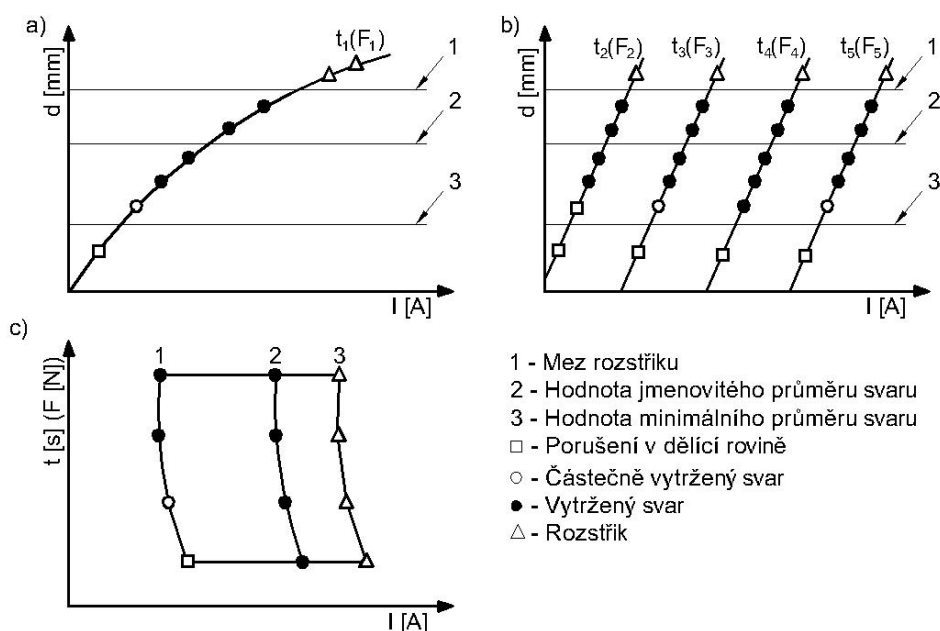
Obrázek 2: Rozložení přechodových odporů a teplot při svařování elektrickým odporem [6]

1, 7 - odpor materiálu elektrod; 2, 6 - kontaktní odpory mezi elektrodou a svařovaným plechem; 3, 5 - odpor materiálu svařovaných dílů; 4 - stykový odpor mezi svařovanými díly

Pro dosažení svaru požadované jakosti, je nutné před zahájením samotného svařovacího procesu, určit podle požadavků na svarový spoj vhodné svařovací podmínky a odpovídající svařovací program. Svařovací podmínky jsou proměnné veličiny charakterizující celý proces odporového svařování. Pro bodové svařování jsou nejdůležitějšími svařovacími podmínkami elektrodová síla, svařovací proud a svařovací čas.

Pro optimální volbu svařovacích podmínek slouží diagram oblasti svařování, který je podle ČSN EN ISO 14327 [20] definován jako: Oblast svařovacího proudu, která dovoluje výrobu bodových svarů bez rozstřiku s průměrem bodu rovným nebo větším než předem určená hodnota, buď při konstantní době svaru, nebo konstantní elektrodové síle.

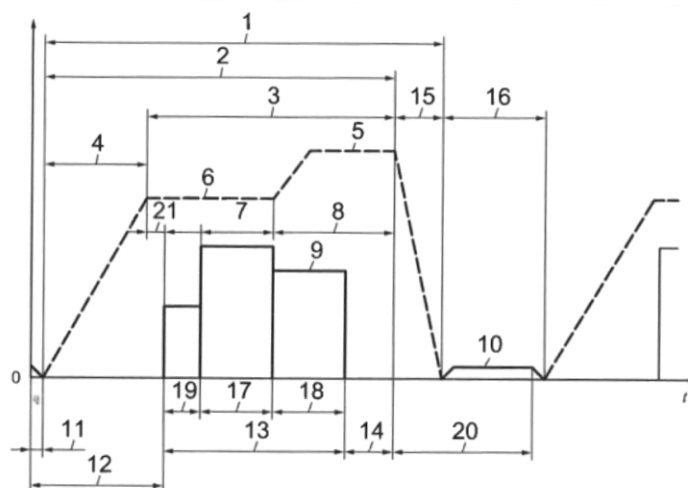
Jednotlivé diagramy bývají sestrojeny pomocí série růstových křivek svaru. Růstová křivka (obr. 3a) popisuje závislost svařovacího proudu na průměru svaru a bývá konstruována tak, že při určité hodnotě doby svaru resp. elektrodové síly je zvyšován svařovací proud, aby docházelo k postupnému zvětšování průměru svaru od spodní mezní hranice, přes jmenovitý průměr svaru (velikost průměru svaru rovna hodnotě $5 \cdot \sqrt{t_{pl}}$) až po horní mez. Diagram oblasti svařování (obr. 3c) je určen vyhodnocením vad svarů, minimálního průměru svaru, průměru meze rozstříku a způsobu porušení svarů a vychází z diagramu růstových křivek (obr. 3b). Diagram růstových křivek obsahuje jednotlivé růstové křivky pro různé hodnoty doby svaru resp. elektrodové síly. [20]



Obrázek 3: Postup tvorby diagramu oblasti svařování [20]

a) diagram růstové křivky svaru; b) diagram růstových křivek svaru; c) diagram oblasti svařování

Jednotlivé změny svařovacího proudu a svařovací síly jsou v průběhu celého svařovacího cyklu řízeny svařovacím programem. Příklad obecného svařovacího programu pro bodové svařování, včetně vyznačených svařovacích parametrů je znázorněn na obr. 4.



Obrázek 4: Program řízení proudu a elektrodové síly při bodovém svařování [11]

1 - doba působení síly; 2 - doba elektrodové síly; 3 - doba udržovací síly; 4 - doba vzestupu síly; 5 - kovací síla; 6 - elektrodová síla; 7 - doba zpoždění kování; 8 - doba kování; 9 - proud; 10 - pohyb elektrody; 11 - doba přiblížování hlavy; 12 - doba stažení; 13 - celková doba svařování; 14 - doba výdrže; 15- doba poklesu síly; 16 - skutečná doba poklesu síly; 17 - doba ohřevu/samostatná doba svařování; 18 - doba dohřevu; 19 - doba předehřevu; 20 - doba vypnutí; 21 - doba zpoždění proudu; t - čas

Dále je potřeba věnovat pozornost přípravě povrchu svařovaných součástí a v průběhu svařování dodržet přesně daný svařovací cyklus, který udává posloupnost jednotlivých operací prováděných svařovacím strojem.

Příklad nejjednoduššího svařovacího cyklu pro bodové svařování:

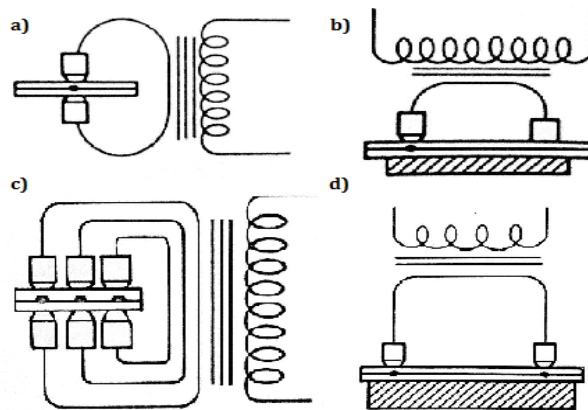
- a) přeplátované plechy jsou vloženy mezi rozevřené elektrody, stroj je v klidu,
- b) elektrody dosednou a plechy jsou stlačovány bez průchodu proudu,
- c) jakmile je dosaženo požadované hodnoty přítlaku, je zapnut proud a dochází ke svařování,
- d) po uplynutí potřebné doby svařování, je proud vypnut, elektrody však stále svírají svařované plechy,
- e) elektrody se vrátí do výchozí polohy a svařené plechy jsou vyjmuty.

Průběh svařovacího cyklu se liší především podle druhu materiálu svařovaného dílu. Zatímco nejjednodušší cyklus se používá pro svařování obyčejných uhlíkových ocelí, při svařování ušlechtilých ocelí nebo neželezných

kovů je zapotřebí v průběhu cyklu měnit velikost svařovacího proudu nebo přitlačné síly.

Podle polohy elektrod vůči svařovaným součástem rozdělujeme bodové svařování na přímé a nepřímé. Při přímém svařování se elektrody nacházejí na protilehlých stranách svařovaných součástí (obr. 5a), zatímco u nepřímého svařování jsou elektrody umístěny pouze na jedné straně svařovaných dílů, druhá strana je opřena o podložku (obr. 5b).

Dále rozdělujeme bodové svařování podle toho, kolik párů elektrod je současně napájeno jedním svařovacím transformátorem na paralelní a sériové. U paralelního svařování jsou všechny dvojice elektrod zapojeny paralelně a k jejich napájení je použit jeden transformátor, čímž dochází ke zhotovení většího počtu svarů současně (obr. 5c). Při sériovém svařování je napájen příslušným transformátorem pouze jeden pár elektrod, přičemž je vytvořeno dvou a více svarů v sérii (obr. 5d).



Obrázek 5: Způsoby bodového svařování [5]

a) přímé bodové svařování; b) nepřímé bodové svařování; c) paralelní bodové svařování; d) sériové bodové svařování

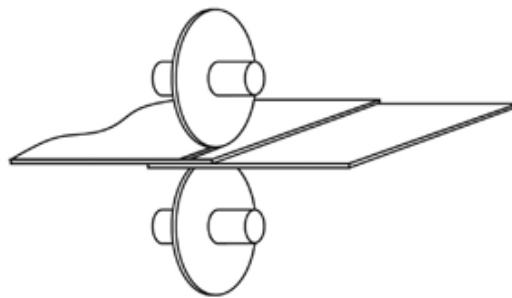
1.1.2 Švové svařování

Švové svařování je podle ČSN 05 0003 [1] definováno jako: Způsob odporového svařování, při kterém svařovací síla působí nepřetržitě a proud je dodáván buď stále, nebo přerušovaně, čímž vzniká souvislý svar, svařované díly

jsou stlačovány mezi dvěma elektrodovými kotouči, nebo mezi kotouči a elektrodovou podložkou. Kotouče přenášejí sílu a během tvorby svarového spoje se plynule, nebo přerušovaně otáčejí. Na obr. 6 je znázorněn základní princip technologie švového svařování.

Podle doby přivádění svařovacího proudu lze odporové švové svařování rozdělit na průběžné a přerušované. Při průběžném svařování prochází svařovací proud mezi kladkami nepřetržitě, kdežto u přerušovaného je svařovací proud dodáván pouze v určitých časových intervalech. Přerušované svařování je výhodnější, jelikož pomocí volby svařovací rychlosti a časového intervalu, kdy kladkami prochází proud lze ovlivnit rozmístění jednotlivých bodů, které mohou být buď jednotlivé, nebo se mohou vzájemně překrývat.

Průběžné svařování používáme především pro svařování tenkých ocelových plechů, zatímco přerušované svařování je vhodné pro svařování tlustějších plechů, barevných kovů a lehkých slitin. [2]



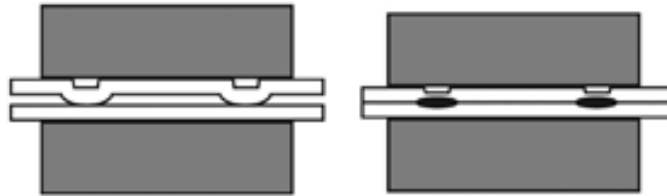
Obrázek 6: Schéma švového svařování [8]

1.1.3 Výstupkové svařování

Výstupkové svařování je podle ČSN 05 0003 [1] definováno jako: Způsob odporového svařování, při kterém síla a proud vytvářející svar nebo svary jsou lokalizovány pomocí výstupku nebo výstupků zhotovených, případně přirozeně vytvořených na jedné nebo více stykových plochách (výstupky se během svařování zbortí). Svařovací proud a síla se obvykle přenáší pomocí přípravků, nebo čelistí.

Jedná se v podstatě o několikabodové svařování, kdy rozložení jednotlivých bodů je dáno polohou výstupků. Na obr. 7 je znázorněn příklad technologie výstupkového svařování.

Před zahájením samotného svařování se na jedné ze svařovaných součástí vytvoří výstupky (u plechů) nebo osazení (u svorníků). Svařované součásti jsou vloženy mezi ploché deskové elektrody (čelisti svařovacího lisu) a následuje přitlak čelistí k sobě, dokud nedojde k dosednutí výstupků. Poté je zapnut proud, čímž dojde k natavení materiálu obou svařovaných součástí a za působení tlaku v místě výstupků k vytvoření svaru.



Obrázek 7: Příklad výstupkového svařování [8]

Technologie výstupkového svařování je v současné době používána především v sériové a hromadné výrobě pro svařování dílů menších rozměrů.

1.1.4 Stykové svařování

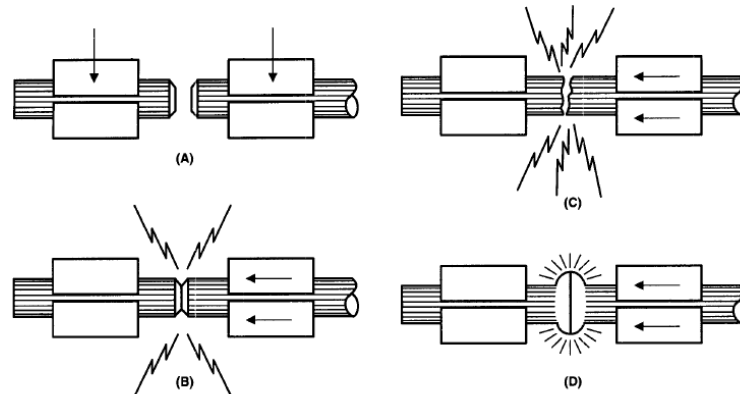
Stykové svařování je podle ČSN 05 0003 [1] definováno jako: Způsob odporového svařování, při kterém se spojení svařovaných dílů uskutečňuje na celém povrchu stykových ploch.

Odporové stykové svařování je podle způsobu ohřátí stykových ploch rozděleno na pēchovací, kdy se pro dosažení požadované svařovací teploty využívá tepla vzniklého průchodem proudu mezi svařovanými součástmi a odtavovací, u kterého je hlavním zdrojem tepla elektrický oblouk mezi svařovanými součástmi.

U pēchovacího způsobu jsou součásti nejprve upnuty do čelistí svařovacího stroje, následuje přiblížení součástí k sobě, aby došlo k dotyku čelních ploch. Pak dojde k zapnutí přívodu svařovacího proudu a ohřátí stykových ploch na požadovanou teplotu, poté je proud vypnut a součásti jsou stlačeny, čímž dojde k jejich svaření.

Podle průběhu svařovacího cyklu rozlišujeme stykové odtavovací svařování bez předehřevu a s předehřevem. Při stykovém odtavovacím svařování bez předehřevu dochází nejprve k ustavení a upnutí součástí do čelistí svařovacího

stroje (obr. 8a). Následuje zapnutí proudu a postupné přibližování součástí k sobě. Jakmile dojde ke kontaktu mezi svařovanými součástmi (obr. 8b), nastává soustředění proudu do míst lokálního dotyku a opakované odtavování (obr. 8c), tím dochází k ohřívání čelních ploch součástí, dokud není dosaženo potřebné svařovací teploty. Svar je vytvořen velmi rychlým a silným stlačením součástí k sobě (obr. 8d). Pracovní postup pro svařování s předeřevem je obdobný s tím rozdílem, že před samotným odtavováním dochází k tzv. předeřevu.



Obrázek 8: Postup odtavovacího stykového svařování [5]

1.2 Svařovací stroje pro odporové svařování

Svařovací stroj pro odporové svařování je podle ČSN 05 0003 [1] definován jako: Pracovní prostředek pro spojování dílů, který se skládá ze svařovacího stroje a nástroje (elektrody, upínacího zařízení apod.), zdroje svařovacího proudu, ovladače a řídicího systému.

Svařovací stroje lze rozdělit podle technologie, pro kterou jsou určeny na svařovací stroje pro odporové svařování bodové, švové, výstupkové a stykové. Dle stupně automatizace na ruční, poloautomatické a automatické.

Každý svařovací stroj se skládá ze tří hlavních částí: elektrické části, mechanické části a řídicího systému. Elektrická část slouží k přivádění svařovacího proudu a tím ohřívání určitého místa součásti na žádanou teplotu, je tvořena transformátorem, který se skládá z primárního a sekundárního vinutí. Mechanická část zajišťuje polohu svařovaných dílů a vytváří potřebný přítlak elektrod. Řídicí

system ovládá především velikost a dobu působení elektrického proudu, dále pak úkony ostatních prvků svařovací soustavy.

Odporový svařovací stroj pracuje v tzv. přerušovaném provozu, při kterém dochází v pravidelných časových intervalech ke střídavému zapínání a vypínání stroje. Na obr. 9 je znázorněn průběh výkonu a oteplení pracovního stroje při přerušovaném provozu. Časové úseky, kdy je dodáván proud, jsou označovány t_s , přestávky mezi nimi pak t_p .

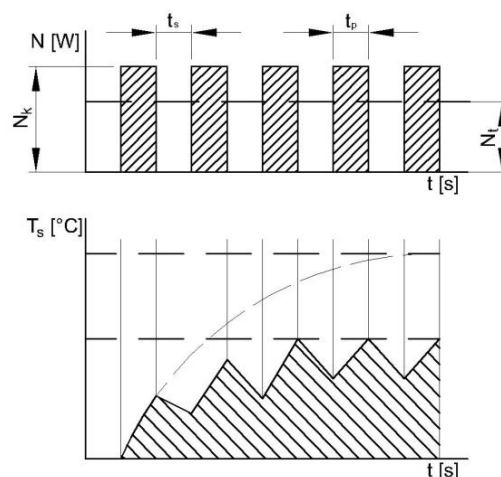
Důležitou hodnotou každého svařovacího cyklu je tzv. zatěžovatel pracovního stroje, který lze určit dle vztahu (3) a udává poměr doby, kdy je dodáván proud vůči celkové době cyklu. [7]

$$D_Z = \frac{t_s}{t_s + t_p} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

Další veličinou charakterizující každý odporový svařovací stroj je krátkodobý výkon N_k , který udává množství vytvořeného tepla za čas t_s a trvalý výkon N_t , jenž vytvoří za čas $t_s + t_p$ stejné množství tepla jako N_t . [7]

Trvalý výkon lze určit, pokud známe velikosti krátkodobého výkonu a dovoleného zatěžovatele svařovacího stroje ze vztahu (4). [2]

$$D_Z = \frac{N_t^2}{N_k^2} [-] \quad (4)$$



Obrázek 9: Průběh oteplení a výkonu odporového svařovacího stroje [7]

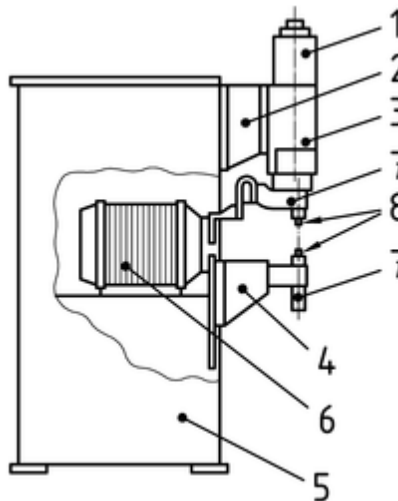
T_s - oteplení stroje; N - výkon stroje; t - čas

1.2.1 Svařovací stroje pro bodové svařování

Svařovací stroje pro bodové svařování lze rozdělit na stabilní, přenosné a speciální.

Stabilní svařovací stroje jsou pevně spojeny s podlahou a svařované součásti jsou vkládány do pracovní oblasti stroje. Typickým znakem většiny stabilních svařovacích strojů bývá kovový rám, který je pevně spojen se svařovacím transformátorem a ovládacím mechanismem. Elektrody bývají upevněny v ramenech, která se obvykle nacházejí v horní oblasti rámu. Horní rameno bývá zpravidla pohyblivé a může vykonávat buď přímočarý, nebo kruhový pohyb, dolní rameno je uloženo pevně. Potřebný přítlak elektrod bývá většinou vyvozován pomocí nožového nebo pneumatického mechanismu.

Na obr. 10 je naznačeno schéma stabilního bodového svařovacího stroje. Přeplátované plechy jsou vkládány do prostoru mezi elektrody (8), které jsou uloženy v držáku elektrod (7). Jeden z držáků je upevněn přímo v dolním ramenu (4), zatímco druhý je uložen ve svařovací hlavě (3), která je stejně jako vzduchový válec (1) součástí horního ramena. Svařovací hlava slouží k vyvozování přítlačné síly a je přímo propojena se vzduchovým válcem, který převádí sílu stlačeného vzduchu na mechanický pohyb. Obě ramena jsou pevně spojena s rámem stroje 5.



Obrázek 10: Schéma stabilního bodového svařovacího stroje [9]

1 - vzduchový válec; 2 - horní rameno; 3 - svařovací hlava; 4 - dolní rameno; 5 - rám stroje;
6 - transformátor; 7 - držák elektrod; 8 - elektrody

Přenosné svařovací stroje bývají oproti stabilním menších rozměrů, vyznačují se menším svařovacím výkonem a podstatně větší flexibilitou, jenž umožňuje svařování součástí složitějších rozměrů. Podle polohy transformátoru vůči vlastnímu svařovacímu zařízení rozlišujeme přenosné svařovací stroje s odděleným nebo vestavěným transformátorem.

Pro přenosné svařovací stroje s odděleným transformátorem je typický závěsný transformátor, který je pomocí kabelů spojen s vlastním svařovacím zařízením (svařovací pistole nebo svařovací kleště). U svařovacích strojů s vestavěným transformátorem je svařovací zařízení a transformátor pevně spojeno v jeden celek.

Speciální bodové svařovací stroje bývají konstrukčně uspořádány pro vykonávání určité operace, která se odlišuje od standardního způsobu bodového svařování. Nejčastěji se jedná o stroje, které jsou schopny na jeden zdvih vytvořit více bodů na svařované součásti.

1.3 Elektrody pro odporové svařování

Elektrody jsou vyměnitelné části každého odporového svařovacího stroje, které se dostávají do přímého styku se svařovanými díly, mohou nabývat různého tvaru podle technologie, pro kterou jsou určeny.

Během odporového svařování plní každá elektroda tři důležité funkce:

- a) přivádí proud do svařovaného místa,
- b) přenáší potřebnou sílu pro vytvoření požadovaného přitlaku,
- c) pomáhá odvádět teplo z vnějšího povrchu svařovaných dílů,

a proto je důležité, aby byla vyrobena z vhodného materiálu, který bude mít následující vlastnosti: vysokou tepelnou a elektrickou vodivost, dostatečnou mechanickou pevnost, dobrou odolnost proti otěru za vysokých teplot, odolnost proti oxidaci, co nejvyšší teplotu měknutí, co nejnižší sklon k legování svařovaným materiálem, dobrou obrobiteľnosť a nízke výrobné náklady.

Dříve byla každá elektroda vyrobena z čisté mědi, nebo materiálu na její bázi, ale s rostoucími nároky na zvyšování přitlačné síly a intenzity svařovacího proudu, používáme v dnešní době podstatně širší škálu materiálů.

Elektrodové materiály jsou podle ČSN EN ISO 5182 [12] rozděleny do tří skupin, které jsou označovány písmeny A, B, C.

Skupina A je tvořena mědí a jejími slitinami. Podle společných znaků skupinu dále rozdělujeme ještě do čtyř tříd [12]:

1. nevytvrditelné slitiny mědi o vysoké vodivosti a nízké tvrdosti;
2. vytvrditelné slitiny o vyšší tvrdost než třída 1;
3. vytvrditelné slitiny o vyšší tvrdosti a horší vodivosti než třída 2;
4. slitiny se specifickými vlastnostmi, kterými se liší od ostatních tříd;

Skupina B obsahuje materiály vyrobené metodou práškové metalurgie. Podle složení je rozdělena do šesti tříd, které jsou označovány čísly 10 až 15 a jsou tvořeny [12]:

10. a 11. mědí a wolframem;
12. mědí a karbidy wolframu;
13. wolframem;
14. molybdenem;
15. wolframem a stříbrem;

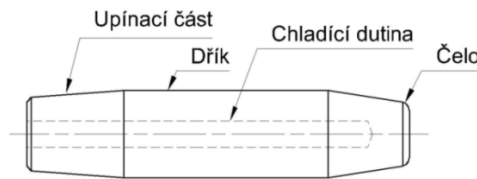
Skupina C zahrnuje disperzně zpevněné materiály na bázi mědi a jejích slitin.

1.3.1 Elektrody pro bodové svařování

Každá elektroda pro bodové svařování se obvykle skládá ze čtyř základních částí: čela, dřívku, upínací části a dutiny pro přívod chladicího média (obr. 11).

Čelo je částí elektrody, která se dostává do přímého kontaktu se svařovanými součástmi. Může nabývat různého tvaru, jenž závisí na druhu svařovaného materiálu a způsobu svařování. Upínací část elektrody slouží k upevnění elektrody do držáku a může být buď přímá, kuželová nebo opatřena závitem. Mezi čelem a

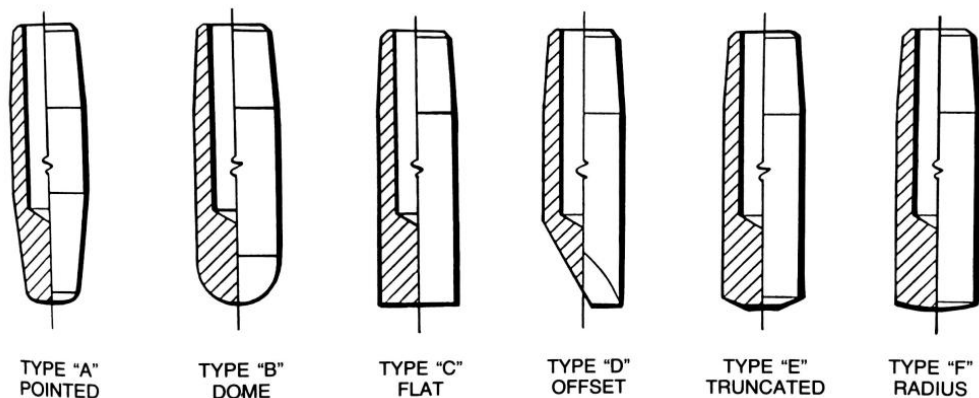
upínací částí se nachází dřík. V elektrodě je dále obvykle vytvořena dutina, která slouží pro přívod chladicího média.



Obrázek 11: Základní části elektrody pro bodové svařování [14]

Podle konstrukčního uspořádání můžeme elektrody rozdělit na standardní, čepičkové a speciální.

Elektrody standardního typu jsou vyrobeny jako jednodílné. Zakončení elektrod bývá tvarové, rozlišujeme šest základních typů zakončení, které jsou označovány písmeny A až F (obr. 12). Nejpoužívanější typy zakončení jsou: A, B, E.



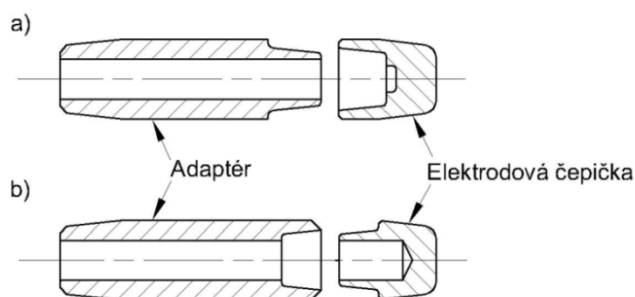
Obrázek 12: Tvary zakončení elektrod standardního typu [5]

Type "A" pointed - Typ "A" špičatý; Type "B" dome - Typ "B" kupolovitý; Type "C" flat - Typ "C" plochý; Type "D" offset - Typ "D" vyosený; Type "E" truncated - Typ "E" kuželovitý; Type "F" radius - Typ "F" zaoblený

Čepičkové elektrody mají ve výsledku stejný tvar jako standardní, ale bývají složeny ze dvou částí, adaptéru a elektrodové čepičky. Elektrodová čepička je vyměnitelné zakončení elektrody a bývá upevněna v adaptéru, který je uložen v držáku elektrod.

Elektrodové čepičky dále rozlišujeme podle způsobu upevnění k adaptéru, na čepičky „mužského“ a „ženského“ typu. Čepičky „mužského“ typu bývají

připevněny k adaptéru prostřednictvím jeho vnitřní plochy a podle tvaru zakončení jsou označovány písmeny A až F (obr. 13b). U čepiček „ženského“ typu slouží k upnutí vnější plocha adaptéru, ty jsou dle tvaru zakončení označovány dvojicí písmen FA až FF, kde první písmeno F označuje, že se jedná o „ženský“ typ (obr. 13a). Označování jednotlivých typů zakončení čepičkových elektrod je shodné s označováním elektrod standardního typu podle obr. 12. [5]



Obrázek 13: Znázornění čepičkové elektrody v rozloženém stavu

a) čepičková elektroda „ženského“ typu; b) čepičková elektroda „mužského“ typu

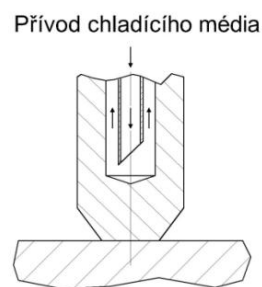
1.4 Chlazení elektrod

Svařovací stroje bývají obvykle vybaveny chladicí jednotkou, která využívá pro snižování teploty v dotykových místech elektrody chladicího média, nejčastěji vody nebo zkapalněného plynu. Během svařování je nutné odvádět teplo především z elektrod, držáků elektrod, transformátoru a stykačů. Při nedostatečném chlazení může totiž dojít až k poškození svařovacího stroje.

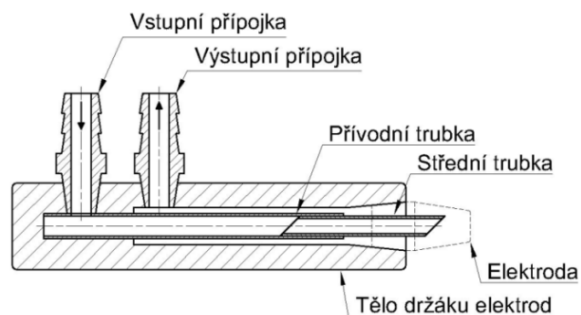
Chladicí jednotka bývá zpravidla soustava tvořená čerpadlem, chladičem, zásobníkem a různými přípojkami, spojkami, hadicemi apod. Chladicí médium se nachází v zásobníku, odkud je přiváděno čerpadlem k držáku elektrod, který zprostředkovává chlazení příslušné elektrody. Jednotlivé členy jsou mezi sebou obvykle propojeny pomocí hadic a tím vytvářejí chladicí okruh, který slouží k dopravě média mezi nimi. Součástí soustavy mohou být dále ještě speciální zařízení například pro filtraci, kontrolu průtoku nebo teploty chladicího média. [17]

Při použití vody jako chladicího média rozeznáváme dva typy chladicích okruhů, otevřený a uzavřený. U otevřeného okruhu je voda odebírána přímo ze zdroje a po ochlazení nástroje odtéká do kanalizace. Při práci v uzavřeném okruhu je chladicí voda nejprve přivedena do nádrže chladicí jednotky, ze které je v průběhu svařovacího procesu odebírána a do které se po ochlazení nástrojů také vrací. [10]

Samotné elektrody jsou chlazeny kvůli lepšímu odvodu tepla z povrchu svařovaných součástí a zabránění jejich poškození vlivem překročení dovolené teploty (obr. 14). Elektrody bývají upnuty do držáku elektrod, který zajišťuje přívod a odvod chladicího média z dutiny elektrody. Na obr. 15 je znázorněn příklad takového držáku, médium se do dutiny dostává pomocí střední trubky, která je napojena na přívodní trubku, do níž je tekutina dodávána přímo z chladicího okruhu přes vstupní přípojku. Tekutina z dutiny elektrody odchází po okrajích přívodní trubky a výstupní přípojkou se dostává zpět do okruhu. [2]



Obrázek 14: Princip chlazení elektrody při bodovém svařování [2]



Obrázek 15: Schéma a hlavní části držáku elektrod [5]

Účinnost chladicího média lze zvýšit: zvětšením průměru střední trubky nebo zvýšením rychlosti proudění a tím dosažení většího průtoku, snížením vstupní

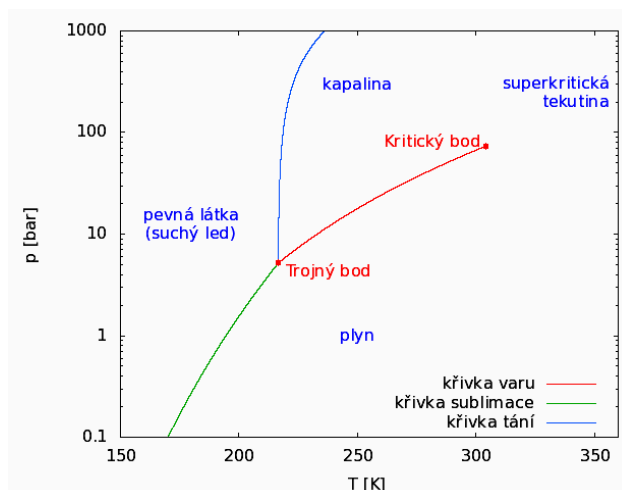
teploty chladicí kapaliny nebo zmenšením vzdálenosti mezi dnem dutiny a stykovou plochou elektrody. [2]

Chladicí jednotka je jednou z nejdůležitějších částí odporové svářečky, protože má vliv na kvalitu svarového spoje a významně ovlivňuje životnost elektrod, a proto v současné době dochází k neustálému zdokonalování technologie chlazení elektrod. Pro zlepšení účinnosti chlazení jsou konstruovány například speciální držáky elektrod, nebo dochází k zavádění nových tekutin jako chladicího média. [16]

1.4.1 Chlazení pomocí kapalného oxidu uhličitého

Použití oxidu uhličitého jako chladicího média bývá i přes značné výhody v praxi používáno spíše pro experimentální účely, neboť jeho zavedení do výroby vyžaduje značné investice především do speciální aparatury (např. speciálně uzpůsobený držák elektrod, zařízení pro dávkování CO₂ apod.). [16]

Samotný oxid uhličitý je bezbarvý, nehořlavý plyn, který má v plynném stádiu hustotu 1,98 kg/m³. V technické praxi však bývá uchováván v kapalném stavu uvnitř tlakových nádob buď při pokojové teplotě a tlaku 45 až 65 barů, nebo při teplotě -35°C až -15°C a tlaku 12 až 25 barů. Na obr. 16 je zobrazen fázový diagram oxidu uhličitého, který znázorňuje stav oxidu uhličitého v závislosti na tlaku p a teplotě T . [22]

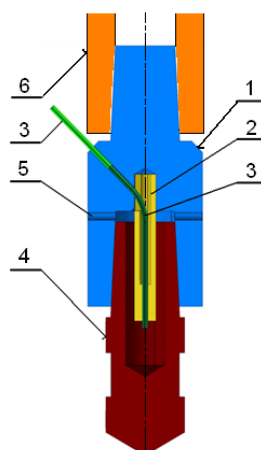


Obrázek 16: Fázový diagram CO₂ [22]

Při samotném chlazení je kapalný oxid uhličitý dopravován pomocí kapilár přímo do expanzní dutiny elektrody. Jakmile dojde k výstupu kapalného oxidu uhličitého z kapiláry, nastává velmi rychlá expanze a na základě Joule-Thomsonova jevu dochází k velmi výraznému poklesu teploty. V expanzní dutině dojde ke změně tlaku tekutiny na hodnotu atmosférického tlaku a teploty na hodnotu $-78,9^{\circ}\text{C}$. Vlivem expanze dochází ke skupenské přeměně kapalného oxidu uhličitého na směs plynu a tzv. suchého ledu, který dále sublimuje a tím odvádí teplo z pracovní části elektrody. [22]

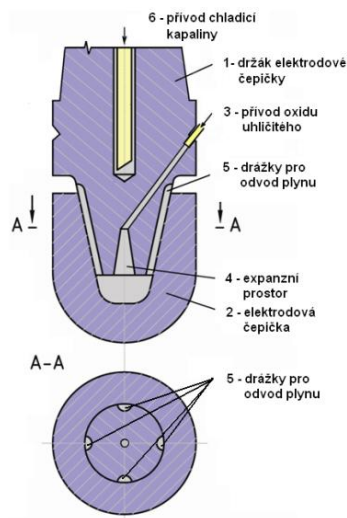
Rozlišujeme dva způsoby chlazení pomocí CO_2 , přímé a kombinované. Při přímém způsobu chlazení je použito k chlazení elektrody pouze oxidu uhličitého. U kombinovaného způsobu je elektroda chlazena oxidem uhličitým v kombinaci s jiným médiem, nejčastěji vodou. Oxid uhličitý je do ochlazovaného místa dodáván vždy v určitých časových intervalech. [10]

Na obr. 17 je zobrazeno konstrukční řešení adaptéru pro upevnění elektrody chlazené pouze pomocí oxidu uhličitého. Kapalný oxid uhličitý je přiváděn do expanzní dutiny elektrody kapilárou (3), jejíž poloha v adaptéru je zajištěna pomocí vedení kapiláry (2). V expanzní dutině probíhá skupenská změna kapalného oxidu uhličitého na směs plynné a pevné fáze. Expandující plyn odchází speciálními otvory do okolního prostředí (5). Spojení mezi adaptérem a tělem držáku elektrod je zprostředkováno pomocí samosvorného kužele. [21]



Obrázek 17: Příklad držáku elektrod pro přímý způsob chlazení pomocí CO_2 [21]
1 - adaptér; 2 - vedení kapiláry; 3 - kapilára; 4 - elektroda; 5 - expanzní otvory; 6 - tělo držáku elektrod

Na obr. 18 je znázorněn příklad adaptéru elektrodové čepičky pro kombinovaný způsob chlazení, při kterém je jako primární chladicí médium použita voda, která je dodávána přívodní trubicí do dutiny v držáku elektrodové čepičky. Oxid uhličitý je použit pouze jako doplňkové chladicí médium a je dodáván v určitých časových intervalech pomocí kapiláry přímo do expanzní dutiny, kde probíhá jeho přeměna na směs kapalné a tuhé fáze. Expandující plyn opět odchází speciálními drážkami do okolního prostředí. [21]



Obrázek 18: Realizace kombinovaného způsobu chlazení elektrodové čepičky pomocí kapalného CO₂ a vody [21]

1.5 Životnost elektrod

Životnost elektrod je pro všechny materiály podle ČSN EN ISO 8166 [13] definována jako: Počet svarů, které mohou být provedeny v požadované jakosti svaru před nezbytnou úpravou dotykové plochy elektrody. Elektroda dosáhne své životnosti, když provedené svary mají průměr svaru podle zjištění při odlupovací zkoušce menší než $3,5 \cdot \sqrt{t_{pl}}$ (kde t_{pl} je tloušťka plechu v mm) u tří svarů na zkušebním vzorku pěti po sobě následujících svarů.

Hranice životnosti může být stanovena podle alternativních kritérií, která se řídí podle požadavků na výrobek a musí být použita podle ustanovení v konstrukční specifikaci, při zkouškách ocelí bez povlaku a s povlakem používáme kritéria [13]:

- a) snížení pevnosti ve stříhu o dohodnutou hodnotu (zkouška stříhem provedena podle EN ISO 14273),
- b) dohodnuté kritérium pro provedení zkoušky krutem podle EN ISO 17653,
- c) dohodnuté kritérium založené na mikrovýbrusech,
- d) požadavky založené na jakosti povrchu u pohledových dílů (vtisky elektrod, povrchové poškození apod.),
- e) kritéria založena na přilepování elektrod ke svařovaným dílům.

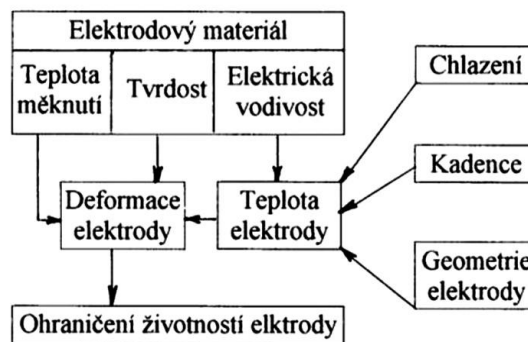
Pro stanovení hranice konce životnosti elektrod, při svařování hliníku a jeho slitin používáme následující kritéria [13]:

- a) snížení pevnosti svaru ve stříhu o 30%,
- b) dohodnutá kritéria pro provedení zkoušky krutem,
- c) dohodnutá kritéria založená na vzniku pórovitosti nebo trhlin ve svarové čočce,
- d) kritéria založená na povrchových trhlinách,
- e) požadavky založené na jakosti povrchu u pohledových dílů (vtisky elektrod, povrchové poškození apod.),
- f) kritéria založena na přilepování elektrod ke svařovaným dílům.

Životnost elektrod při odporovém svařování závisí především na druhu svařovaného materiálu, rozměrech, tvaru a materiálu elektrod, režimu svařování a intenzitě chlazení (obr. 19). [16]

Při svařování všech druhů materiálů dochází k opotřebení elektrod a tím ke snížení životnosti vlivem tepelných, elektrických a metalurgických procesů, které provází celý svařovací cyklus. Důležitým faktorem, jenž ovlivňuje životnost, je kontaktní odpor, který do velké míry závisí na stavu dosedací plochy elektrody, ovlivňuje tvorbu tepla a metalurgické pochody během svařování. Mechanismus opotřebení elektrod se liší podle druhu svařovaného materiálu, například při svařování dílů z oceli bez povlaku, dochází k postupnému zvětšování dosedací plochy elektrody, se kterou se zároveň snižuje i proudová hustota. [16]

Během svařování povlakovaných ocelí dochází k výraznému ovlivňování stykové plochy elektrody roztaveným materiálem povlaku, který má vliv na děje, provádějící svařovací proces. Způsobuje především zvýšení teploty v koncové části elektrody, změnu chemického složení elektrodového materiálu a mechanickou deformaci jejího čela. Mechanická deformace čela elektrody je zapříčiněna opakovaným natavováním částeczek materiálu povlaku a jejich následným odtržením na konci svařovacího cyklu, čímž dochází k tvorbě malých kráterů na čele elektrody. [15]



Obrázek 19: Vliv vlastností materiálu elektrody na ohraničení životnosti [16]

Životnost elektrod lze zvýšit: použitím elektrodového materiálu o vyšší tvrdosti, teplotě měknutí nebo elektrické vodivosti, zvýšením průtoku chladicího média, snížením vstupní teploty chladicího média, zmenšením vzdálenosti mezi koncem trubičky pro přívod chladicího média a stykové plochy elektrody. [10]

Dosažení hranice životnosti nemusí vždy znamenat úplné znehodnocení nástroje, v praxi bývá například často uplatňována periodická úprava geometrie elektrody, to znamená, že jakmile je zhotoven určitý počet svarů, dochází k úpravě geometrie čela elektrody do původního stavu. Tato úprava pracovní části nástroje může být realizována například soustružením nebo frézováním. Elektroda je znehodnocena, jestliže již není možné geometrii jejího čela dále obnovit. Tento postup je v současné době uplatňován například ve firmě Škoda Auto, kde jsou jednotlivá robotizovaná pracoviště vybavena frézovacími zařízeními a proces periodické úpravy je plně automatizován. Díky tomu je možné jednou elektrodou zhotovit 2880 až 7480 svarů v závislosti na svařovaném materiálu. [22]

1.5.1 Zkoušky životnosti

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, životnost elektrod závisí na mnoha faktorech, a proto je nezbytné během zkoušení, dodržet některé zásady, aby nedošlo k nepříznivému ovlivnění výsledků.

Ke zkoušce bývají používány bodové svařovací stroje standardního typu a k napájení obvykle střídavý proud o frekvenci 50 Hz nebo 60 Hz, pokud stroj pracuje s jinak generovaným průběhem proudu, musí být použit přesně podle ustanovení v konstrukční specifikaci. Každý svařovací stroj musí splňovat elektrické a mechanické vlastnosti podle ISO 669. [13]

Pokud není stanoveno jinak, měl by být dodržen pro chlazení elektrod minimální průtok vody 4l/min při svařování ocelových plechů bez povlaku a 6l/min pro svařování povlakovaných ocelí. Vstupní teplota vody by neměla překročit hranici 20 °C a výstupní 30 °C. Dále by mělo být zajištěno, aby horní a dolní elektroda byly chlazeny odděleným chladicím okruhem. [13]

Volba tvaru a materiálu elektrod musí být provedena podle příslušných norem. Zakončení elektrody je tvořeno komolým kuželem o vrcholovém úhlu 120°, průměr pracovní plochy závisí na tloušťce plechu a je roven $5 \cdot \sqrt{t_{pl}}$. Dále musí být zajištěna souosost a rovnoběžnost pracovních ploch elektrod. [13]

Samotná zkouška je prováděna na plechu z materiálu, který musí být volen podle ČSN EN ISO 8166 a jehož délka by měla být nejméně 470 mm a šířka 350 mm. První řada bodů začíná v jednom rohu panelu, nejméně 10 mm od okraje, svary postupují s roztečí nejméně 30 mm, jakmile je dosaženo okraje, dojde ke změně smyslu posuvu plechu a vytváření nové řady se stejnou analogií. Tento postup se opakuje, dokud nedojde k ohřátí plechu na 60 °C. Poté je plech otočen o 180° a dochází k tvorbě nové řady podle předchozího postupu. K ukončení svařování dojde, jakmile je na plechu zhotoveno 192 bodů. Svařování musí být prováděno předepsanou rychlostí, která je v závislosti na použitém stroji: 50 svarů/min pro stojanové svářečky, 30 svarů/min pro robotové svařování a 10 svarů/min pro mnohobodové stroje. [13]

Na každých 192 svarů dojde k vytvoření 8 zkušebních svarů na samostatném plechu o rozměrech 30 mm x 250 mm, který je vyroben ze stejného materiálu jako hlavní plech. Svary musí být zhotoveny se stejnou vzdáleností od okraje a roztečí, jako na hlavním plechu. Tento zkušební plech slouží pro odlupovací zkoušku nebo zhotovení mikrovýbrusů, pět z těchto svarů je využito pro posouzení jakosti a tři jsou ponechány jako zásoba, pokud by bylo nutné zkoušku jakosti opakovat. [13]

Svařovací podmínky musí být voleny tak, aby počáteční průměr svaru přibližně odpovídal počátečnímu průměru pracovní plochy elektrody. Při určování optimální kombinace svařovacích podmínek vycházíme z růstové křivky svaru, která bývá sestrojena pro zvolenou hodnotu elektrodové síly a doby svaru. Z výsledné křivky je následně určena velikost svařovacího proudu. Takto stanovené hodnoty jsou po celou dobu zkoušky udržovány konstantní. [13]

První série zkoušek je prováděna s hodnotou svařovacího proudu, která byla stanovena pomocí diagramu růstové křivky. Při druhé sérii zkoušek dochází ke změně velikosti proudu na hodnotu definovanou podle ČSN EN ISO 8166 [13] a její volba závisí na ustanovení v konstrukční specifikaci [13]:

- a) Hodnota proudu o 10% nižší než minimální hodnota pro výstřik nebo rozstřík.
- b) Hodnota proudu o 200A nižší než minimální hodnota pro výstřik nebo rozstřík.
- c) Hodnota proudu o 10% vyšší než minimální hodnota pro výstřik nebo rozstřík, pro simulaci přetížení elektrod.

Každou zkoušku životnosti je nutné provádět třikrát a ze získaných výsledků stanovit aritmetický průměr a rozsah životnosti elektrod. [13]

1.6 Hodnocení kvality svarů:

Cílem každého svařovacího procesu je vytvoření svarového spoje požadované jakosti. U svarů zhotovených technologií bodového svařování jsou hlavní kritéria pro hodnocení kvality svaru: průměr, symetrie a dostatečný průvar svarové čočky, dále pak vnitřní nespojitost a tvrdost celkového svarového spoje.

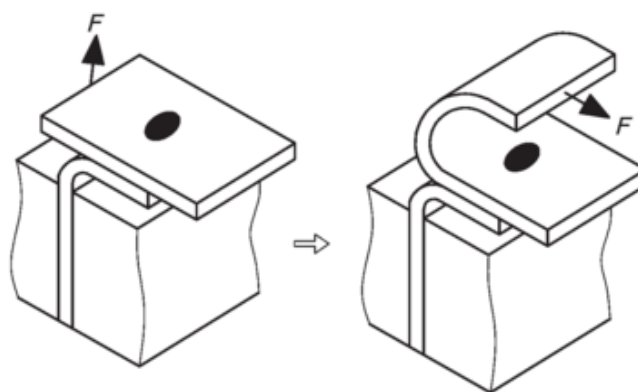
Na kvalitu svarového spoje má vliv především: přitlačná síla, velikost stykové plochy elektrody, geometrie čela elektrody, průběh svařovacího cyklu a celkový odpor svařovací soustavy.

K ověření požadované jakosti svaru a určení jeho parametrů používáme celou řadu speciálních kontrolních metod, které můžeme rozdělit podle toho, zda dojde k poškození vzorku na nedestruktivní (ultrazvukem, kapilární, prozařováním atd.) a destruktivní (tahem, lámavostí atd.). V dalším textu bude pozornost věnována především odlupovací zkoušce a zkoušce stříhem, které jsou součástí prováděného experimentu.

1.6.1 Odlupovací zkouška

Odlupovací zkouška je podle ČSN EN ISO 10447 [18] definována jako: Destruktivní zkouška, při které jsou zkoušeny svary působením odlupovací síly, která vyvolává napětí především kolmo k povrchu dělicí roviny spoje.

Zkouška slouží k určení rozměrů a způsobu porušení svarového spoje. Před zahájením zkoušky bývá obvykle nezbytné, upravit tvar plechů ohnutím jejich konců, aby mohlo být odlupování provedeno. Při samotné zkoušce je jeden z plechů napevno upnut ve svěráku, zatímco druhý je uchycen speciálním nástrojem a namáhán působením odlupovací síly (obr. 20), čímž dochází k pomalému odlupování. Jako nástroje pro odlupování bývají nejčastěji používány odvíjejí nástroje, kleště, štípačky nebo speciální mechanizovaná zařízení. [18]



Obrázek 20: Postup ruční odlupovací zkoušky [18]

K testování používáme přeplátované plechy o tloušťce 0,5 až 3,0 mm. Pokud zkoušku využíváme pro posouzení jakosti ve výrobě, jsou vzorky odebírány přímo ze skutečných dílů, při návrhu nebo seřízení svařovacích parametrů pak testujeme zkušební díly vyrobené ze stejných materiálů, které by byly použity pro výrobu skutečných dílů. Příslušné rozměry zkušebních vzorků jsou stanoveny podle ČSN EN ISO 10447. [18]

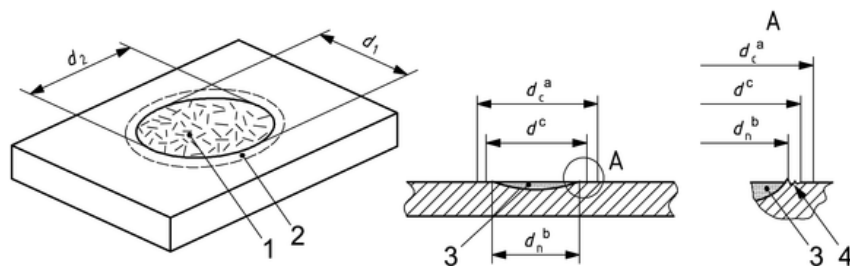
V důsledku odlupování může dojít k deformaci svaru porušením v dělicí rovině (obr. 21), nebo jeho vytržením (obr. 22), které může být úplné nebo částečné. Podle typu porušení se také liší způsob určení rozměrů svaru, při porušení v dělicí rovině je svar měřen kapesní lupou nebo zvětšovací sklem se zabudovanou stupnicí, aby bylo možné určit přesné hranice deformace. Pokud dojde při zkoušce k vytržení svaru, používáme k měření nožové měřidlo nebo měřicí přípravek na podobném principu. Naměřené hodnoty se zaokrouhlují dolů na jedno desetinné místo. [18]

Základním rozměrem každého bodového svaru je střední průměr svarové čočky, který je u symetrického svaru možné stanovit přímo měřením, u nesymetrického nebo částečně vytrženého svaru se určuje výpočtem podle rovnic (5) a (6). [18]

$$d = (d_1 + d_2)/2, \quad (5)$$

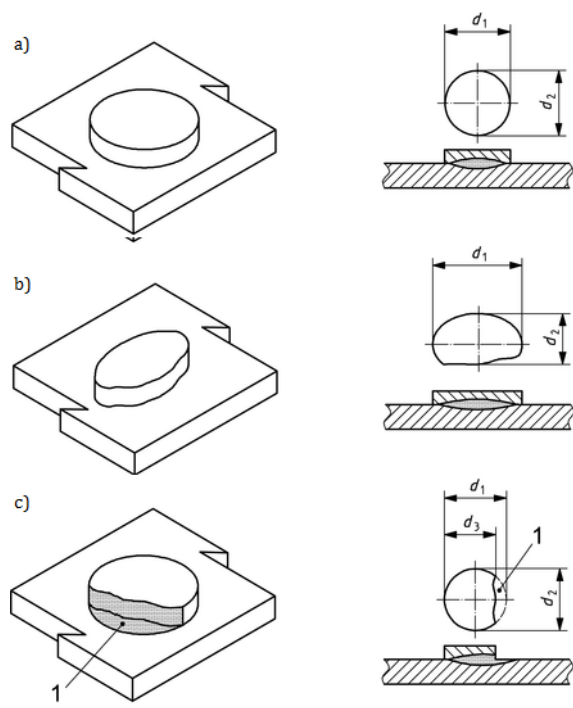
$$d = (d_3 + d_2)/2, \quad (6)$$

kde hodnoty průměrů d_1, d_2, d_3 jsou znázorněny na obr. 21 a 22.



Obrázek 21: Porušení svaru v dělicí rovině [18]

1 - ustřižená svarová čočka; 2 - tepelně zabarvená oblast; 3 - svarová čočka; 4 - drsná lomová oblast; ^a - průměr koróny; ^b - průměr čočky; ^c - d_1 nebo d_2



Obrázek 22: Způsoby porušení svaru vytržením [18]

a) symetrický svar; b) nesymetrický svar; c) částečně vytržený svar

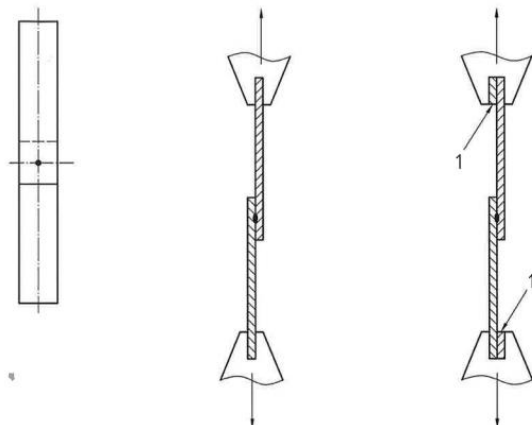
1.6.2 Zkouška stříhem

Zkouška stříhem je určena pro hodnocení pevnosti ve stříhu u svarů, které byly zhotoveny technologií odporového bodového, švového nebo výstupkového svařování. Hlavním účelem zkoušky je stanovení maximální stříhové síly, kterou svarový spoj vydrží.

Po skončení zkoušky je nutné určit velikost maximální stříhové síly a průměru svaru, aby bylo následně možné stanovit pevnost ve stříhu. Velikost maximální stříhové síly lze odečíst přímo ze zkušebního zařízení, zatímco průměr svaru je určován obdobně jako u odlupovací zkoušky (obr. 21, 22). Samotná zkouška je realizována pomocí trhacího stroje, který musí splňovat požadavky podle ISO 7500-1. Na obr. 23 je znázorněn princip zkoušky stříhem. [19]

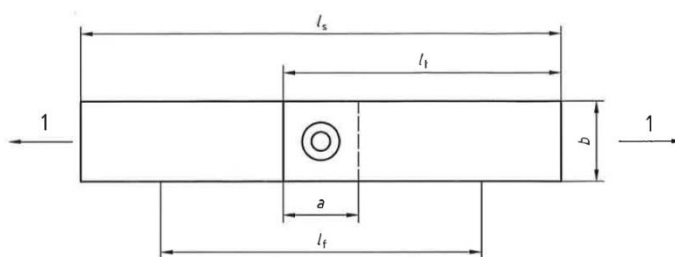
Zkušební vzorky mohou být vyrobeny buď zhotovením určitého počtu bodových svarů, které spojují dva zkušební plechy, jež jsou následně rozděleny na jednotlivé části nebo svařováním každého vzorku samostatně. Ukázka zkušebního

vzorku je znázorněna na obr. 24, příslušné rozměry jsou předepsány podle ČSN EN ISO 14273. [19]



Obrázek 23: Princip zkoušky stříhem [19]

1 - podložný plech



Obrázek 24: Zkušební vzorek pro zkoušku stříhem [19]

1 - směr zkušebního zatížení; a - velikost přeplátování; b - šířka vzorku; l_s - délka vzorku; l_t - délka jednotlivých zkušebních ústřížků, l_f - volná délka mezi čelistmi

Praktická část

2 Experimentální pracoviště

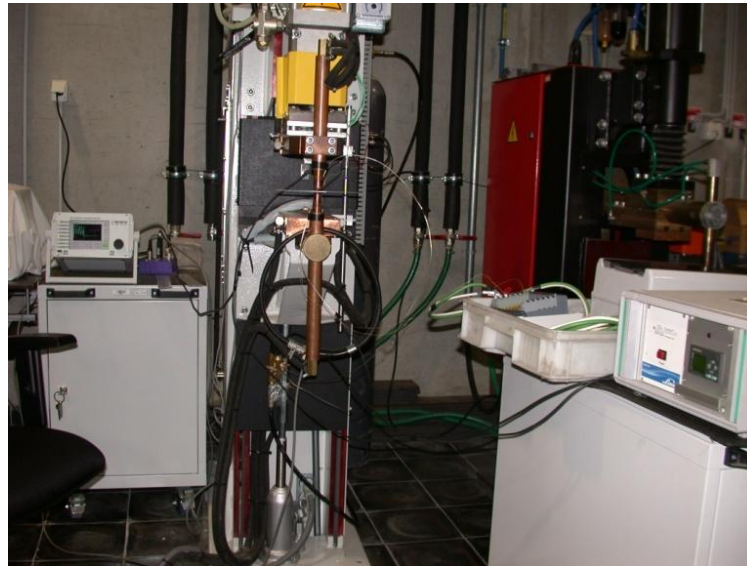
Pro realizaci experimentu bylo použito speciální svařovací pracoviště, které vzniklo na Technické univerzitě v Liberci v rámci řešení projektu v oblasti odporového svařování a je určeno především pro realizaci experimentů, které jsou spojeny s hodnocením vlivu chlazení elektrodových čepiček kapalným oxidem uhličitým. Hlavní částí svařovacího pracoviště je odporový středofrekvenční bodový svařovací stroj TECNA 6124 se zabudovanou řídicí jednotkou TE 700. Na obr. 25 je znázorněn pohled na celé svařovací pracoviště. [24]

Vzhledem k tomu, že při svařovacím procesu může být chlazení elektrod realizováno kombinovaným nebo přímým způsobem pomocí chladicí vody a kapalného oxidu uhličitého, je svařovací pracoviště vybaveno speciálními zařízeními, která zajišťují přívod těchto tekutin. Pro přívod chladicí vody slouží chladicí jednotka Hyfra SVK 140/1, která zajišťuje jak chlazení samotných elektrod, tak i celého stroje. Chladicí voda je v průběhu svařovacího procesu odebírána přímo ze zásobníku, který je součástí chladicí jednotky. [24]

Svařovací pracoviště dále obsahuje jednoduchý systém pro dopravu a dávkování kapalného oxidu uhličitého. Kapalným oxidem uhličitým je nejprve odebírán z tlakové lahve a pomocí příslušných hadic dopravován k solenoidovým ventilům, ke kterým jsou zároveň připojeny i jednotlivé kapiláry. Po průchodu ventilem je kapalným oxidem uhličitým dodáván pomocí kapilár do expanzního prostoru nástroje. Dávkování kapalného oxidu uhličitého je zprostředkováno solenoidovými ventily, které se v určitých časových intervalech střídavě otevírají a zavírají. Tento proces je řízen zařízením "CO₂ Control" od firmy Linde, které k ventilům vysílá krátké elektrické impulsy podle programovatelného časového profilu a tím řídí jejich propustnost. [24]

Svařovací pracoviště je také vybaveno dvěma přístroji, které slouží k monitorování vybraných veličin v průběhu svařovacího procesu, konkrétně se jedná o měřicí zařízení Miyachi MG3 Digital a ABB IP65. Měřicí zařízení Miyachi

MG3 Digital je napojeno přímo na svařovací stroj a sleduje průběhy jednotlivých svařovacích parametrů v čase. Zařízení ABB IP65 souží ke sledování teploty v předem stanoveném místě elektrodové čepičky během svařovacího procesu. [25]

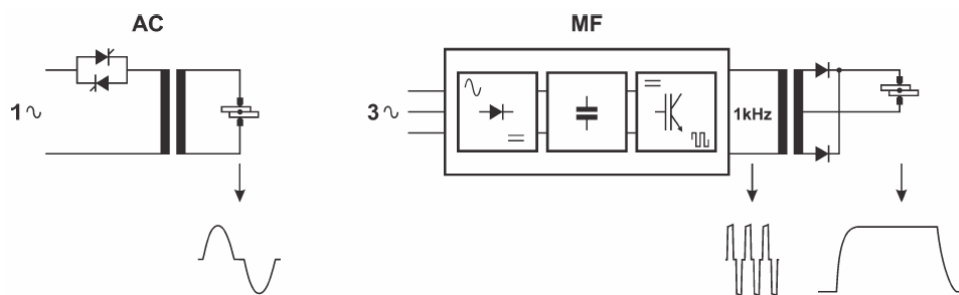


Obrázek 25: Celkový pohled na svařovací pracoviště [24]

2.1 Svařovací stroj TECNA 6124

Svařovací stroj TECNA 6124 je středofrekvenční invertorový stabilní svařovací lis, který je vhodný pro použití v sériové výrobě. Výhodou tohoto typu svařovacího stroje je již zmiňovaná invertorová technologie, která využívá pro usměrňování střídavého proudu třífázový invertor místo standardního jednofázového transformátoru. V invertoru je vstupující proud nejprve usměrněn a poté pomocí IGBT mostu přeměněn na střídavý proud o střední frekvenci 1000 Hz. Takto přeměněný proud je ještě před přivedením do samotného svařovacího procesu přeměněn na stejnosměrný proud pomocí speciálního transformátoru s usměrňovačem. Rozdíl mezi generováním svařovacího proudu u standardního a invertorového svařovacího stroje je znázorněn na obr. 26.

Středofrekvenční invertorové svařovací stroje umožňují nastavení svařovacího času v milisekundách, výrazně prodlužují životnost elektrod, snižují spotřebu svařovacího proudu a umožňují přesnější a rychlejší nastavení velikosti svařovacího proudu. [26]



Obrázek 26: Porovnání způsobu generování svařovacího proudu u standardního a invertorového svařovacího stroje [26]

Celkové konstrukční provedení stroje je realizováno pomocí typizovaných dílů, a proto je možné, zvolit správné rozměry skříně, ramen, desek a válců a tím ovlivnit celkovou velikost svařovacího stroje. Celková konstrukce svařovacího stroje je znázorněna na obr. 27. [26]



Obrázek 27: Invertorový svařovací lis TECNA 6124 [26]

Přítlak elektrod je vyvozován prostřednictvím vzduchového válce, jenž je napojen na pneumatický systém, kterým je svařovací stroj vybaven. Vzduchový válec je vyroben z chromované oceli, která zaručuje jeho dlouhou životnost i při plném zatížení. Válec dále obsahuje ještě antirotační zařízení, které zajišťuje jeho polohu. Regulovatelný dvojitý zdvih válce je řízen klíčem. [27]

Samotný svařovací stroj je chlazen primárně vodou, jejíž teplota by podle konstrukční specifikace neměla překročit hodnotu 30°C. Chladicí voda cirkuluje

uvnitř chladicího okruhu, který ochlazuje především desky, držáky elektrod, elektrody a transformátor, jehož vinutí je chráněno pomocí epoxidové pryskyřice. [27]

Poloha elektrod je ovládána pomocí dvoupolohového elektrického pedálu, který umožňuje sevřít a svařit dva přeplátované plechy. Svařovací stroj také obsahuje doplňkové bezpečnostní prvky jako dvouruční ovladač s časovačem a odnímatelný volič s klíčem, který je standardně dodáván jako příslušenství ke stroji. Mezi další ochranné prvky patří tlačítko k okamžitému vypnutí stroje v případě nouzové situace a ochrana automatickým magnetotermickým přerušením obvodu. [26]

Každý svařovací stroj je charakterizován určitými technickými parametry, které jsou garantovány výrobcem v konstrukční specifikaci. Konkrétní technické parametry svařovacího stroje TECNA 6124 jsou uvedeny v příloze číslo 1.

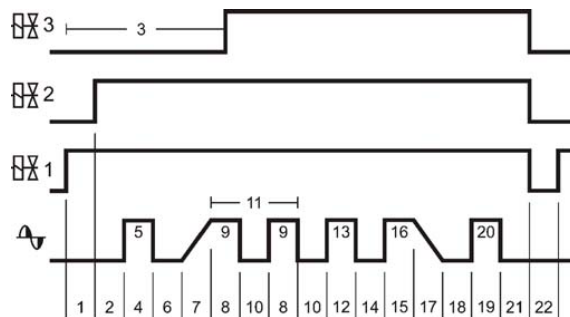
2.2 Řídicí jednotka TE 700

TE 700 je mikroprocesorová řídicí jednotka, která může být instalována a použita k řízení odporových bodových, výstupkových a švových svařovacích strojů. Může ovládat až čtyři různé svařovací transformátory. Zvýšením počtu vstupů a výstupů může sloužit také k řízení automatických svařovacích strojů. [28]

K snadnému programování řídicí jednotky slouží ovládací panel, který obsahuje šest tlačítek a podsvícený alfanumerický LCD displej. Řídicí jednotka umožňuje řízení svařovacího procesu v šesti základních režimech: režim konstantního proudu, režim konstantního výkonu, režim konstantního napětí, režim konstantní energie, režim dynamic a režim fix, každý režim může být ještě upravován pomocí příslušných programovatelných parametrů. Řídicí jednotka umožňuje mimo standardního svařovacího cyklu, svařovat s předehřevem nebo dohřevem. Pomocí příslušné funkce je možné nastavit náběh, doběh nebo pulsaci svařovacího proudu. [28]

Řídicí jednotka dále obsahuje paměť, do které je možné uložit až 300 různých programů. Každému programu může být přidělen osmimístný alfanumerický kód,

který usnadňuje jeho identifikaci. Na obr. 28 je znázorněn příklad sekvenčně provedeného programu, na kterém jsou znázorněny jednotlivé programovatelné parametry. [28]



Obrázek 28: Sekvence parametrů programu [29]

1 - čas pohybu ramen z dlouhého do krátkého zdvihu; 2 - čas od začátku pohybu ramen do začátku svařování; 3 - prodleva před zvýšením přítlaku; 4 - čas přehřevu; 5 - proud přehřevu; 6 - čas chladnutí; 7 - čas náběhu; 8 - čas svařování; 9 - proud svařování; 10 - čas chladnutí; 11 - počet impulsů; 12 - čas svařování 2; 13 - proud svařování 2; 14 - čas chladnutí 3; 15 - čas svařování 3; 16 - proud svařování 3; 17 - čas doběhu proudu; 18 - čas chladnutí 4; 19 - čas dohřevu; 20 - proud dohřevu; 21 - čas přidržení elektrod po svařování; 22 - čas prodlevy mezi jednotlivými svary

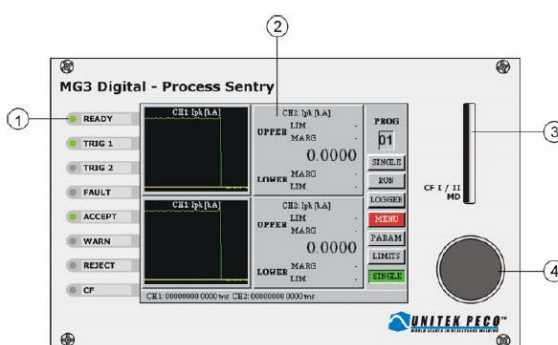
2.3 Měřicí zařízení Miyachi MG3 Digital

Miyachi MG3 Digital je měřicí přístroj, který umožňuje měření dynamických veličin, jež provázejí svařovací proces. Umožňuje měření stejnosměrného a střídavého proudu, efektivní hodnoty a amplitudy proudu, efektivní hodnoty a amplitudy napětí, výkonu a elektrického odporu. Měřicí přístroj je vybaven dvěma nezávislými měřicími kanály, osciloskopem s funkcemi zoom a cursor, obrazovkou s funkcí SPC a dalšími 99 volitelnými programy. Na obr. 29 je znázorněn celkový pohled na měřicí přístroj. [30]



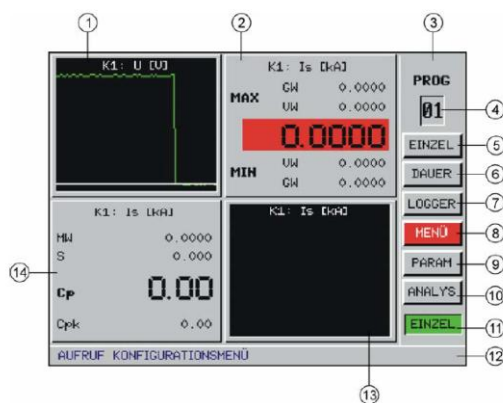
Obrázek 29: Miyachi MG3 Digital [30]

Na obr. 30 je zobrazen ovládací panel, který umožňuje obsluhu ovládat měřicí přístroj a zároveň jí poskytuje přístup k výstupní informaci. Ovládací panel je tvořen obrazovkou (2), signalizačními LED diodami (1), slotem pro paměťové médium (3) a ovládacím tlačítkem (4). Výstup měřicího zařízení je zprostředkován pomocí LED diod a obrazovky. LED diody signalizací poskytují uživateli základní přehled o probíhajícím měření, zatímco obrazovka (obr. 31) znázorňuje průběhy a hodnoty měřených veličin. Výsledky měření je možné ukládat na příslušné paměťové médium. Ovládací tlačítko slouží především k přepínání mezi jednotlivými režimy měření. [30]



Obrázek 30: Ovládací panel měřicího zařízení Miyachi MG3 Digital [30]

1 - signální LED diody; 2 - obrazovka přístroje; 3 - slot pro paměťové médium; 4 - ovládací tlačítko



Obrázek 31: Pohled na obrazovku měřicího zařízení Miyachi MG3 Digital [30]

1 - výstup kvadrantu 1 (Q1); 2 - výstup kvadrantu 2 (Q2); 3 - uživatelské menu; 4 - číslo programu; 5 - zapnutí individuálního měření; 6 - zapnutí trvalého měření; 7 - zapisování; 8 - konfigurační menu; 9 - přehled parametrů; 10 - analýza; 11 - ukazatel aktuálního způsobu měření; 12 - stavová lišta; 13 - výstup kvadrantu 4 (Q4); 14 - výstup kvadrantu 3 (Q3)

2.4 Chladicí jednotka Hyfra SVK 140/1

Chladicí jednotka Hyfra SVK 140/1 je zařízení, které je napojeno na chladicí okruh svařovacího stroje a zajišťuje vstup a výstup chladicí vody. Chladicí jednotka jako celek je poměrně složité zařízení, které je tvořeno: kovovým rámem, koaxiálním výparníkem, kompresorem ZR 72, vzduchem chlazeným kondenzátorem, digitálním termostatem, chladičem IP 54, termostatem bránícím zamrznutí kapaliny, nádrží, manometrem a čerpadlem. Celkový pohled na otevřenou chladicí jednotku je znázorněn na obr. 32.



Obrázek 32: Chladicí jednotka Hyfra SVK 140/1 [31]

Chladicí jednotka je opatřena třemi přípojkami, první přípojka slouží pro přívod chladicí vody do nádrže jednotky a je napojena na její zdroj. Zbylé dvě přípojky jsou napojeny na chladicí okruh svařovacího stroje, jedna slouží pro přívod a druhá pro odvod chladicí vody z okruhu. Cirkulace vody uvnitř chladicího okruhu je zajištěna čerpadlem. Ještě před spuštěním chladicí jednotky je nutné naplnit nádrž chladicí vodou. Při samotném chladicím procesu je voda odebírána přímo z nádrže a před vstupem do chladicího oběhu svařovacího stroje dochází pomocí chladiče k jejímu ochlazení na požadovanou teplotu. Po výstupu z chladicího okruhu stroje se opět vrací do nádrže. [31]

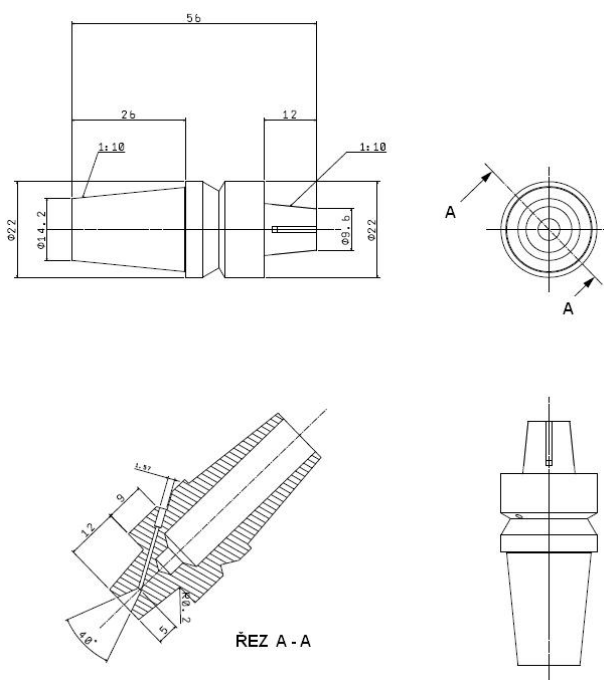
Jednotlivé technické parametry, které charakterizují příslušný typ chladicí jednotky, jsou uvedeny v tabulce číslo 1.

Tabulka 1: Základní technické parametry jednotky Hyfra SVK 140/1[31]

Parametr	Hodnota	Jednotky
Výkon kompresoru	6,2	kW
Celkový výkon jednotky	9	kW
Maximální hodnota proudu	15,6	A
Objem nádrže	330	l
Tlak vody	3,8	bar
Nominální průtok vody	2,9	m ³ /hod
Celková hmotnost	320	kg

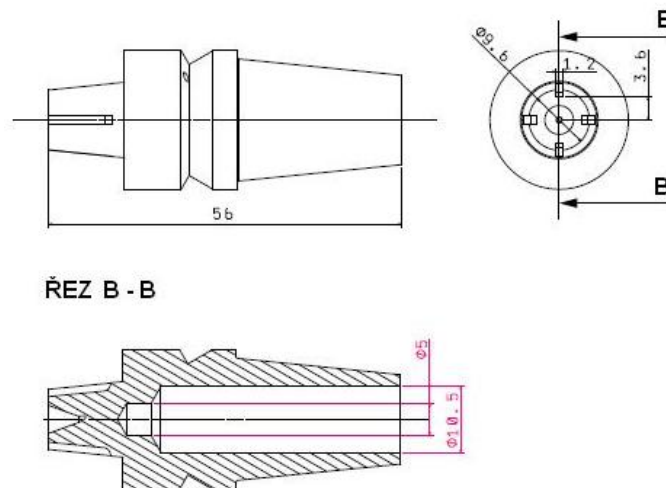
2.5 Držák elektrodových čepiček

Konstrukční řešení držáku elektrodových čepiček je realizováno podobně jako standardní adaptér pro upínání elektrodových čepiček s tím rozdílem, že kromě dutiny pro přívod chladicí vody obsahuje expanzní komoru, kanál pro přívod kapalného oxidu uhličitého a drážky pro odvod expandujícího plynu. Spojení mezi elektrodovou čepičkou a držákem je zprostředkováno pomocí samosvorného kužele. [24]



Obrázek 33: Výkres držáku elektrodové čepičky a řez v rovině přívodního kanálu [24]

Obr. 33 a 34 znázorňují výrobní výkresy držáku elektrodových čepiček včetně příslušných rozměrů, obr. 33 zobrazuje především řez rovinou, která prochází kanálem pro přívod kapalného CO₂. Na obr. 34 jsou doplněny ostatní rozměry, které nebylo možné zaznamenat v předchozím obrázku a řez rovinou, která prochází drážkami, jež slouží pro odvod expandujícího oxidu uhličitého.



Obrázek 34: Výkres držáku elektrodové čepičky a řez v rovině drážek pro odvod expandujícího oxidu uhličitého [24]

Po spojení držáku elektrodových čepiček a elektrodové čepičky v jeden celek následuje upnutí celého nástroje do držáku elektrod, toto spojení je opět zprostředkováno pomocí samosvorného kužele. [24]

Jak již bylo zmíněno v jedné z předchozích kapitol (1.4.1, obr. 18), příslušný držák umožňuje chlazení elektrodové čepičky buď kombinovaným, nebo přímým způsobem. Při samotném svařovacím procesu je chladicí voda přiváděna do chladicí dutiny držáku pomocí střední trubky z centrálního chladicího okruhu svařovacího stroje, do kterého se následně vrací. Zatímco kapalný oxid uhličitý je pomocí kapilár v určitých časových intervalech dodáván do expanzní dutiny držáku elektrodové čepičky. V expanzní dutině elektrodové čepičky dochází ke skupenské přeměně kapalného CO₂ na směs plynného oxidu uhličitého a tzv. suchého ledu, který dále sublimuje a odvádí teplo z elektrodové čepičky. Expandující plyn odchází expanzními otvory, kterými je opatřeno kuželové zakončení adaptéru do okolního prostředí. [24]

3 Základní informace

V následující kapitole jsou uvedeny základní informace o hlavních faktorech, jejichž vliv na životnost elektrodových čepiček byl zkoumán (svařovaný materiál, hodnocená elektrodová čepička a způsob svařování).

Pro zkoušku byl zvolen plech o tloušťce 0,7 mm z materiálu HC 220BD + Z100MCO používaný ve firmě Škoda auto. Jedná se o žárově pozinkovaný plech s oboustranným povlakem zinku 100 g/m², který podle [32] obsahuje: 0,1% C; 0,5% Si; 0,7% Mn; 0,06% P; 0,025% S; 0,1% Al; 0,12% Ti; 0,09% Nb.

Mechanické vlastnosti zkoušeného plechu [32]: $R_e = 220 - 280$ MPa,

$$R_p = 320 - 400 \text{ MPa,}$$

$$A_{80} = 32\%.$$

Pro zkoušku byly použity elektrodové čepičky Luvata Nitrode, které jsou zhotoveny z elektrodového materiálu skupiny C, konkrétně z disperzně zpevňované slitiny mědi C15760, jejíž chemické složení je podle [34]: Cu 98,77% - 98,88%, Al 0,58% - 0,62%, O₂ 0,52% - 0,58%, Pb max. 0,01%, Fe max. 0,01%.

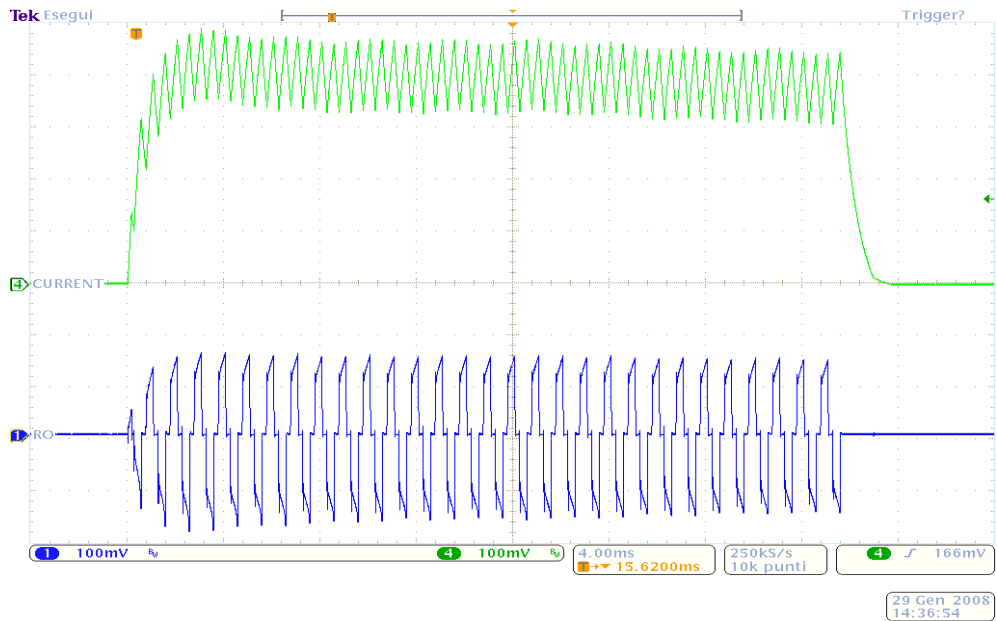
Příslušné rozměry a tvar elektrodových čepiček byly stanoveny podle ČSN EN ISO 5821 [35]:

Čepička elektrody pro bodové svařování ISO 5821 - F0 - 16 - 20 - 8 - C20/1

Celý svařovací proces byl realizován za použití svařovacího program FIX, který udržuje množství energie dodávané invertorem na konstantní hodnotě. Nastavitelná velikost této energie se udává v procentech a pohybuje se v rozmezí 5% až 100%. Svařovací program FIX se také vyznačuje tím, že při jeho použití nedochází k žádným úpravám svařovacího proudu. V průběhu svařovacího procesu pak průběh skutečného svařovacího proudu není konstantní a je ovlivňován například opotřebením elektrod nebo stavem povrchu svařovaných dílů. [29]

Svařovací program FIX je možné dále upravovat pomocí příslušných programovatelných parametrů, které jsou uvedeny v příloze číslo 2.

V horní části obr. 35 je znázorněn příklad průběhu svařovacího proudu při použití svařovacího programu FIX, v dolní části průběh energie dodávané invertorem. [29]



Obrázek 35: Průběhy svařovacího proudu a energie dodávané invertorem při použití svařovacího programu FIX [29]

4 Metodický postup experimentu

Hlavním cílem experimentu bylo posouzení vlivu chlazení pomocí kapalného oxidu uhličitého na životnost elektrodových čepiček. Kapalným oxid uhličitý byl dodáván pomocí kapilár o průměru 0,5 mm do expanzního prostoru držáku elektrodové čepičky v časovém intervalu 2 s, doba výstřiku byla nastavena na 0,5 s. Aby bylo možné na konci zkoušky stanovit, jakým způsobem se projeví opotřebení pracovní plochy nástroje na průběhu vybraných veličin, docházelo během zkoušky k zaznamenávání průběhů jednotlivých svařovacích parametrů a teploty.

Samotný experiment byl rozdělen do čtyř částí a to:

- a) přípravné operace,
- b) realizace zkoušky životnosti,
- c) mechanické zkoušky zkušebních vzorků,
- d) zhodnocení výsledků.

4.1 Přípravné operace

První část experimentu se skládala z tzv. přípravných operací, tedy úkonů, které bylo nutné vykonat ještě před zahájením samotné zkoušky. Jednalo se především o činnosti spojené s přípravou vzorků a experimentálního pracoviště.

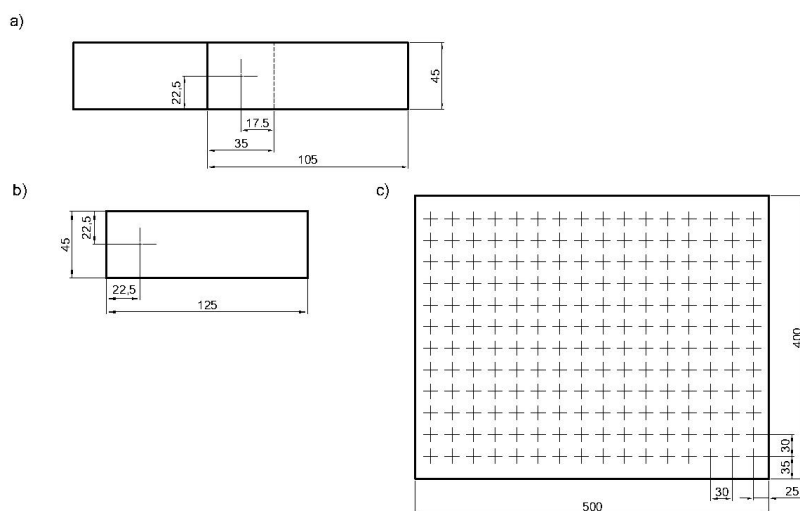
4.1.1 Příprava vzorků

Pro realizaci experimentu byly použity tři druhy zkušebních vzorků. Rozměry zkušebního plechu pro zhotovení svarů, které se nevyhodnocují, byly zvoleny s ohledem na ČSN EN ISO 8166 [13]. Příslušná norma předepisuje minimální rozměry zkušebního plechu 350x470 mm, v našem případě byl zvolen zkušební vzorek o rozměrech 400x500 mm.

Volba rozměrů zkušebních vzorků pro zkoušku stříhem a odlupovací zkoušku se od ČSN EN ISO 8166 [13] lišila z důvodu realizace mechanizovaných zkoušek. Zkušební vzorky pro odlupovací zkoušky byly s ohledem na ČSN EN ISO

14270 [36] zvoleny 45x125 mm. Pro zkoušku stříhem byly podle ČSN EN ISO 14273 [19] stanoveny rozměry vzorku 45x105 mm.

Všechny zkušební vzorky byly zhotoveny ze stejného materiálu a měly shodnou tloušťku 0,7 mm. Na zkušební plechy bylo před zahájením zkoušky nutné vyznačit podle [13, 19, 36] umístění jednotlivých bodů. Na obr. 36 jsou znázorněny jednotlivé zkušební vzorky včetně příslušných rozměrů.



Obrázek 36: Zkušební vzorky pro jednotlivé zkoušky

a) zkušební vzorek pro zkoušku stříhem; b) zkušební vzorek pro odlupovací zkoušku; c) zkušební vzorek pro svary, které se nevyhodnocují

4.1.2 Příprava experimentálního pracoviště

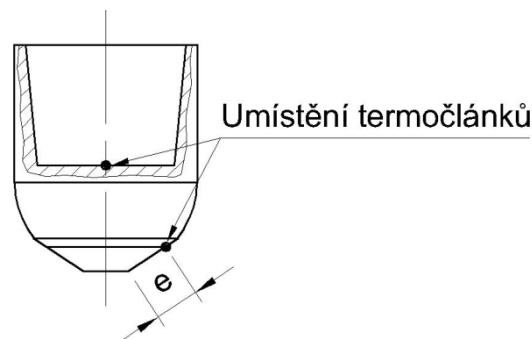
Nejdříve bylo nutné propojit měřicí zařízení se svařovacím strojem a následně provést jeho správné nastavení. Po zapnutí měřicího přístroje a ověření jeho funkčnosti bylo na speciálním plechu zhotoveno několik zkušebních svarů. Během tohoto zkušebního svařovacího procesu byly zaznamenávány průběhy jednotlivých svařovacích parametrů, které následně umožnily provést vhodné nastavení měřicího přístroje. Vzhledem k tomu, že tento svařovací proces nebyl součástí zkoušky životnosti, muselo být pro jeho realizaci použito jiných elektrodových čepiček a plechů, než pro samotnou zkoušku.

Před zahájením zkoušky bylo nezbytné upravit pracovní část nástroje pro potřeby zkoušky. Tato úprava byla realizována soustružením pracovní části

elektrodové čepičky do kuželovitého tvaru s vrcholovým úhlem 120° a průměrem pracovní plochy 4 mm (průměr pracovní plochy elektrodové čepičky pro zkoušku životnosti by měl přibližně odpovídat hodnotě $5 \cdot \sqrt{t_{pl}}$, tj. v našem případě 4,18 mm). Velikost průměru pracovní plochy byla stanovena podle ČSN EN ISO 14373 [37]. Pracovní část elektrodové čepičky byla dále opatřena tenkou ryskou, která se nacházela ve vzdálenosti 4 mm od pracovní plochy a označovala umístění termočlánků.

Po této úpravě pracovní plochy byly na elektrodové čepičky pomocí kondenzátorové svářečky přivařeny termočlánekové dráty. Jeden termočlánek byl umístěn ve vnitřním prostoru elektrodové čepičky a druhý na její pracovní části ve vzdálenosti $e = 4$ mm od pracovní plochy. Na obr. 37 je vyznačena poloha příslušných termočlánků vzhledem k elektrodové čepičce.

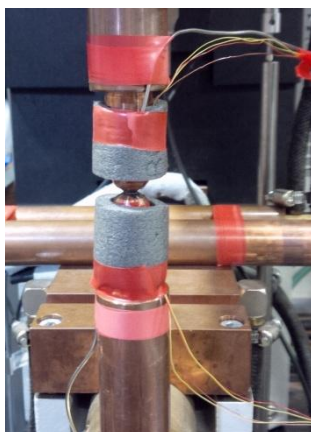
Termočlánekové dráty o průměru 0,25mm byly následně propojeny s měřicím zařízením ABB IP65, čímž bylo umožněno sledování teploty v průběhu svařovacího procesu. Jako materiál termočlánu byla zvolena kombinace kovů Chromel - Almel.



Obrázek 37: Znázornění polohy termočlánků na elektrodové čepičce

e - vzdálenost termočlánu od pracovní plochy elektrodové čepičky

Po přivaření termočlánků byly elektrodové čepičky upnuty prostřednictvím speciálního držáku (obr. 33, obr. 34) do držáku elektrod. Následovalo zavedení kapilár a odizolování elektrodových čepiček pomocí vrstvy polyuretanové pěny, aby bylo umožněno co nejefektivnější chlazení (obr. 38).



Obrázek 38: Připravené elektrodové čepičky s přivařenými termočlánky

4.2 Zkouška životnosti

Realizovaná zkouška životnosti se v některých svých částech odlišovala od postupu předepsaného v ČSN EN ISO 8166 [13]. Rozdíl byl především ve volbě svařovacích parametrů a způsobu vyhodnocení zkušebních vzorků pro odlupovací zkoušku a zkoušku stříhem.

4.2.1 Určení svařovacích parametrů

V první fázi zkoušky životnosti bylo nezbytné zvolit svařovací podmínky tak, aby počáteční průměr svaru přibližně odpovídal počátečnímu průměru pracovní části elektrodové čepičky. V našem případě byla nejprve podle ČSN EN ISO 14373 [37] zvolena konstantní hodnota tlaku vzduchu ve válci 4 bary (přibližně 2000N) a doby svaru 160 ms.

Pro tyto konstantní hodnoty byla na základě zkušeností z předchozích experimentů [16, 23, 24, 25] předběžně stanovena hodnota energie dodávané invertorem $RO = 18,5\%$. Následně bylo svařeno 10 zkušebních vzorků pro odlupovací zkoušku při různých hodnotách RO . Tyto zkušební vzorky byly určeny pro ověření předem stanovených předpokladů.

Výsledky odlupovací zkoušky těchto zkušebních vzorků jsou uvedeny v tabulce číslo 2. Tabulka neobsahuje údaje o svarech číslo 4 a 9, u kterých byla provedena ruční odlupovací zkouška ve svěráku ihned po zhotovení určité série zkušebních svarů při dané hodnotě RO a byly shledány jako nevyhovující.

Tabulka 2: Výsledky odlupovací zkoušky pro svary číslo 1 až 10 [31]

Číslo svaru:	d_1 [mm]	d_2 [mm]	d [mm]	RO [%]
1	3,9	4,1	4	18
2	4,5	4,5	4,5	
3	4,4	4,8	4,6	
5	4,5	4,7	4,6	18,2
6	5,1	5,1	5,1	18,4
7	4,6	4,9	4,8	
8	4,7	4,9	4,8	
10	4,5	4,7	4,6	

Na základě výsledků byl ověřen předpoklad a velikost RO byla stanovena 18,5%, pro niž byly na řídicí jednotce nastaveny tyto hodnoty:

Přítlak elektrod: 4 bary

Čas náběhu proudu: 5 ms

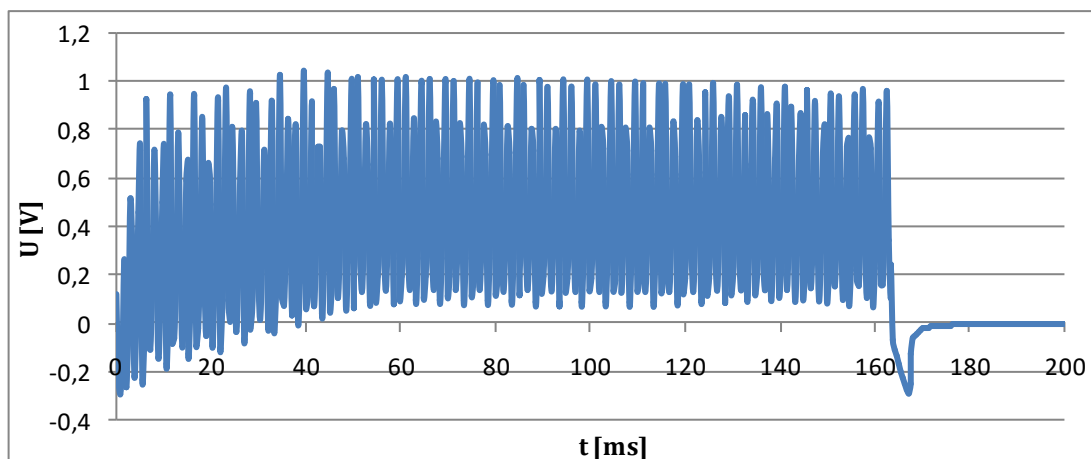
Čas svařování: 160 ms

Počet impulzů: 1

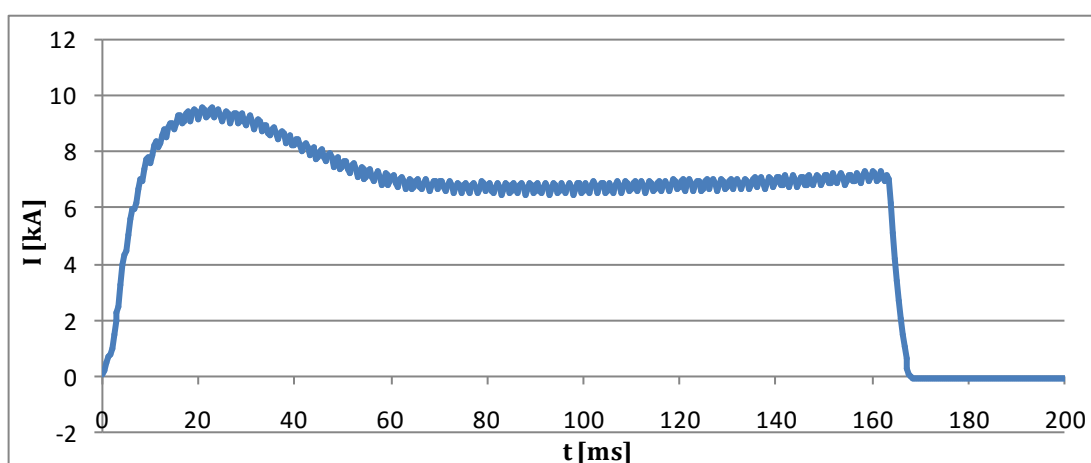
Při daném nastavení stroje byla podle ČSN EN ISO 8166 [13] stanovena kadence svařování 30 svarů za minutu.

Po stanovení svařovacích parametrů bylo svařeno 5 vzorků pro odlupovací zkoušku a 3 vzorky pro zkoušku stříhem. Tyto vzorky byly určeny pro stanovení výchozí hodnoty odlupovací síly, stříhové síly a průměru svaru. Výchozí hodnota průměru svarové čočky byla určena 4,7 mm (průměrná hodnota ze středních průměrů svarů č. 11 až 15). Zhotovení těchto svarů rovněž umožnilo, stanovit průběhy jednotlivých svařovacích parametrů na počátku zkoušky životnosti.

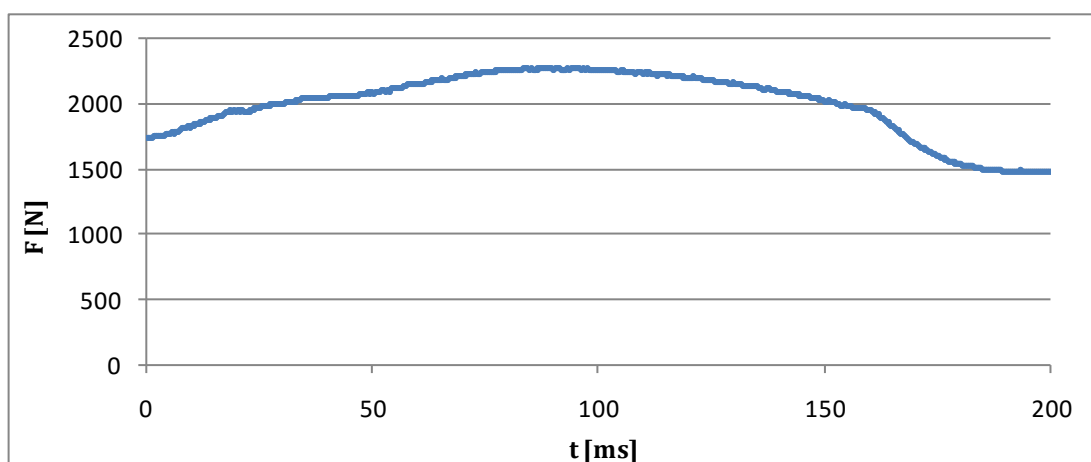
Na grafech 1 až 4 jsou postupně znázorněny průběhy svařovacích parametrů při daném nastavení stroje během jednoho svařovacího cyklu. Doba měření byla na měřicím zařízení nastavena 400 ms. U grafů 1 až 3 je hodnota času na vodorovné ose uváděna pouze do 200 ms, jelikož za touto hodnotou je průběh dané veličiny konstantní.



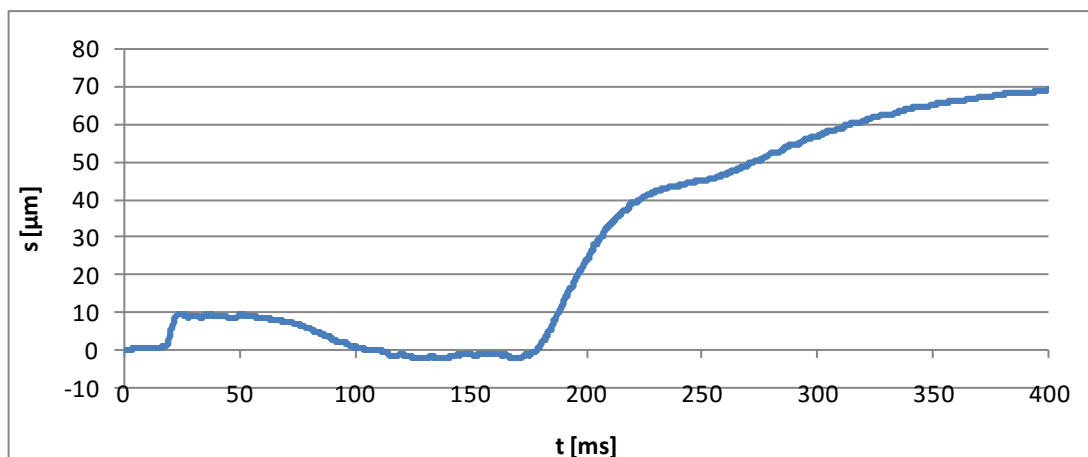
Graf 1: Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro svary č. 11 až 18



Graf 2: Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro svary č. 11 až 18



Graf 3: Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro svary č. 11 až 18



Graf 4: Průběh dráhy pohybu ramen v závislosti na čase pro svary č. 11 až 18

4.2.2 Realizace zkoušky životnosti

Zkouška životnosti byla realizována na zkušebních vzorcích, které již byly popsány v kapitole 4.1.1, kdy vždy došlo nejprve ke zhotovení určitého počtu svarů, které se nevyhodnocovaly a až poté ke svařování vzorků pro odlupovací zkoušku a zkoušku stříhem. V průběhu zkoušky životnosti docházelo k zaznamenávání průběhů svařovacích parametrů a teploty. Průběhy teploty ve vybraných místech elektrodové čepičky byly snímány při realizaci nevyhodnocujících se svarů. K měření svařovacích parametrů docházelo při svařování zkušebních vzorků pro odlupovací zkoušku a zkoušku stříhem.

Po stanovení svařovacích parametrů a svaření prvních vzorků pro odlupovací zkoušku a zkoušku stříhem bylo zahájeno svařování. Na zkušebním plechu bylo umístěno prvních 74 bodů, které se nevyhodnocovaly, načež došlo ke svaření pěti vzorků pro odlupovací zkoušku a tří vzorků pro zkoušku stříhem. První série byla tvořena svary číslo 19 až 100. Následovalo zhotovení druhé série, která byla tvořena 100 svary (92 svarů, které se nevyhodnocovaly, 5 svarů pro odlupovací zkoušku a 3 svary pro zkoušku stříhem). První dvě série byly tvořeny menším počtem svarů z důvodu zlepšení vypovídající schopnosti zkoušky. Další série svarů již byly realizovány podle standardního postupu, na každých 192 svarů, které se nevyhodnocovaly, bylo svařeno 5 vzorků pro odlupovací zkoušku a 3 vzorky pro zkoušku stříhem.

Vzhledem k průběhu zkoušky a principu funkce měřicího zařízení, bylo nutné před každou sérií nevyhodnocujících se svarů zapnout snímání teploty a po jejím dokončení snímání zase vypnout.

V příloze číslo 3 jsou znázorněny průběhy vybraných svařovacích parametrů, které byly zaznamenány při svařování zkušebních vzorků pro odlupovací zkoušku a zkoušku stříhem na konci každé série svarů. V průběhu zkoušky docházelo k vyhodnocování pouze svařovacího proudu, napětí na elektrodách a elektrodové síly, jelikož průběh dráhy pohybu ramen neposkytoval přesné údaje. Nepřesnost při zaznamenávání průběhu dráhy pohybu ramen byla způsobena polohou indukčního snímače.

Zkouška byla ukončena po zhotovení 800 svarů především z důvodu velké nesymetrie tvaru svarových čoček. Po ukončení zkoušky došlo ke stanovení konečného průměru pracovních ploch elektrodových čepiček. Konečná velikost průměru pracovní plochy horní elektrodové čepičky byla stanovena 5,07 mm, zatímco konečná velikost u spodní elektrodové čepičky byla 5,02 mm.

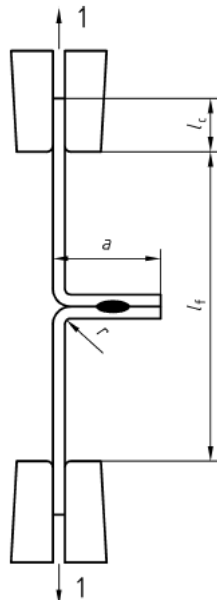
4.2.3 Odlupovací zkouška

Po svaření všech zkušebních plechů a ukončení zkoušky životnosti bylo nutné upravit vzorky pro odlupovací zkoušku tak, aby jejich tvar a rozměry odpovídaly ČSN EN ISO 14270 [36]. Úprava probíhala pomocí ručních nástrojů, kdy byl zkušební vzorek nejprve upnut do svěráku na délce $a = 35$ mm a poté byly jeho konce ohnuty tak, aby výsledný tvar odpovídal obr. 39.

Po úpravě zkušebních plechů byly oba konce každého vzorku označeny ryskou na délce $l_c = 40$ mm, která znázorňovala polohu vzorku vůči čelistem trhacího stroje. Takto upravený vzorek byl upnut do čelistí trhacího stroje TIRA test 2300 a postupně zatěžován rychlostí 50 mm/min, dokud nedošlo k jeho mechanickému poškození.

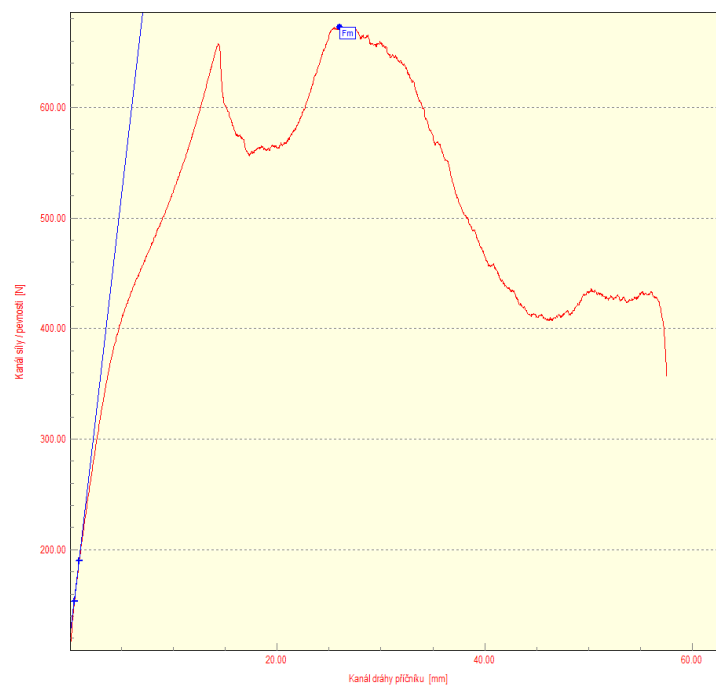
Trhací zařízení bylo propojeno s počítačem, který prostřednictvím programu LabNET zaznamenával a vyhodnocoval výsledky zkoušky. V průběhu zatěžování docházelo k zaznamenávání průběhu síly v závislosti na dráze příčníků, ze kterého

byla po skončení zkoušky stanovena hodnota maximální odlupovací síly F_{om} .
 Obr. 40 znázorňuje průběh zatěžující síly, na kterém je zároveň vyznačena hodnota maximální odlupovací síly pro svar číslo 94.



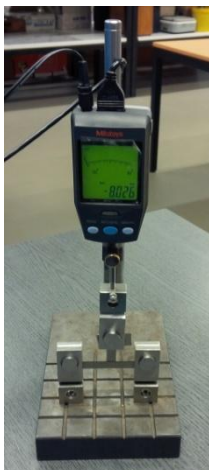
Obrázek 39: Schéma odlupovací zkoušky a rozměry vzorku

1 - Směr odlupovací síly



Obrázek 40: Průběh síly v závislosti na dráze příčniku při odlupovací zkoušce pro svar č. 94

Po skončení odlupování byly u každého vzorku pomocí měřicího přípravku se zařízením Mitutoyo (obr. 41) určeny rozměry svarové čočky d_1 a d_2 . Z naměřených hodnot pak byla výpočtem pro jednotlivé svary stanovena velikost středního průměru d (způsob výpočtu byl již popsán v kapitole 1.6.1).



Obrázek 41: Měřicí přípravek se zařízením Mitutoyo

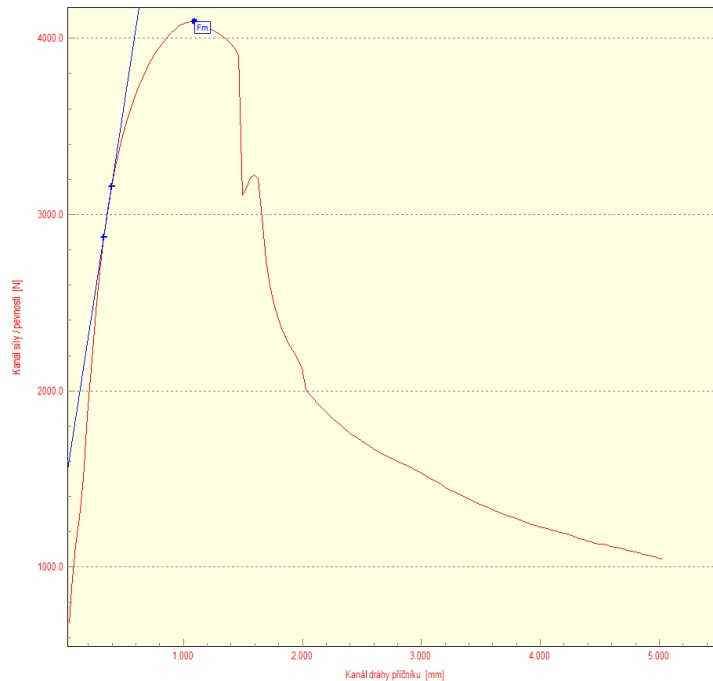
Výsledky odlupovací zkoušky jsou uvedeny v příloze číslo 4.

4.2.4 Zkouška stříhem

Stejně jako v předchozím případě byly oba konce zkušebního vzorku nejprve označeny ryskou na délce 40 mm a podle rysky následně upnuty do čelistí trhacího zařízení TIRA test 2300 (délka mezi čelistmi byla 95 mm). Po upnutí byl zkušební vzorek postupně zatěžován stříhovou silou rychlostí 50 mm/min. Zkouška byla ukončena v okamžiku, kdy dráha příčnicku dosáhla vzdálenosti 5 mm.

V průběhu zkoušky byl opět zaznamenáván průběh zatěžující síly v závislosti na dráze příčnicku pomocí programu LabNET (obr. 42), který po ukončení zatěžování z průběhu stanovil velikost maximální stříhové síly F_{sm} .

V příloze číslo 5 jsou uvedeny výsledky zkoušky stříhem. Tabulka udává jednotlivým svarům pouze hodnoty maximální stříhové síly, protože vzhledem k tvaru zkušebních vzorků a charakteru porušení jednotlivých svarů nebylo možné stanovit velikosti průměrů s dostatečnou přesností.



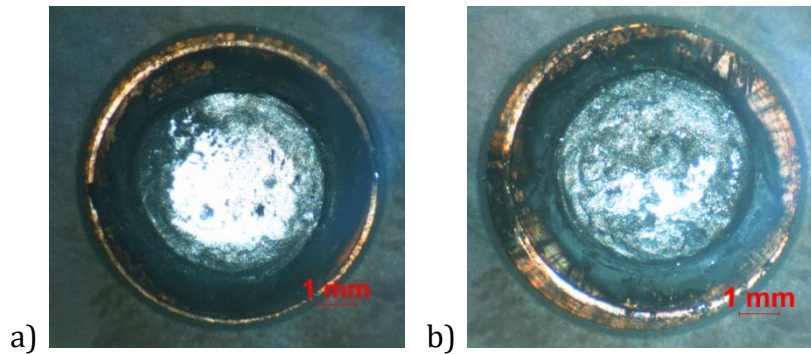
Obrázek 42: Průběh síly v závislosti na dráze příčniku při zkoušce stříhem pro svar č. 99

4.2.5 Zhodnocení výsledků jednotlivých zkoušek

Vzhledem k velké nesymetrii svarových čoček na konci předposlední série svarů (svary 401 až 600) a průběhu svařovacího procesu při realizaci poslední série svarů (svary 601 až 800) byla životnost daných elektrodových čepiček stanovena na 800 svarů.

V průběhu zkoušky došlo ke změně rozměrů pracovních částí jednotlivých elektrodových čepiček, jejichž výchozí rozměr byl 4 mm. Konečná velikost pracovní plochy u horní elektrodové čepičky byla stanovena 5,07 mm, u spodní elektrodové čepičky 5,02 mm. Změnou velikosti pracovní plochy byla zapříčiněna především změna průměru svarové čočky z výchozí hodnoty 4,7 mm na 2,9 mm (průměrná hodnota stanovená z průměrů svarových čoček 793 až 797).

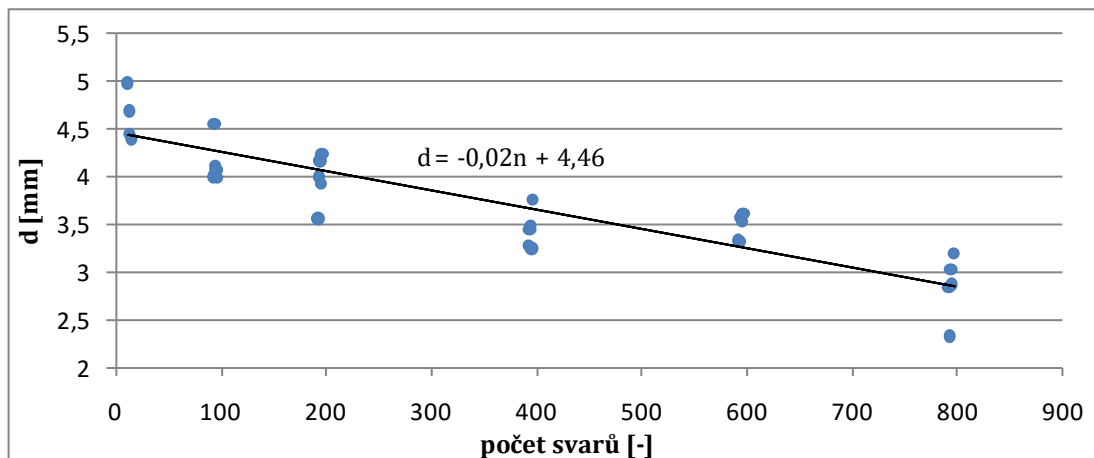
Na obr. 43 jsou znázorněny snímky pracovních ploch příslušných elektrodových čepiček, které byly po skončení zkoušky pořízeny mikroskopem. Z výsledků je patrné, že opotřebení obou elektrodových čepiček bylo přibližně stejné.



Obrázek 43: Stav pracovních ploch elektrodových čepiček po provedení zkoušky životnosti

a) horní elektrodová čepička; b) spodní elektrodová čepička

Na grafu 5 je zobrazena křivka, která znázorňuje změnu průměru svarové čočky v závislosti na počtu zhotovených svarů. Vzhledem k charakteru rozložení bodů v grafu byla výsledná křivka stanovena metodou lineární regrese a je popsána rovnicí $d = -0,02 \cdot n + 4,46$ (kde n označuje počet zhotovených svarů). Z křivky je patrný výrazný pokles velikosti středního průměru svarové čočky, kdy rozdíl mezi počátečním a konečným rozměrem byl přibližně 1,5 mm.

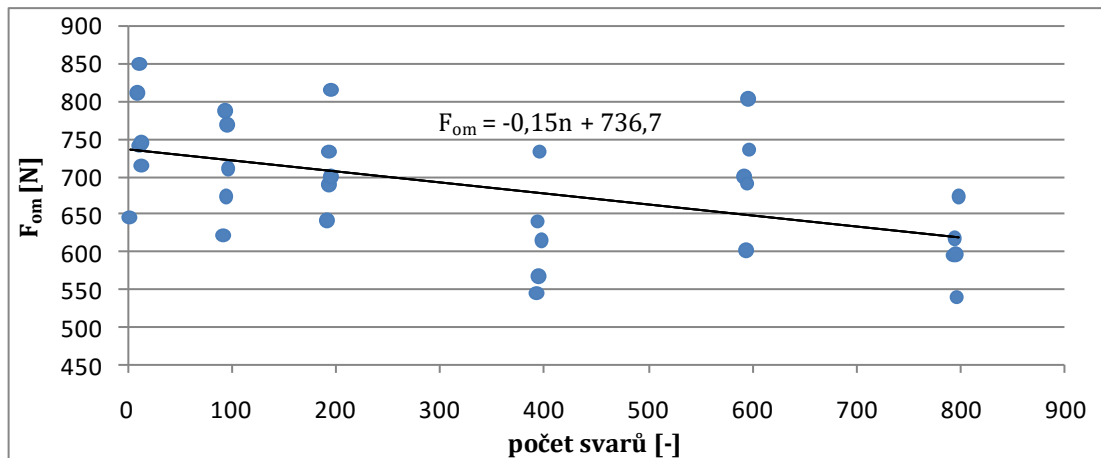


Graf 5: Závislost středního průměru svarové čočky na počtu zhotovených svarů

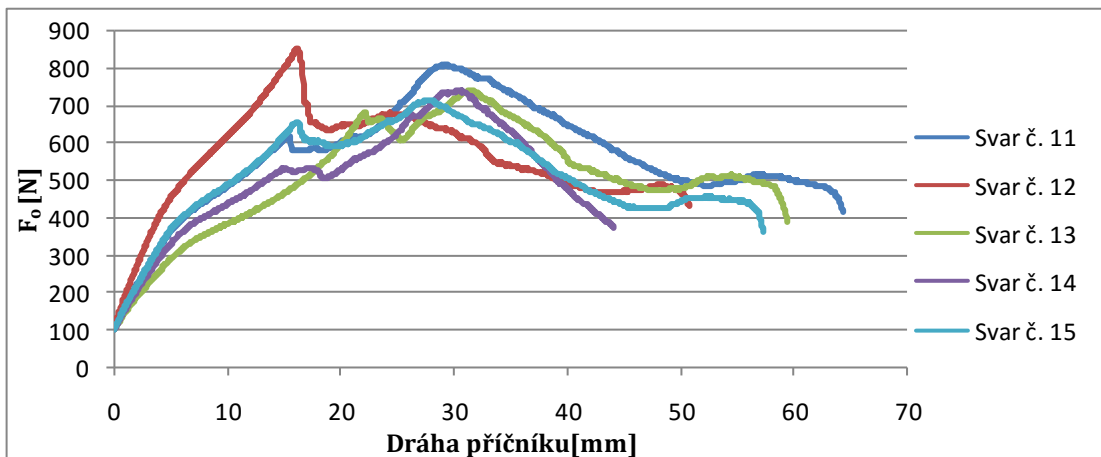
Po ukončení odlupovací zkoušky byla stanovena grafická závislost maximální odlupovací síly na počtu zhotovených svarů (graf č. 6). Z křivky, která byla určena pomocí lineární regrese ($F_{om} = -0,15 \cdot n + 736,7$) vyplývá, že mezi začátkem a koncem zkoušky došlo k poklesu maximální odlupovací síly přibližně o 150 N.

Na grafech 7 a 8 jsou znázorněny průběhy odlupovací síly v závislosti na dráze příčnicku pro jednotlivé svary. Z grafů je mimo poklesu odlupovací síly s přibývajícím počtem svarů znatelný především pokles plastičnosti. Zatímco zkušební svary z první série (graf 7) byly působením odlupovací síly roztrženy

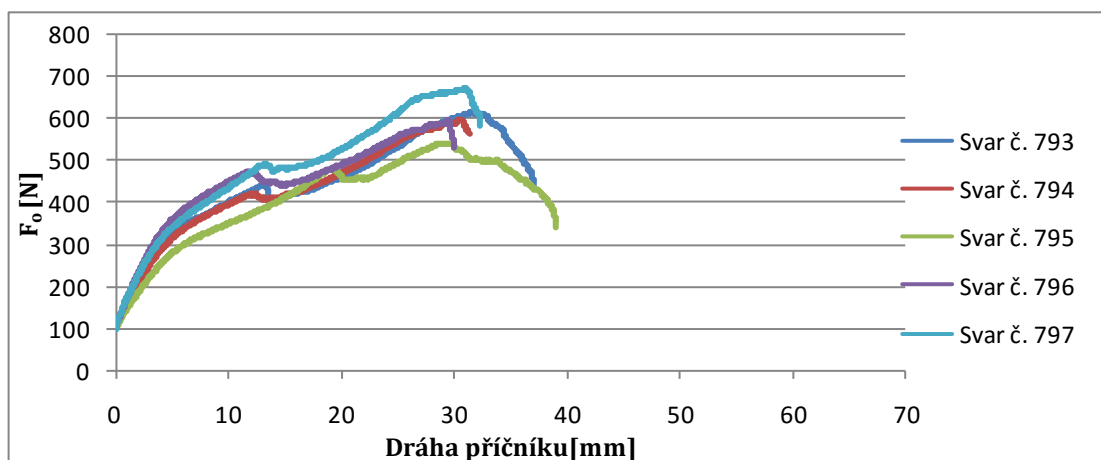
přibližně v okamžiku, kdy dráha příčnicku dosáhla hodnoty 60 mm, u poslední série svarů (graf 8) se tato hodnota pohybovala kolem 30 mm.



Graf 6: Závislost maximální odlupovací síly na počtu zhotovených svarů.

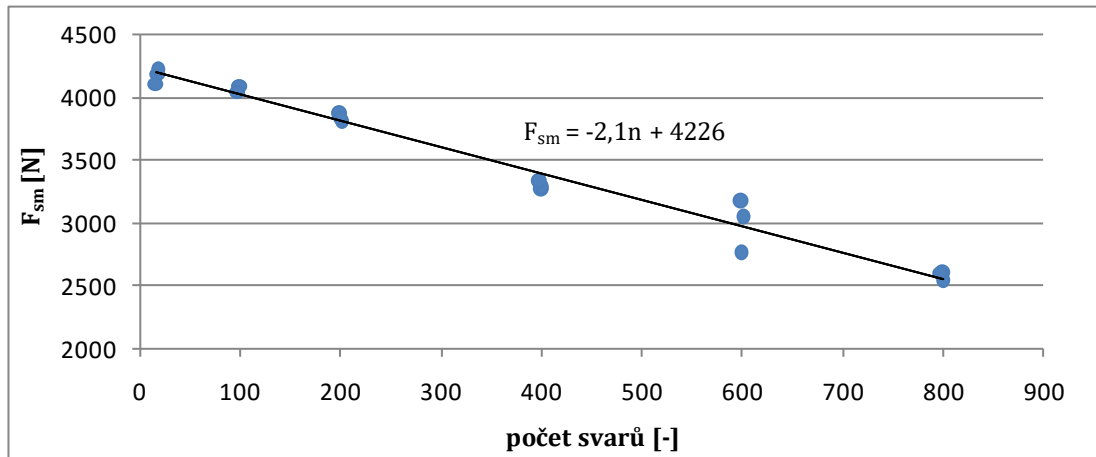


Graf 7: Závislost odlupovací síly na dráze příčnicku pro svary č. 11 až 15



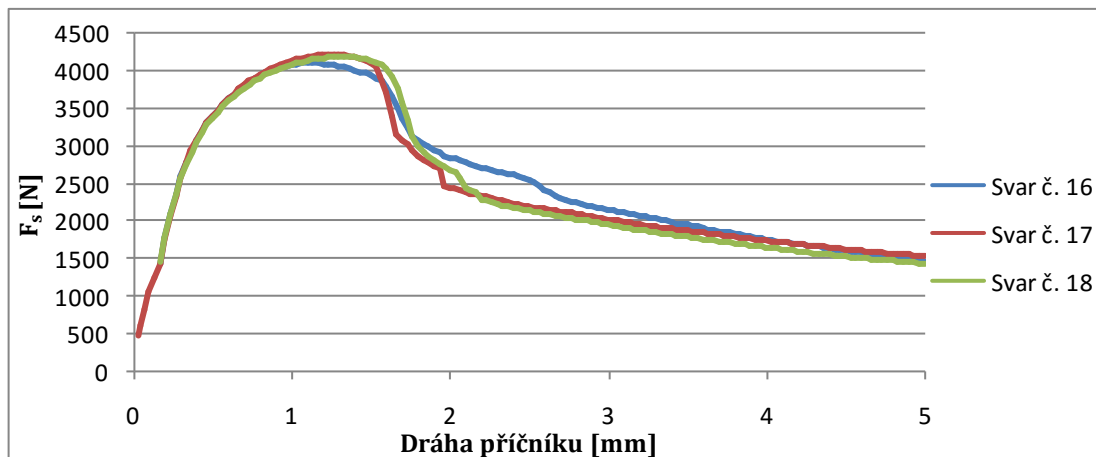
Graf 8: Závislost odlupovací síly na dráze příčnicku pro svary č. 793 až 797

Na grafu 9 je znázorněna grafická interpretace výsledků zkoušky stříhem. Výsledná křivka byla stejně jako v předchozích dvou případech stanovena metodou lineární regrese ($F_{sm} = -2,1 \cdot n + 4226$) a udává závislost maximální stříhové síly na počtu zhotovených svarů. Z výsledné křivky je patrné, že v průběhu zkoušky došlo k poklesu maximální stříhové síly přibližně o 1500 N.

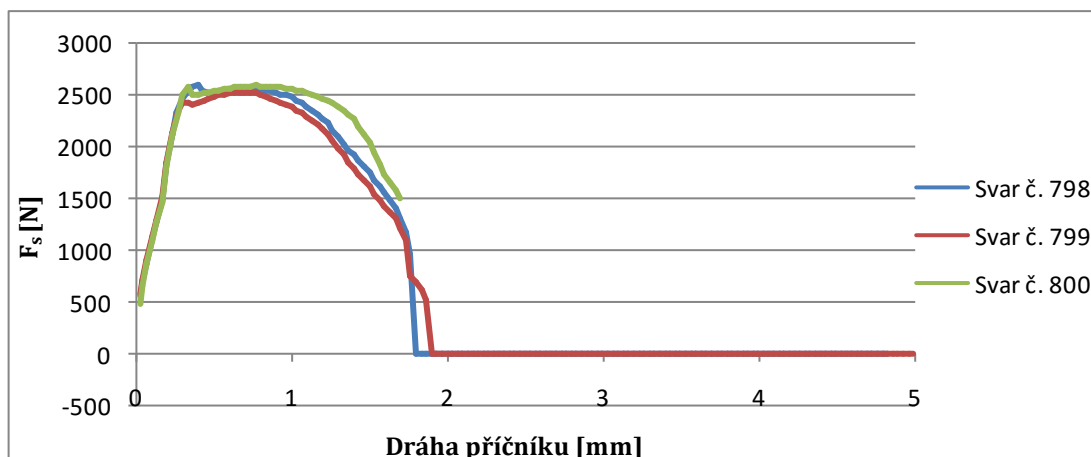


Graf 9: Závislost maximální stříhové síly na počtu zhotovených svarů

S narůstajícím počtem zhotovených svarů došlo opět k výraznému poklesu plastičnosti jednotlivých zkušebních svarů pro zkoušku stříhem. Z grafů 10 a 11 vyplývá, že zatímco u první série zkušebních svarů pro zkoušku stříhem došlo k ustřížení svaru v okamžiku, kdy dráha příčnicku dosáhla hodnoty přibližně 5 mm, u zkušebních svarů z poslední série byla tato hodnota 2 mm.



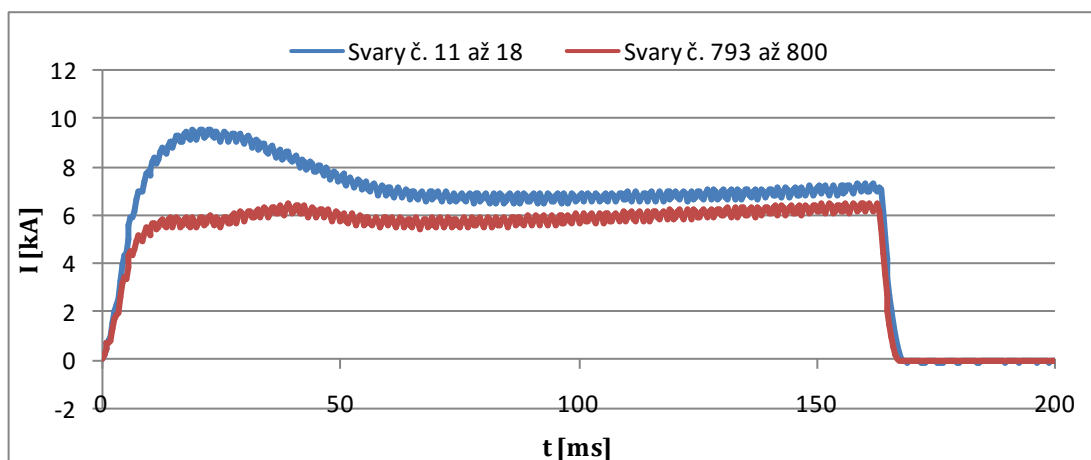
Graf 10: Závislost stříhové síly na dráze příčnicku pro svary č. 16 až 18



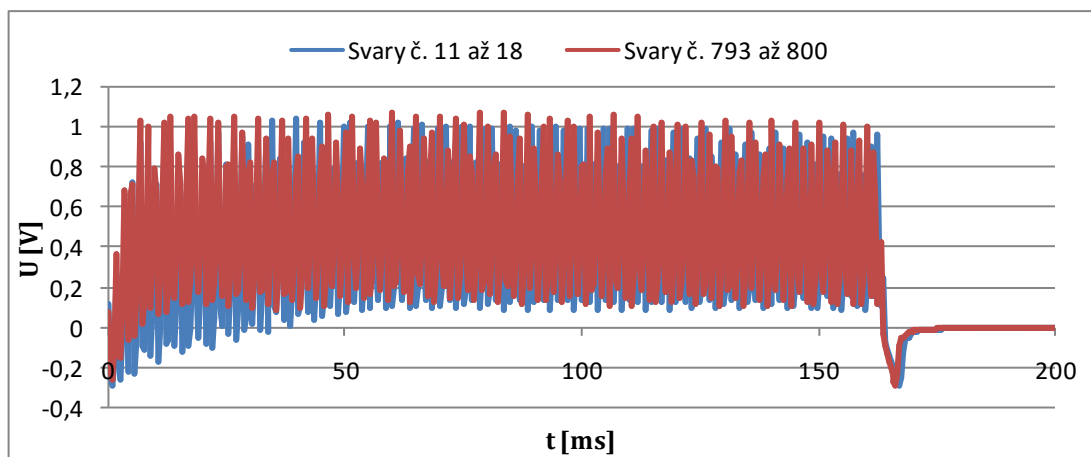
Graf 11: Závislost střižové síly na dráze příčnicku pro svary č. 798 až 800

Na konci zkoušky životnosti došlo k vyhodnocení průběhů svařovacích parametrů, které byly zaznamenávány při svařování příslušných vzorků pro odlupovací zkoušku a zkoušku stříhem. Grafy 12 až 14 poskytují informaci o tom, jakým způsobem se projevilo opotřebení elektrod na průbězích jednotlivých svařovacích parametrů.

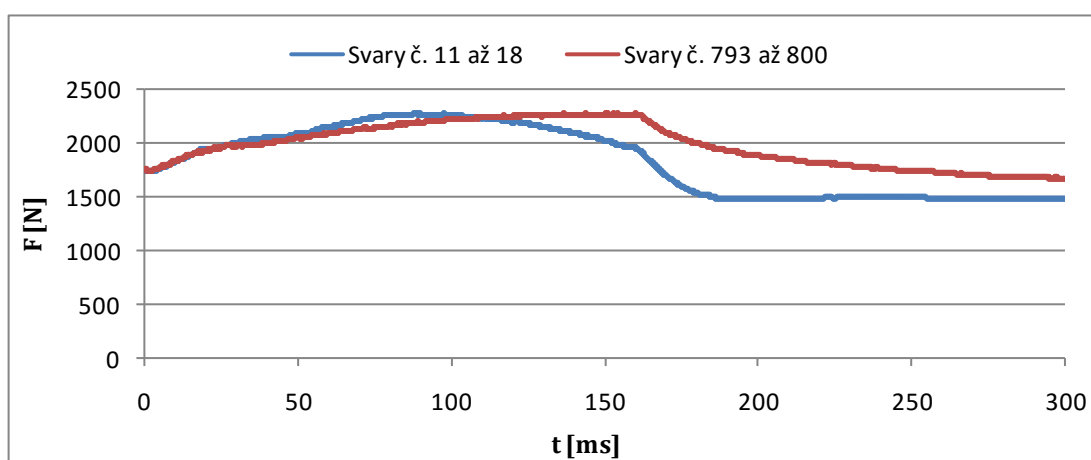
Z následujících grafů je zřejmé, že zvýšené opotřebení pracovní části elektrodové čepičky se projevilo především na průběhu svařovacího proudu a napětí, zatímco průběh elektrodové síly nezaznamenal žádné výrazné změny. U průběhu svařovacího proudu byl zaznamenán výrazný pokles především na počátku tvorby svaru, kde byl rozdíl oproti výchozí hodnotě přibližně 3 kA. Po ustálení průběhů v čase 50 ms se tento rozdíl snížil na 1 kA. Z grafu 13 je patrné, že oba průběhy napětí se od sebe stejně jako v předchozím případě liší především v počátku tvorby svarového spoje. Zatímco na začátku zkoušky životnosti docházelo k růstu napětí do 50 ms, na konci zkoušky byl tento růst zaznamenán pouze do hodnoty 15 ms.



Graf 12: Porovnání průběhu svařovacího proudu na začátku a na konci zkoušky



Graf 13: Porovnání průběhu napětí na elektrodách na začátku a na konci zkoušky

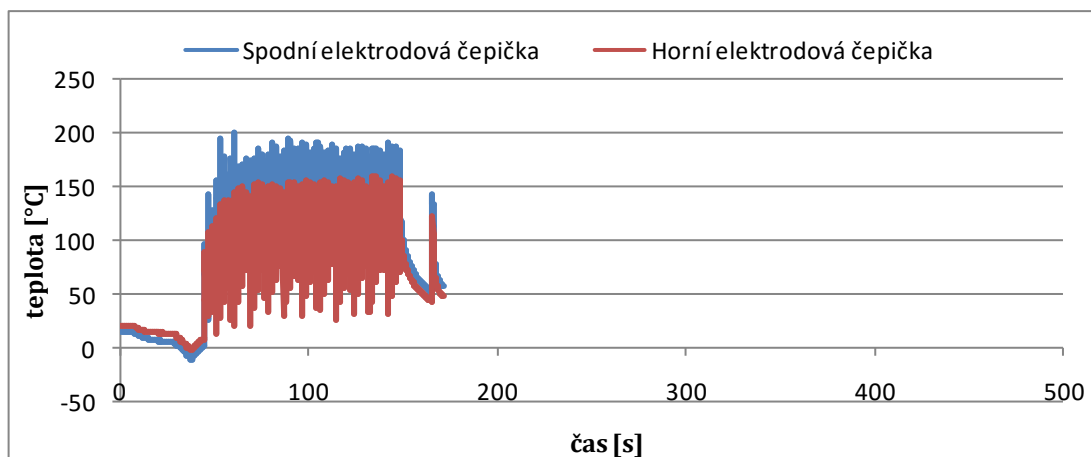


Graf 14: Porovnání průběhu elektrodové síly na začátku a na konci zkoušky

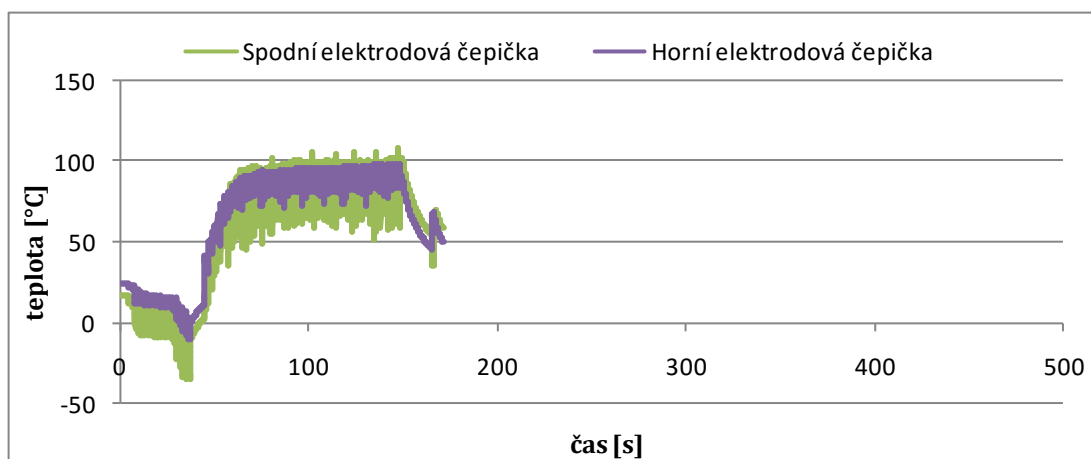
4.3 Snímání teploty

V následujícím textu jsou zobrazeny jednotlivé průběhy teplot, které byly snímány a zaznamenány rychlostí 20 vzorků za sekundu v průběhu svařování jednotlivých sérií nevyhodnocujících se svarů. Průběhy teplot na pracovní části a vnitřní části elektrodové čepičky jsou znázorněny zvláště z důvodu větší přehlednosti.

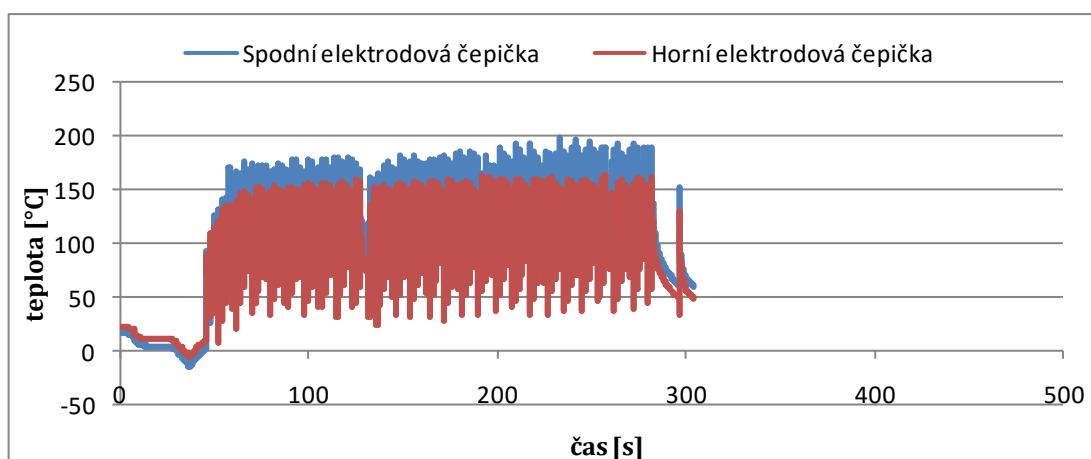
Před zahájením každé série svarů byla elektrodová čepička ochlazená 20 výstřiky (doba výstřiku 0,5 s) kapalného oxidu uhličitého do expanzního prostoru držáku elektrodové čepičky. Ochlazování bylo realizováno za účelem snížení tepelného namáhání elektrodové čepičky v průběhu svařování. Z tohoto důvodu je v první části každého grafu zřejmý pokles teploty pod hodnotu 0°C.



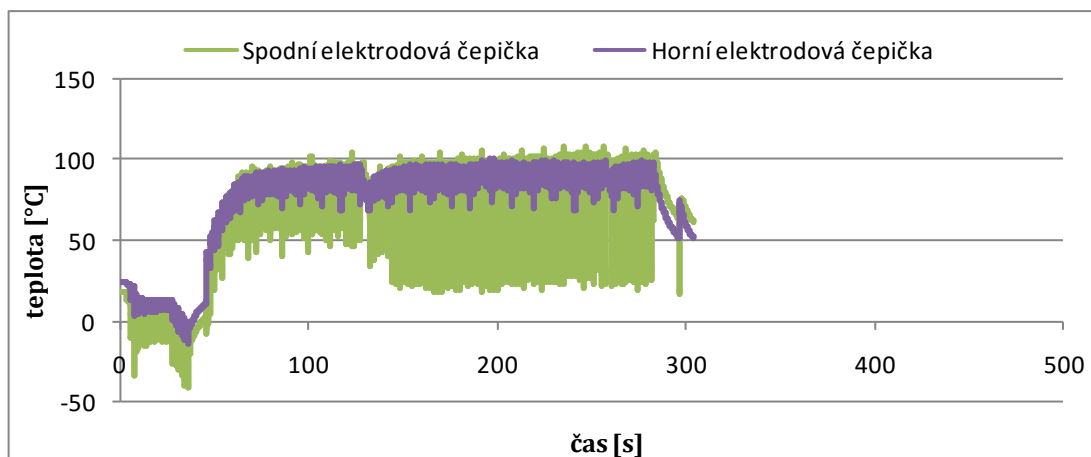
Graf 15: Průběhy teploty pracovní části horní a spodní elektrodové čepičky při realizaci svarů číslo 18 až 92



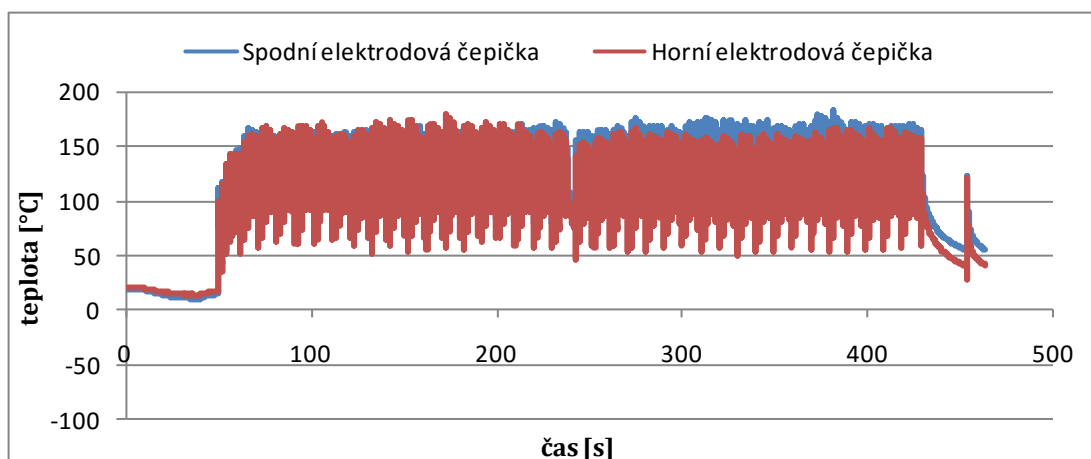
Graf 16: Průběhy teploty vnitřní části horní a spodní elektrodové čepičky při realizaci svarů číslo 18 až 92



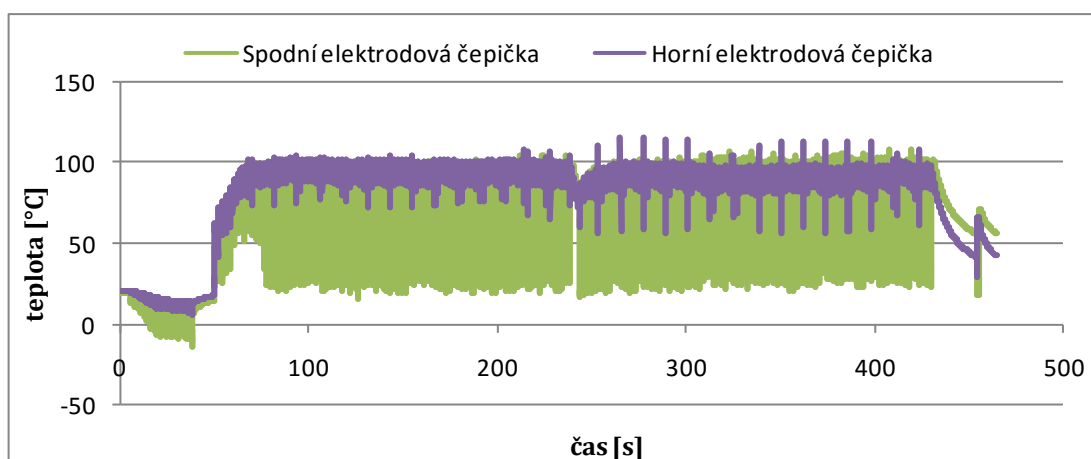
Graf 17: Průběhy teploty pracovní části horní a spodní elektrodové čepičky při realizaci svarů číslo 101 až 192



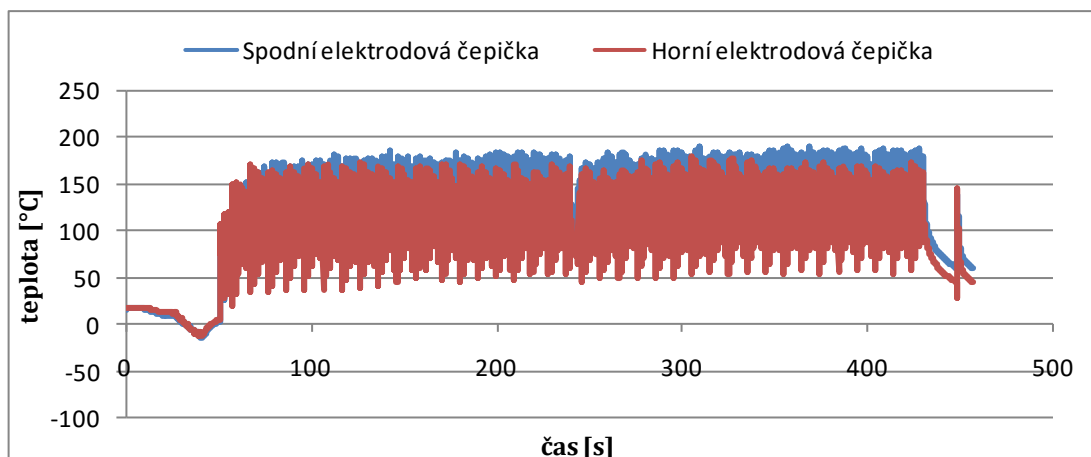
Graf 18: Průběhy teploty vnitřní části horní a spodní elektrodové čepičky při realizaci svarů číslo 101 až 192



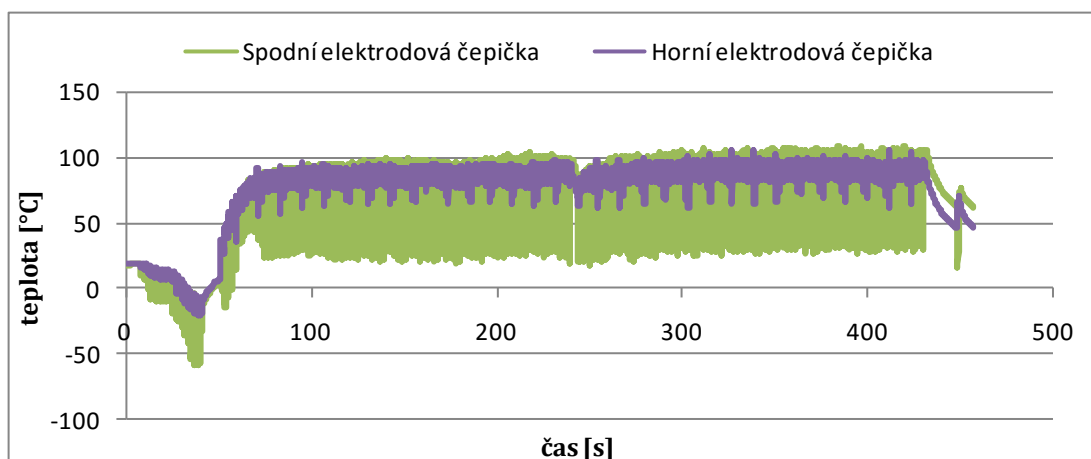
Graf 19: Průběhy teploty pracovní části horní a spodní elektrodové čepičky při realizaci svarů číslo 201 až 392



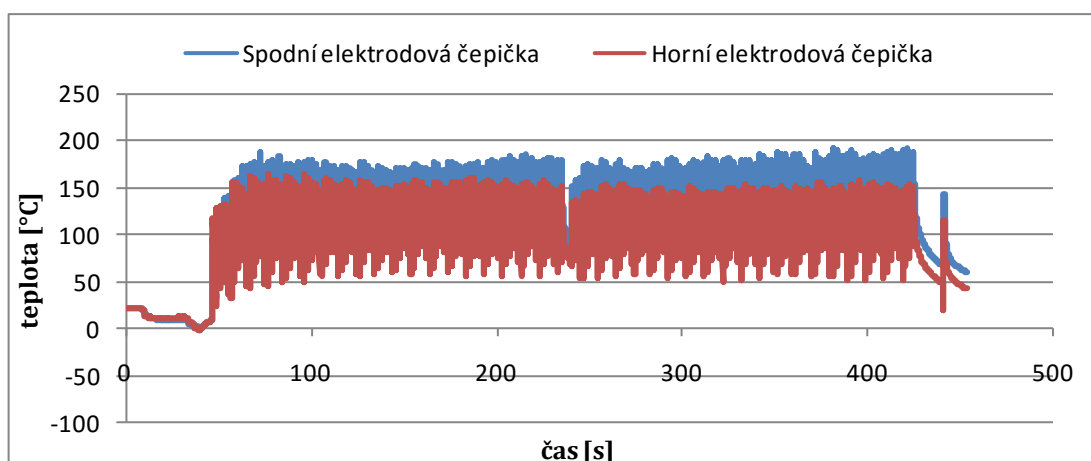
Graf 20: Průběhy teploty vnitřní části horní a spodní elektrodové čepičky při realizaci svarů číslo 201 až 392



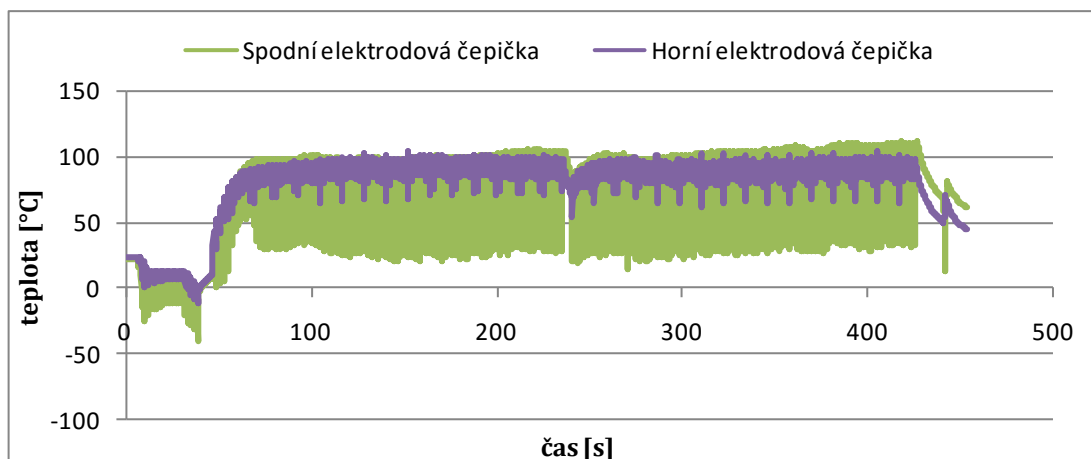
Graf 21: Průběhy teploty pracovní části horní a spodní elektrodové čepičky při realizaci svarů číslo 401 až 592



Graf 22: Průběhy teploty vnitřní části horní a spodní elektrodové čepičky při realizaci svarů číslo 401 až 592



Graf 23: Průběhy teploty pracovní části horní a spodní elektrodové čepičky při realizaci svarů číslo 601 až 792



Graf 24: Průběhy teploty vnitřní části horní a spodní elektrodové čepičky při realizaci svarů číslo 601 až 792

Po vyhodnocení výsledků bylo zjištěno, že jednotlivé průběhy se pohybují v téměř stejném rozsahu teplot, nehledě na stupeň opotřebení pracovní plochy elektrodové čepičky. Teplota pracovní části elektrodové čepičky se pohybovala v rozsahu 50°C až 200°C, zatímco teplota ve vnitřní části byla 30°C až 100°C. Vzhledem k naměřeným výsledkům lze konstatovat, že při svařování v režimu FIX a použití kapalného oxidu uhličitého jako chladicího média není teplota pracovní ani vnitřní části elektrodové čepičky závislá na stupni opotřebení pracovní plochy elektrodové čepičky.

Z jednotlivých průběhů je také patrné, že během celého svařovacího procesu byla více tepelně namáhána spodní elektrodová čepička. Lze předpokládat, že tento jev byl způsoben především polohou svařovaného plechu, který se v průběhu celého svařovacího procesu opíral právě o spodní elektrodovou čepičku.

Závěr

V první části bakalářské práce byl proveden teoretický rozbor, který sloužil pro pochopení a realizaci prováděného experimentu. Tento teoretický rozbor byl zaměřen především na přiblížení problematiky technologie odporového svařování, hodnocení životnosti elektrod a využití kapalného oxidu uhličitého jako prostředku pro chlazení elektrod.

V praktické části byla za účelem posouzení vlivu chlazení pomocí kapalného oxidu uhličitého realizována zkouška životnosti elektrodových čepiček, v průběhu které docházelo k zaznamenávání svařovacích parametrů a teploty. Po provedení zkoušky byla pro jednotlivé elektrodové čepičky stanovena hranice životnosti. Vzhledem k tomu, že součástí zkoušky životnosti byla také odlupovací zkouška a zkouška stříhem, bylo zjištěno, jakým způsobem se změní velikost maximální odlupovací a stříhové síly v závislosti na počtu zhotovených svarů.

V poslední fázi praktické části byly vyhodnoceny průběhy vybraných svařovacích parametrů a teploty. Z výsledků bylo patrné, že rostoucí opotřebením pracovní plochy elektrodové čepičky má při daném způsobu svařování vliv především na průběhy svařovacího proudu a napětí na elektrodách, zatímco průběh elektrodové síly zůstal téměř beze změny.

Vyhodnocením jednotlivých průběhů teploty bylo prokázáno, že při daném způsobu svařování a použití kapalného oxidu uhličitého jako chladicího média není průběh teploty na pracovní ani vnitřní části elektrodové čepičky závislý na stupni opotřebením pracovní plochy elektrodové čepičky.

Realizace praktické části dále umožnila posoudit vhodnost použití kapalného oxidu uhličitého jako prostředku pro chlazení elektrodových čepiček. Vzhledem k výsledkům, kterých bylo dosaženo v rámci této bakalářské práce a projektu „Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů“, lze konstatovat, že chlazení pomocí kapalného oxidu uhličitého by v budoucnu mohlo být jednou z možností, jak zlepšit životnost elektrod.

Použitá literatura

- [1] ČSN 05 0003. *Odporové zváranie: Základné pojmy*. Praha: Vydavateľstvá norem, 1991.
- [2] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování v praxi*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960.
- [3] KUNCIPÁL, Josef a kol. *Teorie svařování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1986.
- [4] NOVÁ, Iva, Iva NOVÁKOVÁ a Jiří BRADÁČ. *Technologie I.: Slévání a svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-052-3.
- [5] *Resistance Welding Manual*. 4. Philadelphia (USA): Resistance Welder Manufacturers' Association, 2003. ISBN 0-9624382-0-0.
- [6] ENCYCLOPEDIA OF TERMS. *WeldCor* [online]. c2013 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: http://www.weldcor.ca/encyclopedia.html?alpha=R&per_page=3
- [7] *Technologie I.: Technologie s vyšší koncentrací tepla* [online]. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cviceni12_prezetace.pdf. Technická univerzita v Liberci.
- [8] *Resistance welding manual* [online]. Helsinki (Finsko): Rautaruukki Corporation, c2009 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www1.ruukki.com/~media/Files/Steel-products/Cold-rolled-metal-colour-coated-instructions/Ruukki-Resistance-welding-manual.pdf>
- [9] ISO 669. *Resistance welding - Resistance welding equipment - Mechanical and electrical requirements*. 2. Geneva (Švýcarsko): International Organization for Standardization, 2000.
- [10] NEUMANN, Heinz. Aplikace tekutého CO₂ pro chlazení elektrodových čepiček u odporového bodového svařování. *Konstrukce: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. [cit. 2016-03-06]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/aplikace-tekuteho-co2-pro-chlazení-elektrodovych-cepicek-u-odporoveho-bodoveho-svarovani/>

- [11] ČSN EN ISO 15609-5. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Stanovení postupu svařování - Část 5: Odporové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Třídící znak 05 0312.
- [12] ČSN EN ISO 5182. *Odporové svařování - Materiály pro elektrody a pomocné vybavení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. Třídící znak 05 2678.
- [13] ČSN EN ISO 8166. *Odporové svařování - Způsob hodnocení životnosti bodových svařovacích elektrod při konstantním nastavení stroje*. Praha: Český normalizační institut, 2004. Třídící znak 05 2620.
- [14] *Welding handbook: Volume 2 - Welding processes*. 8th ed. Miami (USA): American Welding Society, 1991. ISBN 0-87171-354-3.
- [15] ZHANG, Hongyan a Jacek. SENKARA. *Resistance welding: fundamentals and applications*. 2nd ed. Boca Raton (USA): CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4398-5371-9.
- [16] NEUMANN, Heinz a Martin BORŮVKA. *Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů: Etapa 1 - "Výzkum chlazení u technologických procesů"*. Liberec, 2013.
- [17] Jak připojit vodou chlazený hořák k suché (nejen) MIG/MAG svařečce. *Svarinfo.cz: Magazín praktického svařování* [online]. 2008 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008093001>
- [18] ČSN EN ISO 10447. *Odporové svařování - Odlupovací a sekáčové zkoušení odporových bodových a výstupkových svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2007. Třídící znak 05 1129.
- [19] ČSN EN ISO 14273. *Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2003. Třídící znak 05 1112.

- [20] ČSN EN ISO 14327. *Odporové svařování – Způsoby určení diagramu oblasti svařování při odporovém bodovém, výstupkovém a švovém svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2005. Třídící znak 05 2625.
- [21] NEUMANN, Heinz. *Adaptér pro upínání přímých elektrod pro odporové bodové svařování s přívodem kapalného oxidu uhličitého*. Liberec, 2015.
- [22] BRDLÍK, Pavel, Iva NOVÁKOVÁ, Iva NOVÁ, Heinz NEUMANN a Martin SEIDL. *Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů: Tepelně-fyzikální vlastnosti CO₂ a jeho ochlazovací schopnost*. Liberec, 2014.
- [23] NEUMANN, Heinz a Jiří PACÁK. *Chlazení elektrodových čepiček u odporového bodového svařování kapalným oxidem uhličitým jako prostředek pro zvýšení jejich životnosti*. Liberec, 2015.
- [24] NEUMANN, Heinz. *Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů: Etapa 2 „Aplikovaný výzkum vlivů inovativního chlazení na technologické procesy“*. Liberec, 2014.
- [25] NEUMANN, Heinz. *Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů: Etapa 3 „Ověření výsledků v provozních podmínkách“*. Liberec, 2015.
- [26] Schinkmann. *TECNA: Inverterové odporové svařovací lisy 90 – 240 kVA*. Dostupné také z: <http://www.schinkmann.cz/files/file/tecna-6121-6126-schinkmann%20.pdf>
- [27] TECNA. *Medium frequency resistance welder item 6121-6126: Installation and use instruction manual*. Bologna (Itálie), 2004. Dostupné také z: http://www.lors.com/pdfs/6121-6126_manual.pdf
- [28] TECNA. *Welding control unit TE 700*. Bologna (Itálie).
- [29] TECNA. *Návod k obsluze řídicí jednotky TE 700: Software-verze č. 1.13*. Bologna (Itálie), 2010.
- [30] UNITEK PECO. *Operating Instructions MG3 Digital*. Puchheim (Německo), 2003.

- [31] HYFRA. *SVK: Water chiller*. Krunkel (Německo), 2005.
- [32] ERDEMIR. *Product Catalogue*. Istanbul (Turecko), 2013.
- [33] *Luvata Catalog*. Delaware (USA), 2012.
- [34] Copper Alloys C15760. *Metal suppliers online* [online]. [cit. 2016-06-07].
Dostupné z: <http://www.suppliersonline.com/propertypages/C15760.asp>
- [35] ČSN EN ISO 5821. *Odporové svařování - Elektrodové čepičky pro bodové odporové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2010. Třídící znak 05 2679.
- [36] ČSN EN ISO 14270. *Rozměry vzorku a postup pro mechanizované odlupovací zkoušení odporových bodových, švových a výstupkových svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2003. Třídící znak 05 1110.
- [37] ČSN EN ISO 14327. *Odporové svařování - Postup pro bodové svařování nepovlakovaných a povlakovaných nízkouhlíkových ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2007. Třídící znak 05 2640.

Seznam příloh

Příloha č. 1: Základní technické parametry svařovacího stroje TECNA 6124

Příloha č. 2: Programovatelné parametry svařovacího programu FIX

Příloha č. 3: Průběhy jednotlivých svařovacích parametrů

Příloha č. 4: Tabulka výsledků odlupovací zkoušky

Příloha č. 5: Tabulka výsledků zkoušky stříhem

Příloha č. 1: Základní technické parametry svařovacího stroje TECNA 6124 [25]

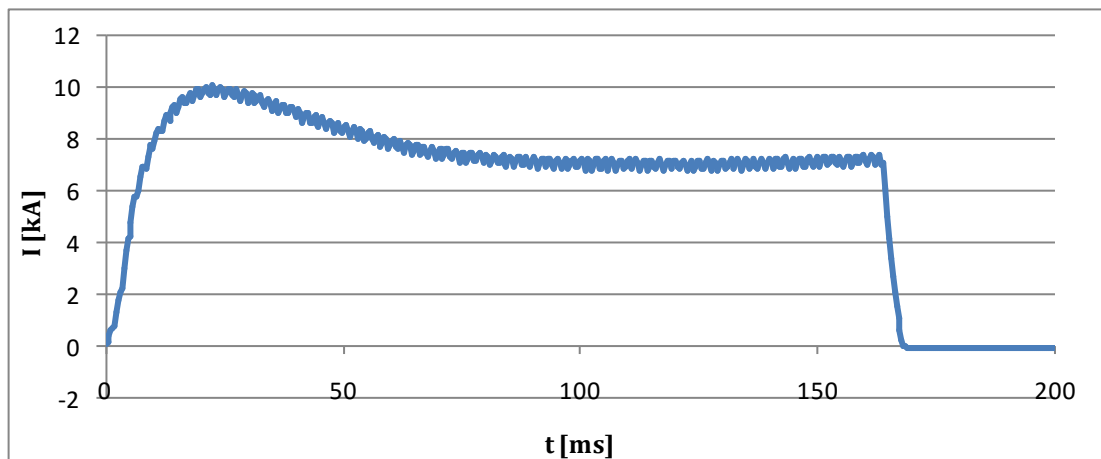
Parametr	Hodnota	Jednotky
Nominální výkon při 20%	285	kVA
Nominální výkon při 50%	180	kVA
Maximální svařovací proud	64	kA
Nominální sekundární napětí	9,4	V
Napětí napájení 50 Hz – 3 fáze	400	V
Kabel délky 30 m	95	mm ²
Pojistky opožďení	200	A
Maximální rozevření elektrod	385	mm
Průměr držáku elektrod	32	mm
Elektrodová síla při 1 baru	123	daN
Elektrodová síla při 16 barech	736	daN
Maximální zdvih	100	mm
Maximální dvojí zdvih	0-80	mm
Minimální tlak vzduchu	650	kPa
Maximální tlak vzduchu	1000	kPa
Maximální tlak vody	400	kPa
Hmotnost svařovacího stroje	540	kg

Příloha č. 2: Programovatelné parametry svařovacího programu FIX [28]

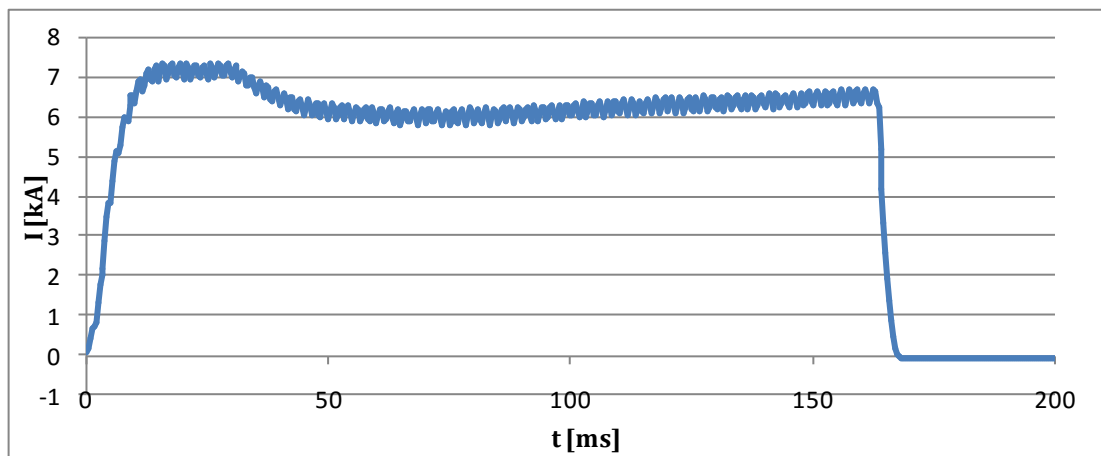
Parameter	Parametr	Rozsah hodnot
PROGRAM NUMB.	ČÍSLO PROGRAMU	001 - 300
WORKING MODE	PRACOVNÍ REŽIM	FIX
CONTROL MODE*	KONTROLNÍ REŽIM	NE
QUALITY - T*	KVALITA - T	VYPNUTO
QUALITY - R*	KVALITA - R	VYPNUTO
SQUEEZE 1	PŘÍTLAK 1	0.5 - 99.0 cyklů
SQUEEZE	PŘÍTLAK	00.0 - 99.0 cyklů
PRESSURE	SVAŘOVACÍ PŘÍTLAK	00.5 - 10.0 barů
FORGE DELAY	PRODLEVA KOVÁNÍ	00 - 99 cyklů
FORGE PRESS	TLAK KOVÁNÍ	00.5 - 10 barů
PRE-WELD	ČAS PŘEDEHŘEVU	0000 - 1000 mS
PRE-RO	ENERGIE INVERTORU PŘEDEH.	005.0 - 100.0%
COLD 1	CHLAZENÍ 1	0000 - 1000 mS
SLOPE UP	NÁBĚH PROUDU	0000 - 1000 mS
WELD	ČAS SVAŘOVÁNÍ	0001 - 2000 mS
RO	ENERGIE INVERTORU	005.0 - 100.0%
COLD 2	CHLAZENÍ 2	0000 - 1000 mS
IMPULSE NUMBER	POČET IMPULSŮ	1 - 9
WELD 2	ČAS SVAŘOVÁNÍ 2	0000 - 1000 mS
RO 2	ENERGIE INVERTORU 2	005.0 - 100.0%
SLOPE DOWN	DOBĚH PROUDU	0000 - 1000 mS
COLD 3	CHLAZENÍ 3	0000 - 1000 mS
POST - WELD	ČAS DOHŘEVU	0000 - 1000 mS
POST - RO	ENERGIE INVERTORU DOHŘ.	005.0 - 100.0%
HOLD TIME	ČAS PRODLEVY OTEVŘENÍ	00.5 - 99.0 cyklů
OFF TIME	ČAS PAUZY MEZI SVARY	00.0 - 99.0 cyklů

* - Podrobnosti u příslušných parametrů jsou uvedeny v návodu k obsluze řídicí jednotky TE 700 [28]

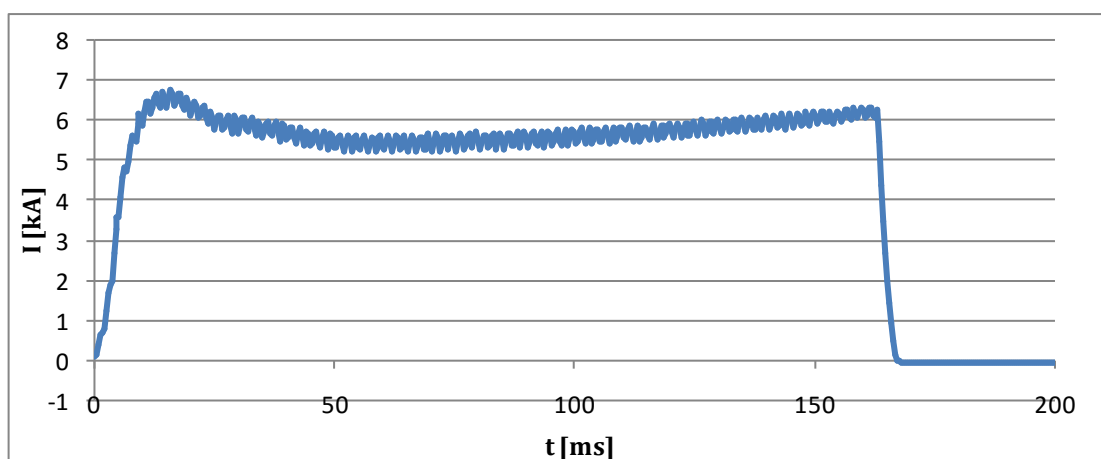
Příloha č. 3: Průběhy jednotlivých svařovacích parametrů



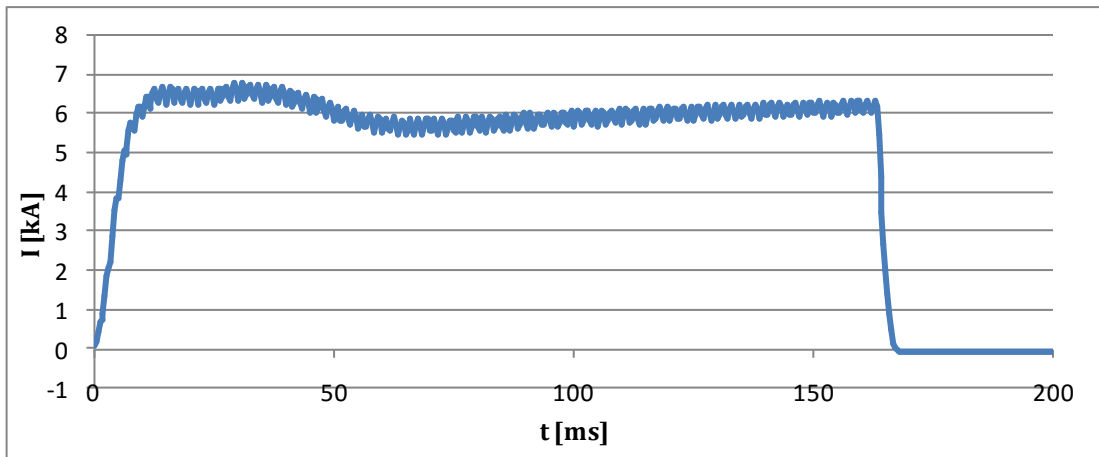
Graf 25: Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro svary číslo 93 až 100



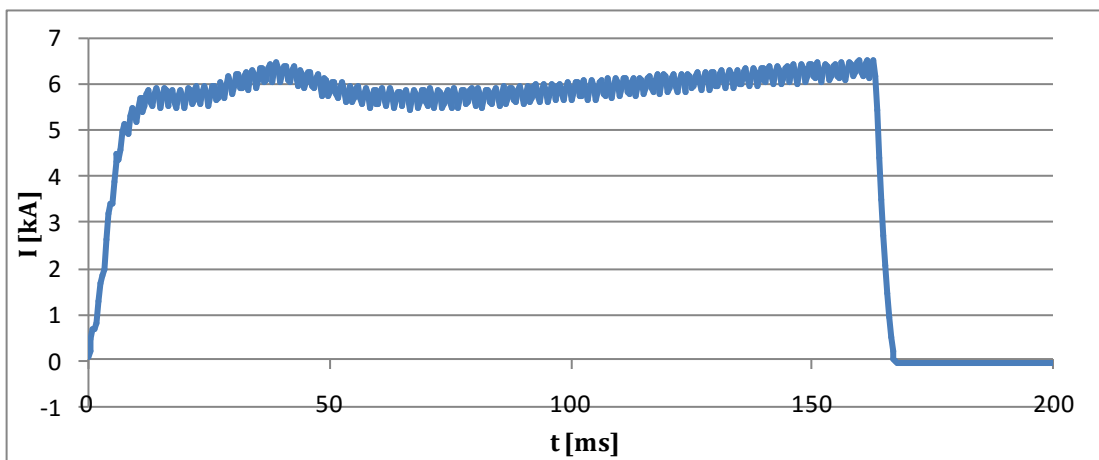
Graf 26: Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro svary 193 až 200



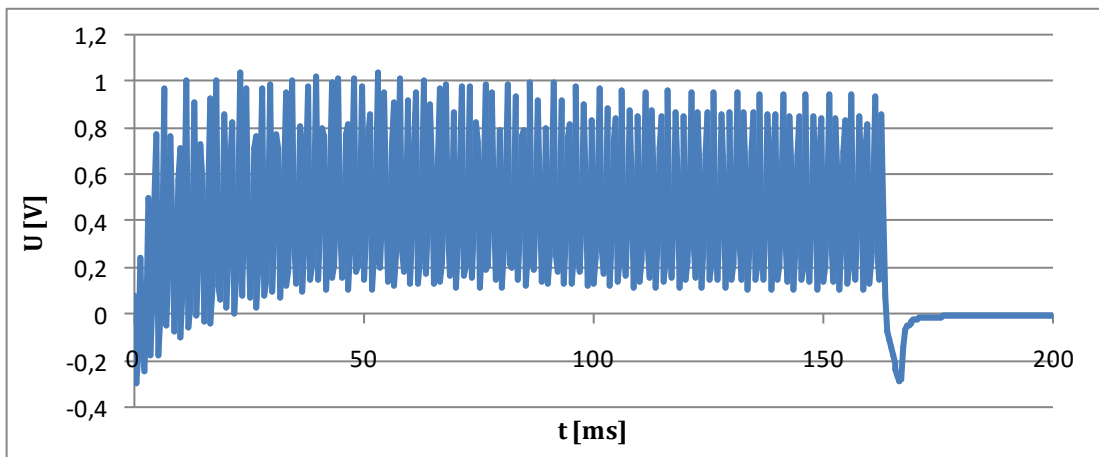
Graf 27: Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro svary číslo 393 až 400



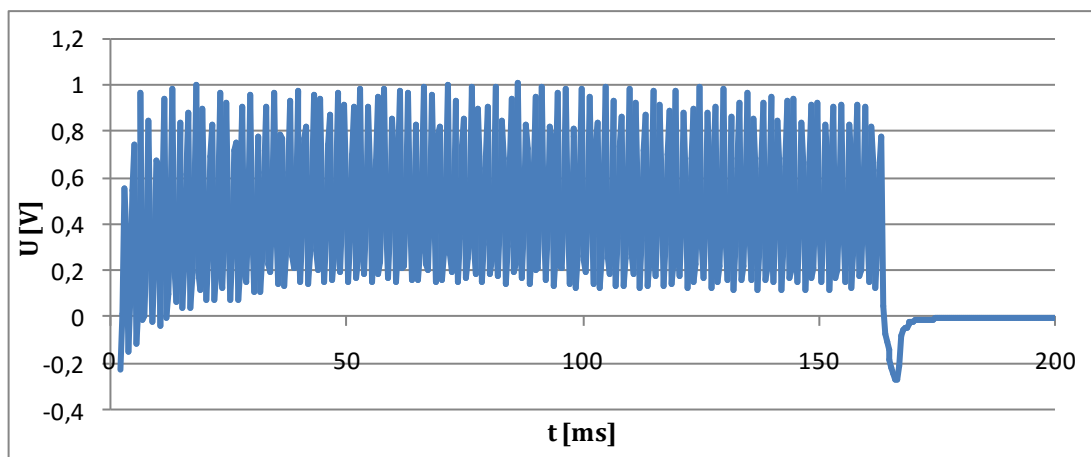
Graf 28: Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro svary číslo 593 až 600



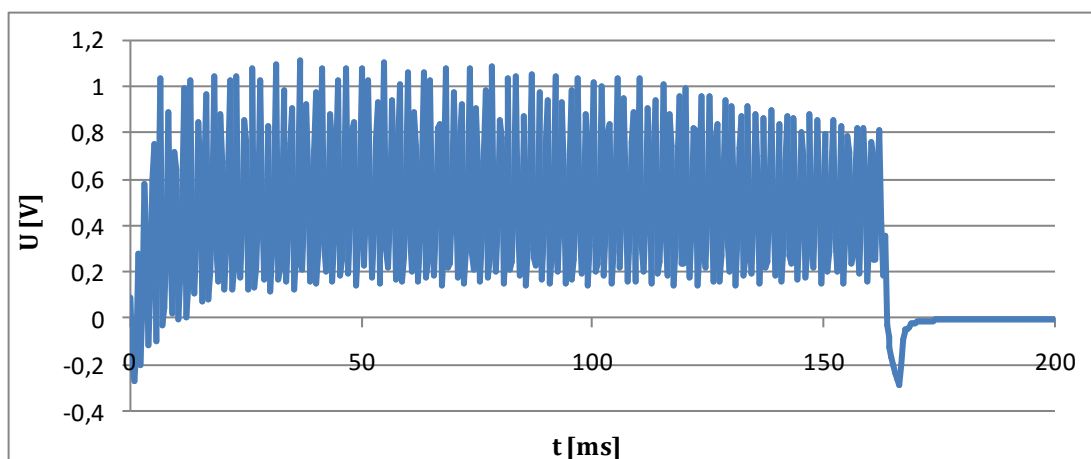
Graf 29: Průběh svařovacího proudu v závislosti na čase pro svary číslo 793 až 800



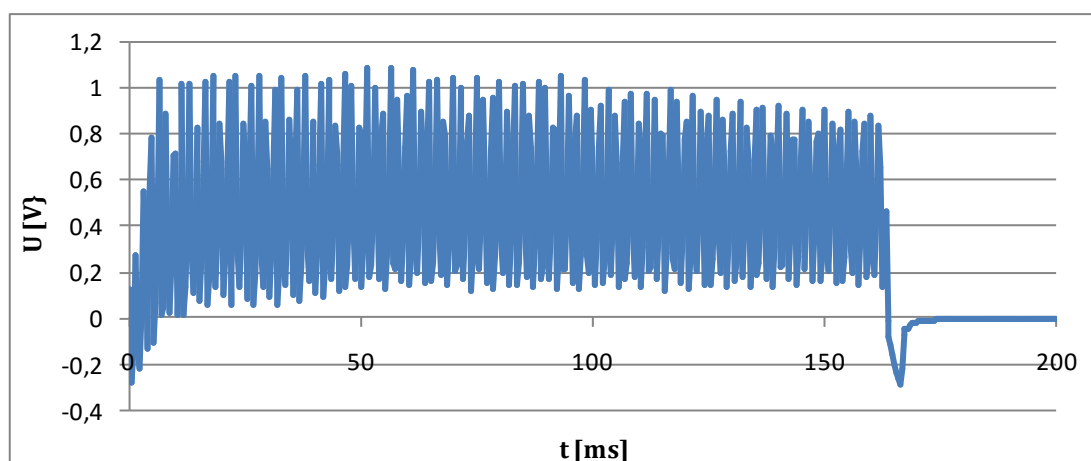
Graf 30: Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro svary číslo 93 až 100



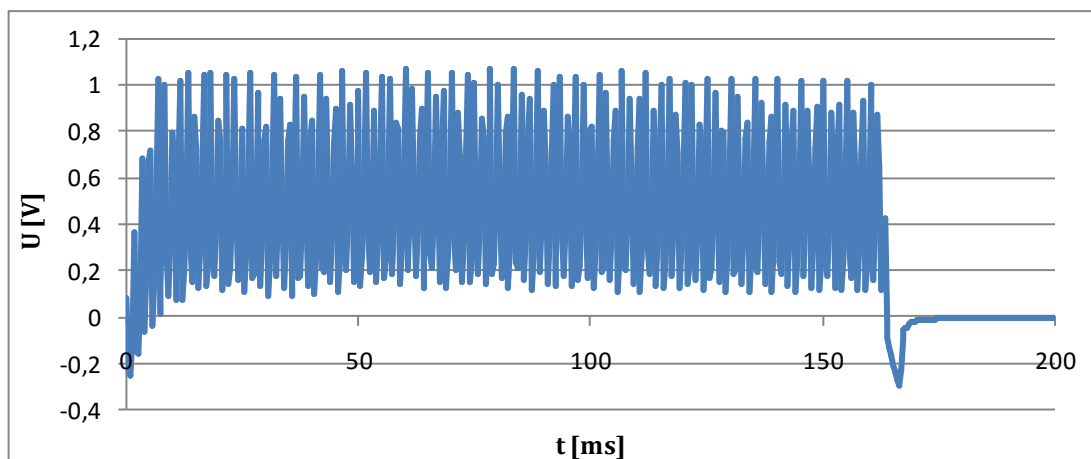
Graf 31: Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro svary číslo 193 až 200



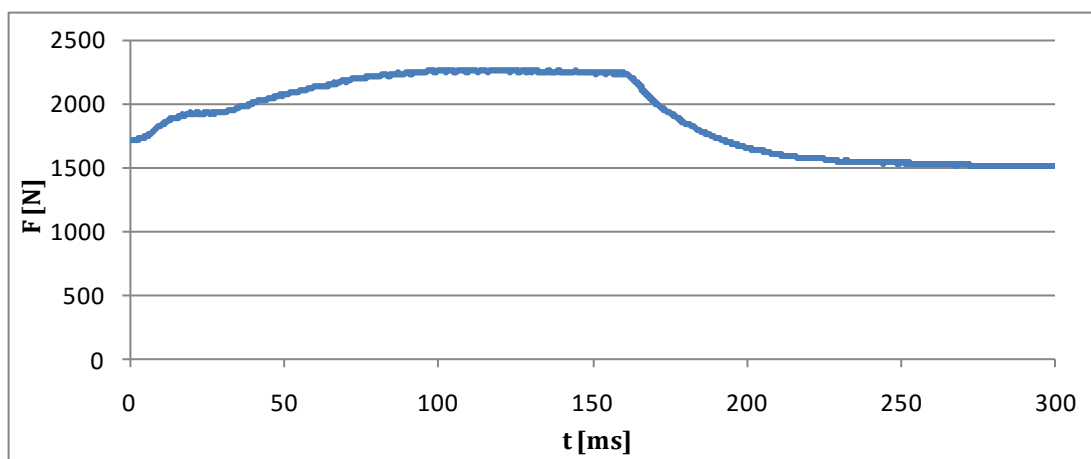
Graf 32: Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro svary číslo 393 až 400



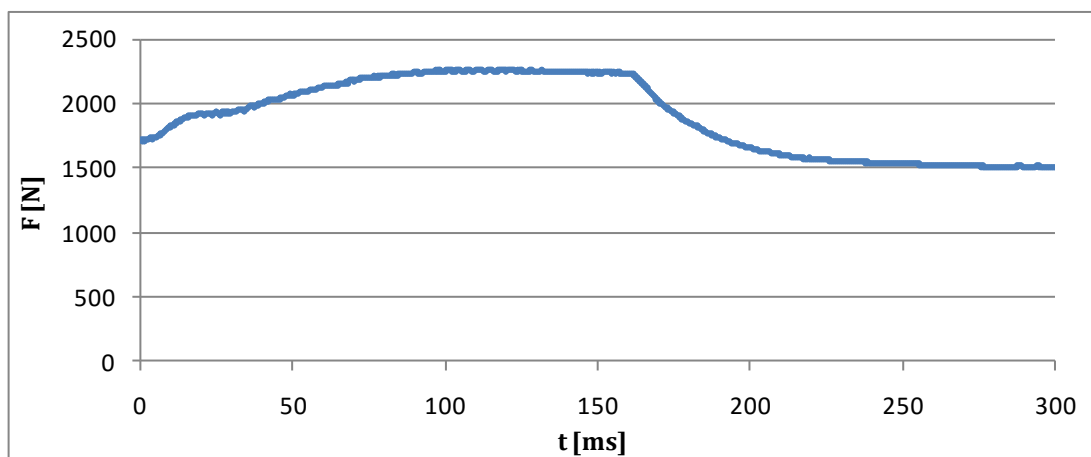
Graf 33: Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro svary číslo 593 až 600



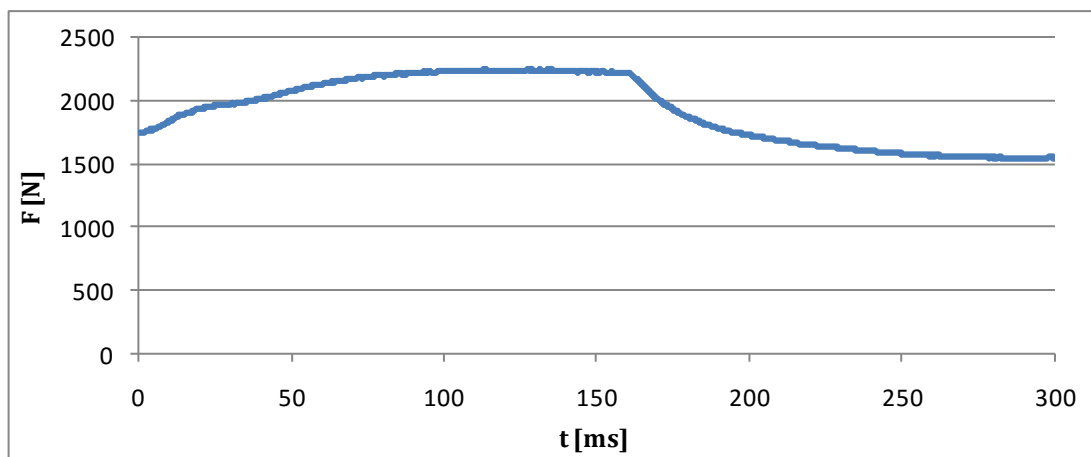
Graf 34: Průběh napětí na elektrodách v závislosti na čase pro svary číslo 793 až 800



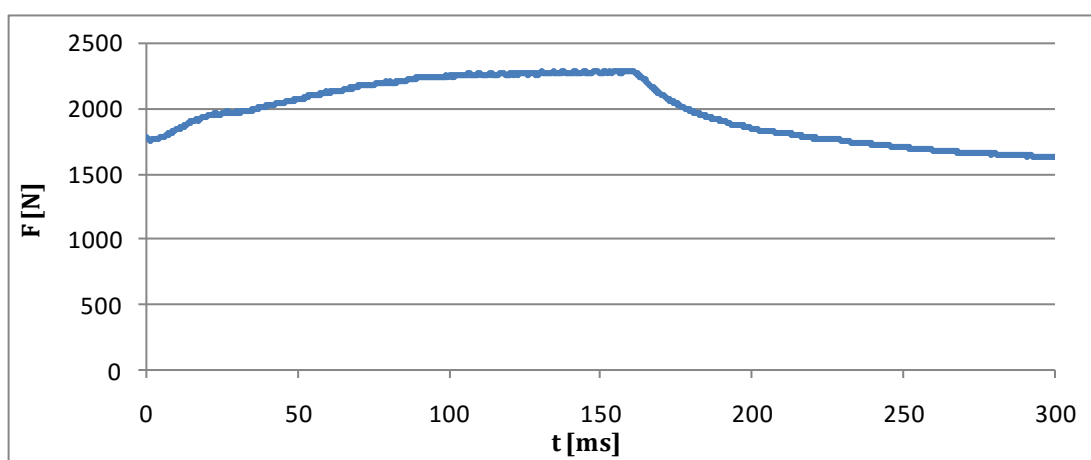
Graf 35: Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro svary číslo 93 až 100



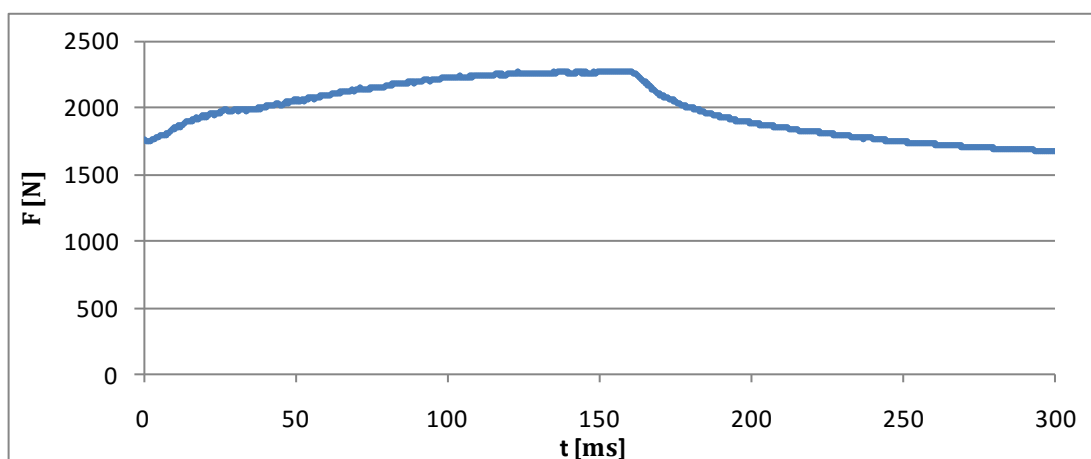
Graf 36: Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro svary číslo 193 až 200



Graf 37: Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro svary číslo 393 až 400



Graf 38: Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro svary číslo 593 až 600



Graf 39: Průběh elektrodové síly v závislosti na čase pro svary číslo 793 až 800

Příloha č. 4: Tabulka výsledků odlupovací zkoušky

Číslo svaru:	d_1 [mm]	d_2 [mm]	d [mm]	F_{om} [N]
11	4,9	5,1	5	809,8
12	4,9	5	5	850,2
13	4,5	4,8	4,7	741,9
14	4,4	4,5	4,5	743
15	4,2	4,5	4,4	715,9
93	3,8	4,2	4	623,1
94	4,5	4,6	4,6	672,8
95	4,3	3,9	4,1	786,1
96	4,1	4	4,1	709,8
97	4	3,9	4	767,9
193	2,8	4,3	3,6	639,7
194	3,3	4,6	4	688,9
195	3,7	4,6	4,2	734,2
196	3,3	4,6	4	698,2
197	3,8	4,6	4,2	815,9
393	2,4	4,1	3,3	641,9
394	2,7	4,2	3,5	546,3
395	2,6	4,3	3,5	734,7
396	3,1	3,4	3,3	566,8
397	3,7	3,8	3,8	614,3
593	4,1	2,5	3,3	698,2
594	4,4	2,7	3,6	691,6
595	3,9	2,8	3,4	600,5
596	4,4	2,7	3,6	736,9
597	4,2	3	3,6	801
793	3,1	2,6	2,9	615,9
794	2,4	2,3	2,4	596,6
795	3	3	3	541,3
796	3,1	2,6	2,9	595,5
797	3,3	3	3,2	672,8

Příloha č. 5: Tabulka výsledků zkoušky stříhem

Číslo svaru:	F_{sm} [N]
16	4109,8
17	4215,9
18	4186,6
98	4042,4
99	4094,4
100	4091
198	3837,4
199	3858,4
200	3801,5
398	3320,3
399	3277,8
400	3261,2
598	2757,9
599	3164
600	3042,4
798	2604,9
799	2531,9
800	2593,8