Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Využití odporového svařování v praxi

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Hrabě Ph.D.

Autor práce: Matěj Humňal

Praha 2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Matěj Humňal

Zemědělská specializace
Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Využití odporového svařování v praxi

Název anglicky

Resistance welding and its use in practice

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o odporovém svařování a aplikaci této metody v praxi. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíle práce a metody jejího vypracování.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

Průmysl, spojování materiálu, praxe

Doporučené zdroje informací

BLONDEAU, R.: Metallurgy and mechanics of welding : processes and industrial applications, London : Hoboken : ISTE ; 2008.
BRANDON, D.: Joining Processes : An introduction, Chichester, 1997.
HRIVŇÁK, I.: Theory of Weldability of Metals and Alloys. Amsterdam, Elsevier, 1992.
KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T.: Svařování, I. Ostrava, 2005.
KUNCIPÁL, J., PILOUS, V., DUNOVSKÝ, J.: Nové technologie ve svařování. Praha, SNTL, 1984.
LANCASTER, J., F.: Metallurgy of welding. Cambridge, 1999.
Repair and Maintenance Welding Handbook. ESAB AB, 2006.
Vědecká literatura: Journal of Materials Processing Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojírenská technologie, Journal of materials science, Journal of material processing technology, Manufacturing technology.
ZEZULKA, L.: Svařování : základní informace a povinnosti svářečů při svařování kovů, Šumperk : Sates, 2003.

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2019

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2020

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Odporové svařování v praxi vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne: …….

Podpis autora práce: …….
Matěj Humňal

Abstrakt: Tato bakalářská práce je literární rešerší, zaměřující se na problematiku odporového svařování ve strojírenském průmyslu. Práce seznamuje se způsoby a postupy bodového a švového odporového svařování a popisuje metodiku dílčích operací v procesu svařování v praxi. K bodovému i švovému způsobu svařování jsou poté představeny druhy svařovacích strojů, běžně používaných jak v dílenské praxi, tak i v průmyslu samotném.

Klíčová slova: Průmysl, spojování materiálu, praxe

Summary: This bachelor thesis is a literature review focusing on the problem of resistance welding in the engineering industry. The work acquaints with the methods and procedures of a spot and a seam resistance welding and describes the methodology of partial operations in the welding process in practice. The types of welding machines commonly used both in workshop practice and in the industry itself are then introduced to the spot and seam welding methods.

Key words: Industry, material joining, practice

Obsah

1 Úvod 1

2 Cíle a metodika práce 1

3 Svařování 2

3.1 Historie svařování 2

4 Odporové svařování 3

4.1 Charakteristika odporového svařování 3

4.2 Používané materiály pro svařování 4

4.3 Základní dělení odporového svařování 4

4.4 Bodové svařování 5

4.4.1 Tepelná rovnováha bodového svařování 9

4.4.2 Měkký a tvrdý svařovací režim 10

4.4.3 Výhody a nevýhody svařovacích režimů 10

4.4.4 Parametry bodového svařování 12

4.4.5 Volba svařovacích parametrů bodového svařování 15

4.4.6 Povrchová úprava materiálu před bodovým svařováním 15

4.5 Švové svařování 16

4.5.1 Tepelná rovnováha švového svařování 18

4.5.2 Parametry švového svařování 19

4.5.3 Volba svařovacích parametrů švového svařování 22

4.5.4 Povrchová úprava materiálu před švovým svařováním 23

5 Praxe bodového a švového svařování 24

5.1 Svářecí stroje bodového svařování 24

5.1.1 Stabilní bodové svařovací stroje 25

5.1.2 Mobilní bodové svařovací stroje 26

5.2 Chyby při bodovém svařování 27
5.3 Svářecí stroje švového svařování 30
5.3.1 Stabilní švové svařovací stroje 30
5.3.2 Speciální švové svařovací stroje 31
5.4 Chyby při švovém svařování 31
5.5 Robotické svařování 32
6 Ekonomické zhodnocení 33
7 Závěr 34
8 Seznam použité literatury 35
9 Seznam použitých symbolů 38
10 Seznam obrázků 39
11 Seznam tabulek 40
12 Seznam příloh 40
13 Přílohy 1

1 Úvod

Spojování materiálu je odjakživa jedno z nejdůležitějších činností ve výrobním procesu strojírenského průmyslu. Spojení je rozděleno dle své podstaty na *mechanické* (závitové upevňovací prvky, lisování, nýtování apod.), *adhezní* (lepení) a *tepelné*. Tepelné spojení využívá teplo k roztavení materiálů a vytváří mezi nimi metalurgické nerozebíratelné spojení. Mezi tyto typy spojování součástí patří například svařování elektrickým obloukem, energetickým paprskem (laserem), plazmové slinování, pájení, svařování třením, ale především svařování odporové, na které je tato práce zaměřena.

Technologie bodového odporového svařování byla vynalezena již roku 1877, rozmachu se však odporové svařování dočkalo až ve třicátých letech následujícího století, kdy byly vynalezeny stroje, které jsou schopny unést takové množství proudu nezbytně potřebnému ke spolehlivému spojení plechů. Od té doby se odporové svařování neustále vyvíjí a zdokonaluje a je stále hojně využívána pro spojování materiálů vzhledem k praktičnosti této metody svařování. Mezi nejvýznamnější výhody odporové svařování patří především jeho vysoká účinnost, pevnost nerozebíratelného spoje a vysoká flexibilita jeho použití ve výrobě.

Tato práce se bude zabývat právě odporovým svařováním, zejména pak hojně využívaným bodovým a švovým svařováním, které byly a jsou nedílnou součástí kusové i hromadné strojírenské výroby. Využívá se v průmyslu elektrotechnickém, kde se svařují velmi malé součástky, až po svařování objemných a tvarově složitých dílců průmyslu automobilového či dokonce raketového.

Součástí práce bude také seznámení s technologiemi používanými v praxi a krátké ekonomické zhodnocení výsledků práce, v tomto případě porovnání cen bodových svarů odporového svařování s jinými běžně se v praxi vyskytujícími typy svařování.

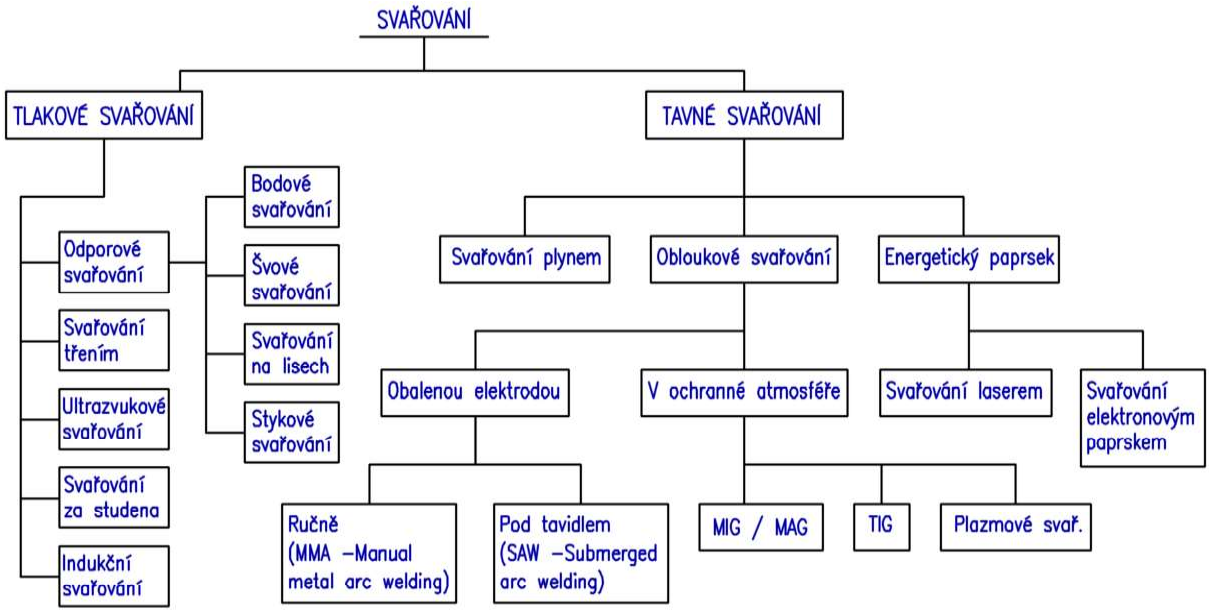
2 Cíle a metodika práce

Pomocí literární rešerše seznámit s odporovým svařováním, objasnit postupy v procesech a dílčích operacích bodového a švového odporového svařování a seznámit se současným stavem řešeného problému. Nabídnout obecný přehled o proměnných vstupujících do svařovací soustavy a měl by schopen je aplikovat v praxi.

3 Svařování

Svařování je technologický proces tvorby trvalého nerozebíratelného spoje součástí, materiálu, polotovarů apod. za použití tepla, tlaku, popřípadě obou vlivů. Hlavním významem je vytvoření metalurgického spojení dílů. K vytvoření svaru je třeba vynaložit mechanickou nebo tepelnou energii, popř. jejich kombinaci, jako je tomu u odporového svařování. *[1], [4]*

Jednotlivé dělení způsobů svařování je následující:



Obrázek 1 - Dělení svařování

Zdroj: [4], vlastní zpracování

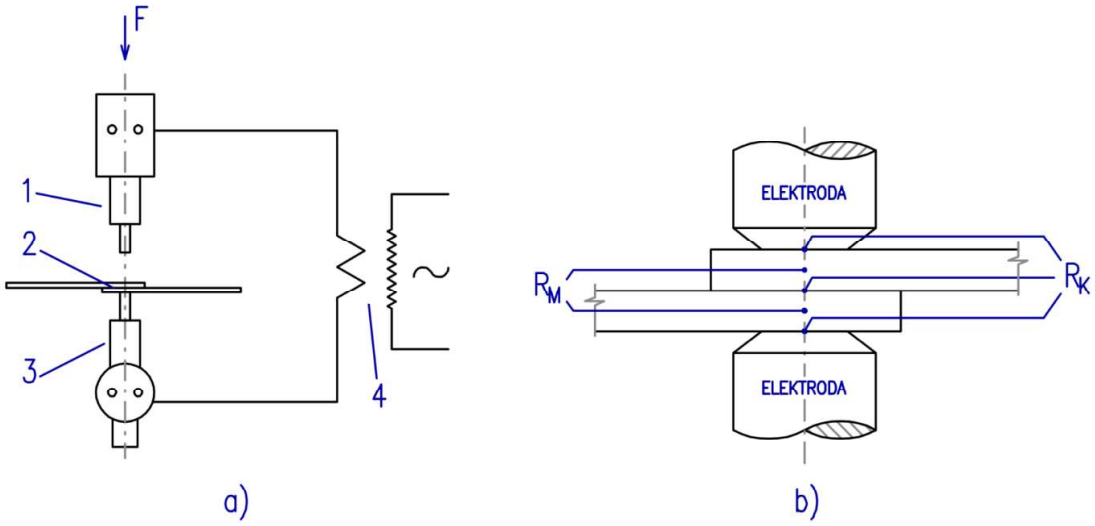
3.1 Historie svařování

Historickým předchůdcem svařování jako takového bylo pájení zlata, stříbra a mědi, což bylo prováděno již kolem roku 3000 před n.l. Období svařování započalo kolem roku 1000 před n.l. kdy se spojovalo kujné železo svařováním v ohni. Dalším stádiem v oblasti svařování byl však až po roce 1900 rozvoj svařování plamenem (autogenní svařování). Technologický rozvoj pokračoval a ve 20. letech 20. století se již začalo využívat elektrické ruční obloukové a odporové svařování. Rozvoj svařování dále pokračoval vývojem metody WIG (roku 1935), MIG (roku 1942), třecího (roku 1949), ultrazvukového (roku 1950), plazmového svařování a svařování elektronovým paprskem (roku 1956), difúzního (roku 1960) a laserového (roku 1965) svařování. *[2]*

4 Odporové svařování

4.1 Charakteristika odporového svařování

Odporové svařování je typ svařování s využitím tlaku a elektrického proudu, působící po určitý čas. Princip odporového svařování je znázorněn na schématu Obrázek 2a). Při tomto typu svařování je využíváno teplo vznikající pomocí elektrického proudu, přiváděného do soustavy svařování skrz elektrody, který následně prochází skrz svařované dílce (Obrázek 2b). Teplo zde vzniká díky elektrickému odporu, a to ve všech místech dotyku (R_K) a ohmickým odporem svařovaného materiálu (R_M). *[2]*



Obrázek 2 - Princip odporového svařování

Zdroj: [2], vlastní zpracování

1 – pohyblivá tlaková elektroda
2 – svařované díly
3 – pevná elektroda
4 – zdroj proudu

Tato metoda svařování zpravidla nevyužívá přídavného materiálu jako např. při obloukovém svařování. Svar se tvoří rychlým natavením a následným ztuhnutím určité části základního materiálu. Proud se do soustavy přivádí konduktivně pomocí elektrod a má při svařování vysokou intenzitu (až 100 000 A) a nízké napětí (5–15 V). Hlavní výhodou odporového svařování je vysoká produktivita, díky velice krátkému času svařování a automatickému řízení procesu svařování. *[3]*

4.2 Používané materiály pro svařování

U odporového svařování je nejvhodnější svařovat díly z nízkouhlíkové oceli – s obsahem uhlíku do 0,22 % (zaručená svařitelnost). Dále lze také svařovat díly z oceli austenické, slitiny niklu, ale také kombinace materiálů, jako např. ocel nízkouhlíková s ocelí nástrojovou, hliníkem či jeho slitinami apod. Velikou výhodou odporového svařování je pak možnost svařovat pozinkované nebo pocínované materiály, kdy nedochází k výraznému porušení povrchové úpravy. *[2]*

Naopak složitější je svařování materiálů jako je měď, hliník a jejich slitiny. Důvodem je jejich vysoká tepelná vodivost, u hliníku je navíc problematické odstraňování oxidu z povrchu materiálu před samotným svařováním. Oxid hliníku je na povrchu velmi nežádoucí – má velký elektrický odpor a vysokou teplotu tavení. Tím brání vytvoření dokonalého svarového spoje. Může také nastat jev, kdy malé částečky hliníku při svařování přilnou na povrch měděných elektrod a tím se životnost elektrod snižuje. Přes všechny tyto nevýhody se slitiny hliníku hojně využívají v průmyslu, především díky jeho malé hmotnosti. Právě celková hmotnost vozidla je významná pro úsporu energie (paliva), a s tím spojenou ochranou životního prostředí. Hliníkové slitiny s nízkou hustotou a snadnou recyklovatelností je považován za ideální a potencionální konstrukční materiál v automobilovém průmyslu. *[2], [12], [13]*

Tabulka Příloha 1 znázorňuje vzájemnou svařitelnost různých materiálů, běžně používaných v praxi.

4.3 Základní dělení odporového svařování

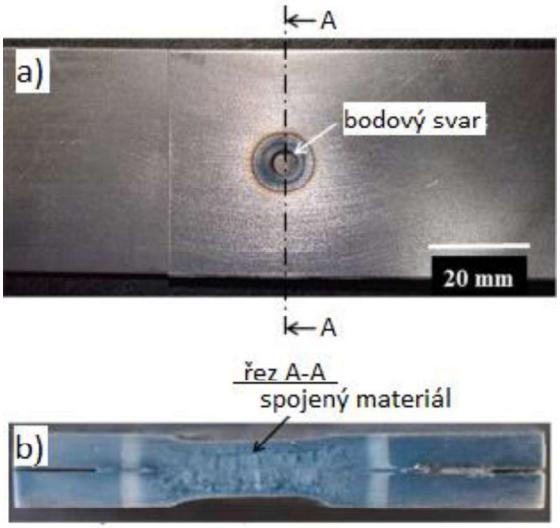
Odporové svařování se dle tvaru elektrod, jejich uspořádání a dle způsobu přenosu proudu dělí na:

- Bodové
- Švové
- Výstupkové
- Stykové – odtavením
- Stykové – stlačením *[2]*

Právě problematice svařování bodového a švového je věnována tato práce.

4.4 Bodové svařování

Bodové svařování je spolu se svařováním švovým nejznámější a nejvyužívanější metoda odporového svařování a díky svým výhodám je hojně využívána pro svařování v průmyslu s kusovou i sériovou výrobou, jako je například automobilový, letecký průmysl apod. Při sestavování karosérií automobilů je více než 90 % spojů prováděné právě pomocí bodových svarů, což je u moderních vozů přibližně 2000 až 5000 svarů na jedno vozidlo, s celkovou produkcí až 7 milionů svarů za den. Vzhled bodového svaru, včetně podélného řezu svarem, znázorňuje následující Obrázek. *[1], [11]*

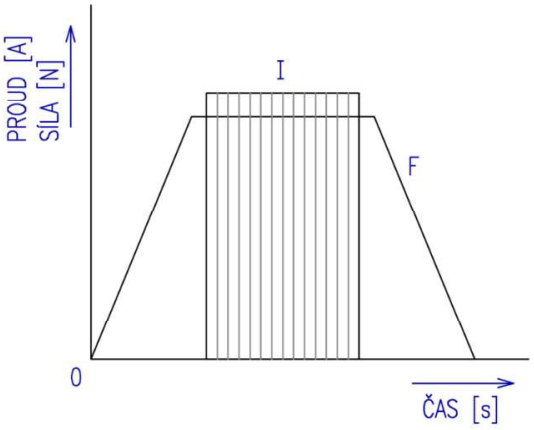


Obrázek 3 - Bodový svarový spoj

Zdroj: [16]

- **Charakteristika**

Svařované díly se navzájem přeplátují a následně stlačí tyčovými elektrodami. Elektrody jsou připojeny na zdroj proudu a napětí – svařovací transformátor. Plochy stlačené elektrodami se při průchodu proudu roztaví díky vzniklému elektrickému odporu (viz. kapitola 4.1, Obrázek 2 Princip odporového svařování). Následně po vypnutí proudu, ale při stálém působení tlaku, materiál ztuhne a vytvoří svarový spoj, tzv. svarovou čočku. Pro stlačování elektrod lze použít 3 způsoby – mechanicky, pneumaticky nebo hydraulicky. Bodové svařování se běžně využívá k pevnému spojení plechů o tloušťce kolem 3 mm, speciálními zařízeními je však možné svařovat plechy až do tloušťky 25 mm. *[2]*



Obrázek 4 - Grafický průběh svařování

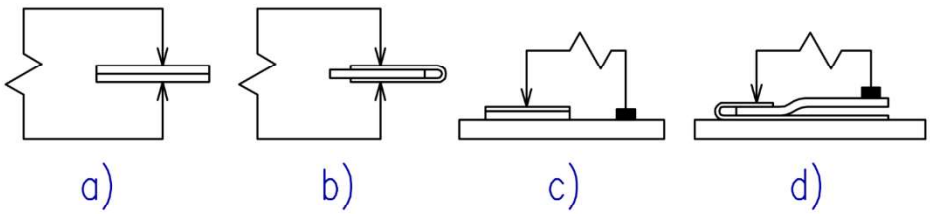
Zdroj: [2], vlastní zpracování

- **Přímé bodové svařování**

Přímé svařování je způsob bodového svařování, kdy jsou svařovací elektrody umístěny v jedné ose naproti sobě a obě jsou přitlačovány na svařované dílce vůči sobě. Přímé bodové svařování je znázorněno na Obrázku 5*a)* a 4*b).*

- **Nepřímé bodové svařování**

Nepřímé svařování je naopak způsob bodového svařování, kdy mají svařovací elektrody různé osy, umístěných zpravidla z jedné strany svařovaných dílců a jsou přitlačovány vůči podložce. Základní druhy nepřímého bodového svařování jsou znázorněny na Obrázku 5*c)* a 5*d).*

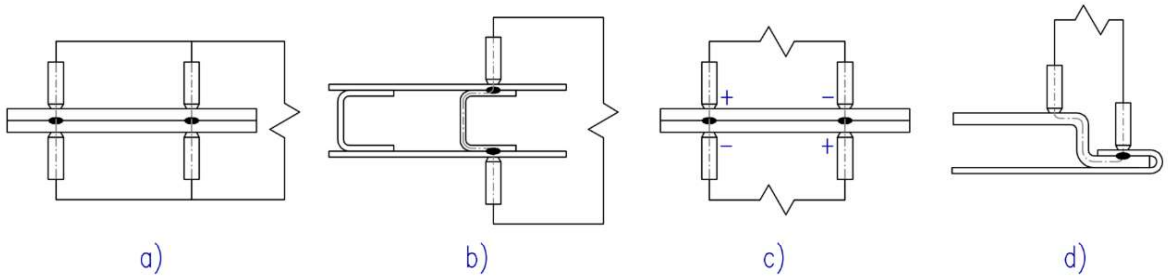


Obrázek 5 - Běžné způsoby bodového svařování

Zdroj: [5], vlastní zpracování

V praxi je možné se setkat i s různými modifikacemi způsobů bodového svařování, určeného například pro urychlení procesu svařování, pro zvláštní tvary svařovaných dílců apod. Hlavně v sériové a hromadné výrobě je velmi hojně využíváno dvoubodového (vícebodového, mnohobodového) svařování, kdy jsou na jednom stroji ke zdroji elektrického proudu připojeny dvě (nebo více) svařovací elektrody a tím se při jediném kroku vytvoří více bodových svarů. Podle zapojení elektrod se toto vícedobé bodové svařování dále dělí na paralelní (Obrázek 6a), kde je tzv. dělená elektroda zapojena právě paralelně, a na sériové (Obrázek 6b), kde je kde

jsou elektrody zapojeny v sérii. Princip svařování push–pull (Obrázek 6c), česky nazýván dvoudobé svařování v protitaktu, je způsob bodového svařování, kdy jsou elektrody jedné strany zapojeny k samostatnému transformátoru a elektrody druhé strany k dalšímu. Polarita jednoho páru elektrod je obrácena a tím vytváří protipóly vůči druhému páru. Další způsob je bodové svařování na podložce (Obrázek 6d), kdy jsou dílce svařovány vůči podložce. Pomocí bodového svařování, překrýváním jednotlivých bodových svarů, se také dá docílit těsného souvislého svaru jako je tomu u švového svařování. *[5]*

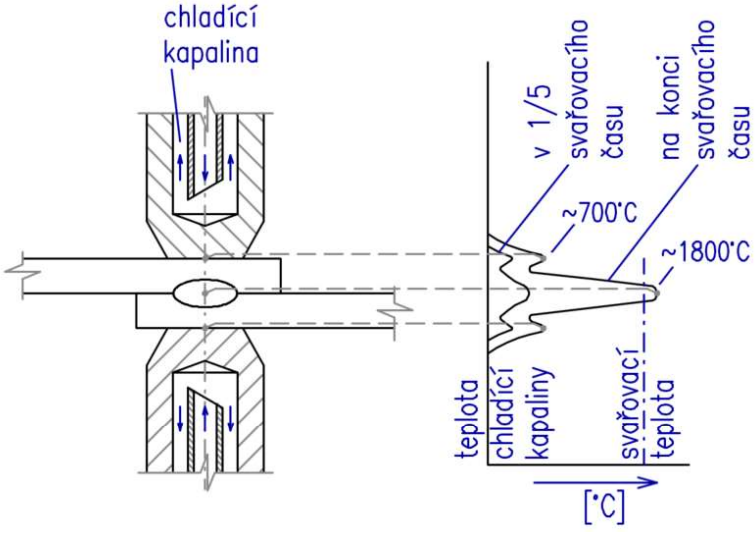


Obrázek 6 - Speciální způsoby bodového svařování

Zdroj: [5], vlastní zpracování

- **Vznik tepla**

Veličiny vstupující do soustavy svařování jsou – svařovací proud I [A], svařovací čas t [s] a svařovací odpor R [Ω]. Z těchto veličin (vlivů při svařování) vyplývá množství vzniklého tepla při svařování Q [J], využitím Joulova-Lorenzova zákona: $Q = R \cdot I^2 \cdot t$. Na Obrázku 7 je znázorněn průběh tepla při vzniku bodového svaru. *[1], [2]*

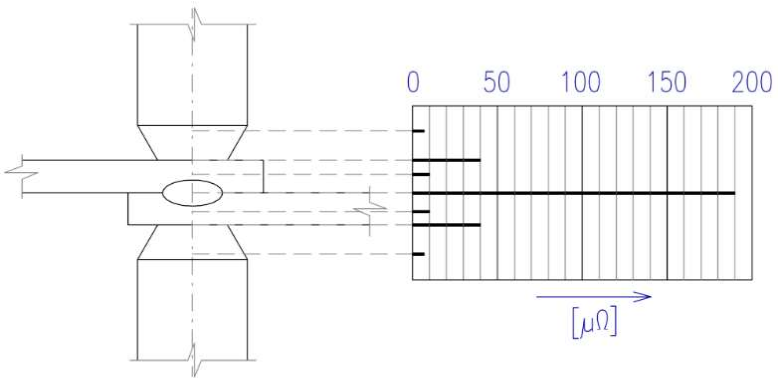


Obrázek 7 - Graf množství tepla v soustavě bodového svařování

Zdroj: [5], vlastní zpracování

- **Odpor vstupující do soustavy**

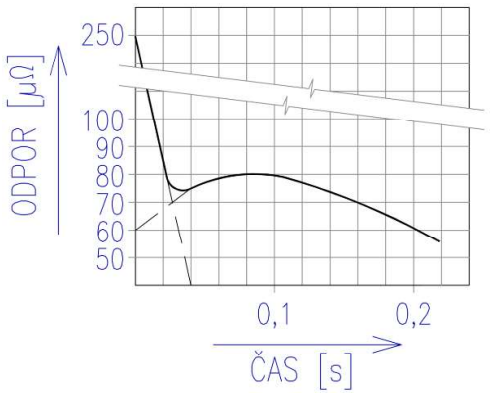
Celkový ohmický svařovací odpor R má několik složek a to – vlastní odpor elektrod, přechodové odpory na styku mezi elektrodou a svařovaným materiálem, vlastní odpor svařovaného materiálu a přechodový odpor na styku těchto dílů (Obrázek 8). Každý jednotlivý odpor je funkcí času a místa, jelikož ve svaru je teplotní pole prostorově nehomogenní a mění se v závislosti na čase. Časově proměnný je rovněž i celkový odpor mezi elektrodami. *[1]*



Obrázek 8 - Složky odporu při svařování

Zdroj: [1], vlastní zpracování

Na příkladu bodového svařování nelegovaného plechu na Obrázku 8 je znázorněn průchod všech odporů svařovací soustavou. Hlavní složkou vstupující do svařovacího procesu je přechodový odpor ve styku svařovaných materiálů, který způsobí rychlý ohřev materiálu v tomto bodě styku a následně rychle zaniká. Dále je převážná část tepla tvořena odporem materiálu. Díky prvotnímu přechodovému odporu a odporu materiálu vzniká dost tepla k ohřátí na svařovací teplotu – materiál se taví a za stálého působení tlaku se vytvoří svarová čočka při svařování bodovém, popř. švový nebo jiný druh svaru. *[1]*

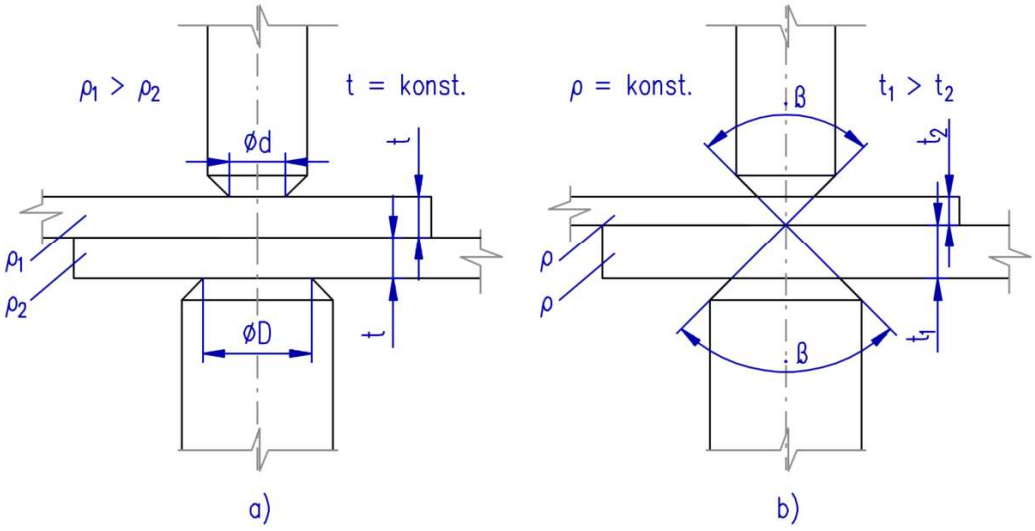


Obrázek 9 - Závislost odporu na svařovacím čase

Zdroj: [1], vlastní zpracování

4.4.1 Tepelná rovnováha bodového svařování

Aby bylo dosaženo kvalitní pevné svarové čočky, je třeba dodržet jedno z pravidel odporového svařování a tím je tepelná rovnováha svarového spoje. Rovnováha může být narušena různou tloušťkou svařovaných dílů, jejich materiálovým složením, či např. rozdílnými pracovními plochami elektrod. Když nebude jeden z aspektů tepelné rovnováhy dodržen, dojde k vytvoření nesymetrické svarové čočky z důvodu nerovnoměrného tavení svařovaných dílců.



Obrázek 10 - Tepelná rovnováha bodového svařování

Zdroj: [5], vlastní zpracování

Jak již bylo zmíněno, svařovat lze i plechy různých materiálů (Obrázek 10a). Nutné je brát v zřetel ohmický odpor materiálu R, kde na straně plechu s vyšším ohmickým odporem je třeba volit elektrodu s větším průměrem (pracovní plochou), zato na straně s nižším odporem je umístěna elektroda s menším průměrem. Průměr elektrod je přímo úměrný ohmickému odporu plechu – při volbě elektrod se proto musí vycházet nejprve z doporučených hodnot pro jednu elektrodu, poté je dle přímé úměrnosti odvozena druhá. Touto volbou elektrod je následně dosaženo rovnoměrného tavení obou materiálů. *[5]*

Opačným příkladem je svařování dvou plechů stejného materiálu, ale různé tloušťky (Obrázek 10b). Zde je třeba dbát na to, aby byl zachována tepelná rovnováha reprezentovaná úhlem β. Tím se vyrovná zvýšený odpor materiálu větší tloušťky, způsobený delší drahou proudu. *[5]*

4.4.2 Měkký a tvrdý svařovací režim

Svařování se rozděluje dle velikostí vlivů při svařovacím procesu na měkké a tvrdé svařování. Svařovat lze buď při nízkém proudu a dlouhém času svařování, nebo naopak při vysokém proudu a krátkém času svařování. Hodnoty parametrů pro tyto dva režimy svařování jsou uvedené v následující tabulce. Tyto hodnoty jsou směřovány pro svařování ocelí s nízkým obsahem uhlíku – hranice se jinak běžně určuje dle specifických hodnot vztahu tlaku a proudu vůči pracovní ploše svařovací elektrody.

Parametry	Měkký režim	Tvrdý režim
Svařovací tlak $[N \cdot mm^{-2}]$	< 60	> 80
Hustota svařovacího proudu $[A \cdot mm^{-2}]$	< 150	> 200
Svařovací čas [s]	0,1–1	0,01–0,1

Tabulka 1 - Měkký a tvrdý svařovací režim

Zdroj: [5], vlastní zpracování

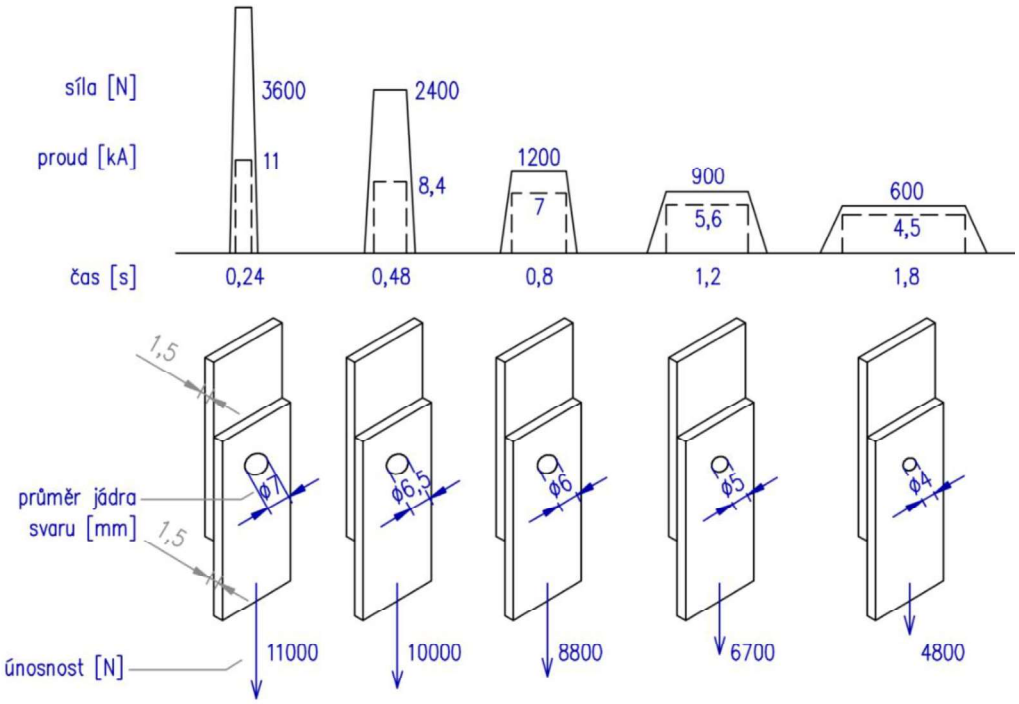
4.4.3 Výhody a nevýhody svařovacích režimů

- **Měkký svařovací režim**

Svařovaný materiál je v průběhu svařovacího procesu celkem značně teplotně ovlivněný, svarová čočka má malý průměr, vysokou výšku a hrubozrnnou strukturu. Tato struktura a tvar svaru zhoršuje jeho pevnost a tím pádem i únosnost při mechanickém namáhání. Další nevýhodou je vysoké teplotní namáhání elektrod, což snižuje jejich životnost a mohou také zanechávat v materiálu hluboké nevzhledné otisky, když je materiál prohřátý v celé tloušťce včetně jeho povrchu. Spotřeba elektrické energie je při tomto režimu vyšší (s ohledem na nižší účinnost a větší tepelné ztráty při svařování). Proces svařování je tedy velmi časově náročný a ekonomicky nevýhodný, a proto je produktivita práce nízká. Kvůli značnému množství dodaného tepla do materiálu se může celý svařovaný dílec deformovat. *[1], [5], [6]*

- **Tvrdý svařovací režim**

Svarová čočka má velký průměr a malou výšku (opačně než u měkkého svařování) a svařování je produktivnější díky krátkému času potřebného k vytvoření jednoho bodového svaru. Avšak svařovací stroje mají větší požadavky na výrobu a produkci – je třeba vyššího příkonu, vyšší přítlačné síly při svařování a přesné měření času svařování, což některé starší svařovací stroje neumožňují a tím nejsou pro tvrdý režim vhodné. Vlastnosti čočky při mechanickém namáhání jsou o 100-120% vyšší než při měkkém režimu. Tudíž lze docílit vyšší produktivitě a nižší pracnosti při výrobě, díky možnosti snížit počet bodů na svarku o cca 50-60 %. *[1], [5]*



Obrázek 11 - Únosnost bodových svarů

Zdroj: [6], vlastní zpracování

4.4.4 Parametry bodového svařování

- **Přítlačná síla při svařování F_s** [N]

Svařovací přítlačná síla lze vypočítat hned několika způsoby. Jedním z nich je vypočítat ji jako součin pracovní plochy elektrody a měrného tlaku, kde pracovní plochu lze získat například z rovnice výpočtu průměru elektrody $d = 2t + 4\ [mm]$, jejíž výchozí hodnota je tloušťka materiálu t. Měrný tlak má předepsané hodnoty dne následující tabulky. *[5]*

režim svařování	materiál svařovaných dílců	tloušťka svařovaných dílců	měrný tlak $[N \cdot mm^{-2}]$
měkký režim	nízkouhlíková ocel	do 5,0 mm	15 až 40
tvrdý režim		do 1,5 mm	20 až 60
		do 5,0 mm	60 až 90
	nerezová ocel	-	80 až 150
	hliník a jeho slitiny	-	70 až 150
	mosaz, bronz	-	90 až 110

Tabulka 2 - Hodnoty měrného svařovacího tlaku bodového svařování

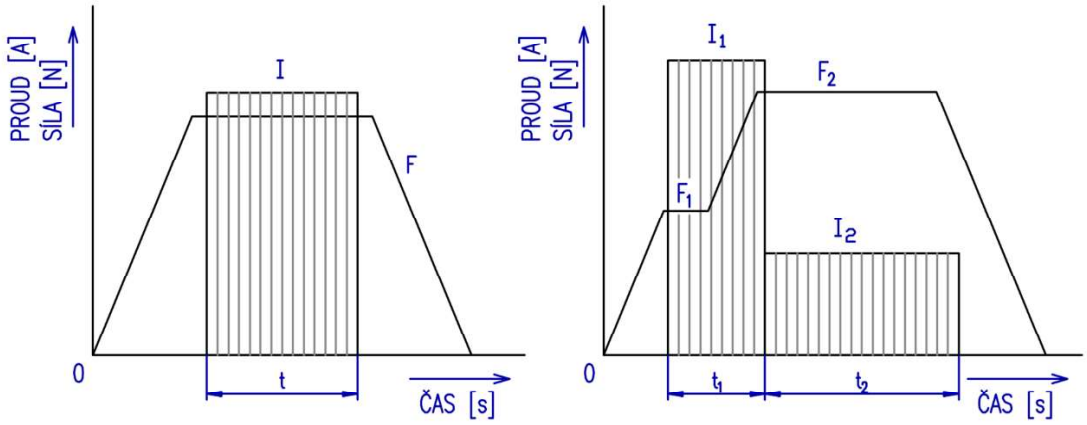
Zdroj: [5], vlastní zpracování

Svařovací přítlačnou sílu lze také získat z poměrného vztahu vůči tloušťce materiálu:

$$F_s = (1000\ až\ 2500) \cdot t\ [N]$$

Přítlačná sílu je možné v praxi ještě navýšit dle potřeby, například při svařování tuhých a zdeformovaných dílců, aniž by byla poškozena struktura a jakost svaru, sníží se tím šance na možný výstřik roztaveného materiálu ze středu svarové čočky apod. Správně nastavená hodnota síly má také vliv na pevnost bodového svaru při tuhnutí, přítlačná síla funguje jako kovací síla za tepla, a tím se zjemňuje struktura svaru při krystalizaci, popř. žíhá u kalitelných materiálů při malém průchodu proudu. U programového řízení tlaku se přítlačná síla po zhotovení svaru ještě zvýší, působí tak opět jako kovací síla a zároveň pomáhá odvádět většinu

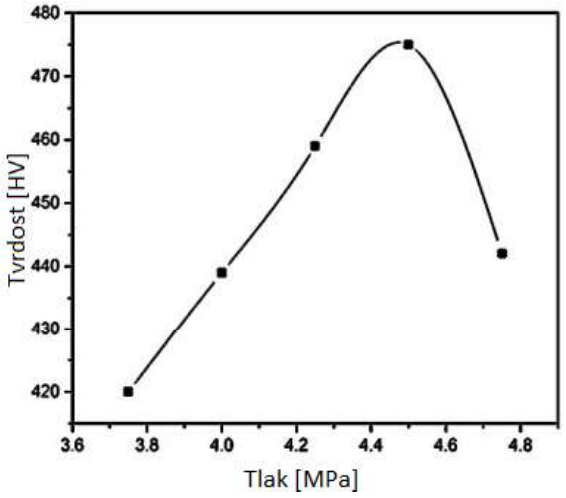
tepla ze svarového spoje. Přítlačná síla by však nikdy neměla překročit mez kluzu materiálu elektrod. Přítlačná síla F je graficky znázorněna na Obrázku 12, kde se porovnává klasický a programovaný průběh bodového svařování. *[2], [5]*



Obrázek 12 – Normální (vlevo) a programový (vpravo) průběh bodového svařování

Zdroj: [5], vlastní zpracování

Bylo zjištěno, že tahová smyková pevnost svaru se zvyšuje se zvýšením síly elektrody až do určité meze a poté se snižuje. Následující graf znázorňuje vliv tlaku elektrod na pevnost svarové čočky, testovanou na mikrotvrdost Vickers. Svařovaným materiálem byla u této zkoušky nízkouhlíková ocel s příměsí manganu pro získání dvoufázové struktury (85 % ferit, 15 % martenzit). *[10]*



Obrázek 13 - Vliv vyvinutého tlaku elektrod na pevnost svaru

Zdroj: [10]

- **Svařovací proud I_s** [A]

Elektrický proud je dodáván do svařovací soustavy od transformátoru stroje, z jednofázového střídavého, či třífázového vysokofrekvenčního stejnosměrného zdroje elektrické energie. Svařovací proud je zásadním činitelem v tvorbě tepla při odporovém svařování a rovněž je jeho normální a programový průběh znázorněn na Obrázku 12. U některých materiálů je nutné, aby byly svařovací síla a proud měněny v průběhu svařovacího cyklu. Tyto změny jsou nezbytné zpravidla z technologických důvodů. Tyto materiály jsou například ušlechtilé oceli, lehké a barevné kovy. Na začátku svařovacího procesu je proud vysoký a přítlačná síla nízká. To zapříčiní že se zvětší přechodový odpor materiálu a tím tedy i množství tepla vytvořeného mezi svařovanými dílci. Při tavení materiálu se tlak postupně zvyšuje za stálého působení vysokého proudu. Následně se proud vypíná a svařované dílce se kovají, popř. materiálem prochází malé množství proudu a tím se žíhá. Kování a žíhání materiálu má rovněž různé hodnoty tlaku. *[5], [11]*

Proud se na strojích reguluje nejčastěji pomocí přepínání odboček přepojovače na primární straně transformátoru. Pro potřeby praxe se může svařovací proud určovat dle empirického vztahu, výpočtem proudu dle tloušťky jednoho plechu $t\ [mm]$:

$$I_S = 6500 \cdot t\ [A]$$

Nižší svařovací proud se volí při svařování materiálů s vysokým elektrickým odporem, naopak u materiálů s velikou tepelnou a elektrickou vodivostí je nutné volit vyšší intenzitu proudu. Touto volbou se ale obsluha vystavuje vysokému riziku vystříknutí materiálu, proto je nezbytné brát v ohled bezpečnost práce. Volbou malého svařovacího proudu se však nemusí dostatečně kompenzovat ztráty tepla vedením, sáláním do materiálu a do okolí a tím se vytvoří difúzní svar, který má velmi malou mechanickou pevnost. *[1]*

- **Svařovací čas**

Svařovací čas je doba průchodu proudu při svařovacím cyklu, tedy čas $t\ [s]$ na Obrázku 12 vlevo a čas $t_1 + t_2\ [s]$ na Obrázku 12 vpravo. Tento čas se měří v sekundách, někdy také v periodách Per, určované dle frekvence f $(Per = f^{-1})$. Právě perioda je běžná časová hodnota používaná u moderních svařovacích strojů svařujících zejména tvrdým režimem. Kondenzátorové svářečky pak pracují v ještě kratších dílčích časech než 1 Per, v tzv. ultrakrátkém režimu.

4.4.5 Volba svařovacích parametrů bodového svařování

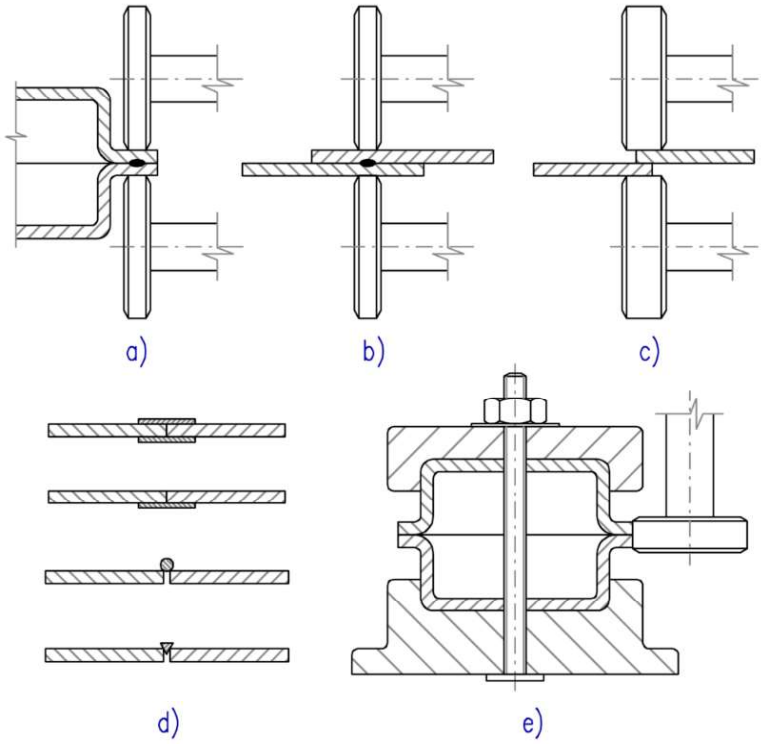
V tabulce Příloha 2 jsou uvedeny doporučené parametry bodového svařování pro nejběžněji svařované materiály – nízkouhlíkové oceli s obsahem uhlíku do 0,3 %, nerezavějící ocel a lehké kovy. V tabulce jsou parametry pro oba svařovací režimy, tvrdý režim je pod symbolem I a měkký pod symbolem II.

4.4.6 Povrchová úprava materiálu před bodovým svařováním

Svařované dílce při odporovém svařování musí dokonale stejnoměrně dotýkat a lícovat, proto je pro výslednou jakost svaru povrchová úprava před svařováním značně významná. Povrch obou plechů se musí zbavit nečistot jako je olej, rez, či okuje. Mechanické čištění materiálu se běžně provádí pomocí smirkového papíru, smirkovým kotoučem, omítáním vzdechem či pískem, nebo omíláním. Chemické čištění se používá jen výjimečně. Před svařováním se může povrch plechů ošetřovat vůči interkrystalické korozi bodů, či vnikání prachu mezi svařované díly. Použitím ošetřujících nátěrů nebo ochranné pasty se zamezí vzniku této koroze. Tyto metody povrchové úpravy se využívají často při svařování karosérií automobilů v automobilovém průmyslu. Povrchové úpravy materiálu jako je pocínování či pozinkování nemají značný vliv na jakost bodového svaru, proto se nemusí před svařováním nijak odstraňovat. *[8]*

4.5 Švové svařování

Švové odporové svařování je svým principem velmi blízké již zmíněnému bodovému svařování natolik, že rozměry elektrod, či síly vyvinuté při svařování mohou být velmi obdobné. Způsob, jakým je vytvořena svarová čočka je totožný. Tvar elektrod je ovšem kotoučový a svařované díly se při samotném svařování pomocí elektrod postupně odvalují. Nejběžnější způsoby švového svařování jsou ilustrovány na dalším obrázku.



Obrázek 14 - Princip švového svařování

Zdroj: [5], vlastní zpracování

Obrázek 14a), 14b) – švové svařování s přeplátovanými dílci – Přeplátování svařovaných materiálů je rozměrově větší než šířka (pracovní plocha) elektrod. Tato velikost přeplátování dílců zamezuje spálení jejich okrajů a vystříknutí roztaveného kovu při procesu svařování.

Obrázek 14c) – rozválcovací (zarovnávací) švové svařování – Speciální modifikace předchozí varianty, avšak přeplátování je velmi malé a při svařování je materiál zarovnán do roviny.

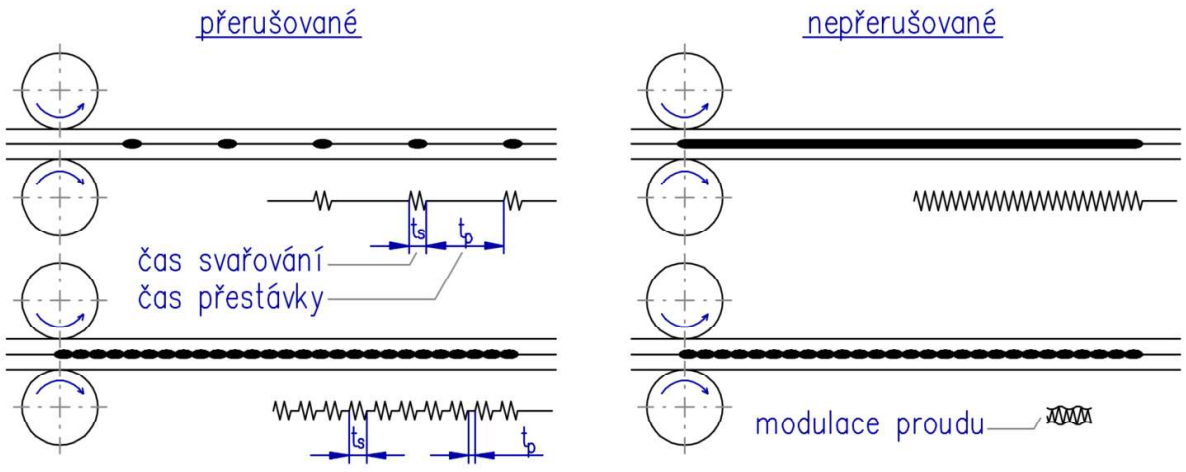
Obrázek 14d) – švové svařování s přídavnými pásky – Svařované dílce nejsou přeplátovány. Pro jejich spojení se využívá přiložených přídavných pásků (z vrchní nebo spodní strany či oboje) a jejichž roztavením se utvoří tupý spoj.

Obrázek 14e) – švové svařování s pevnou či pohyblivou podložkou, trnem, nebo putujícím kotoučem – metoda často používaná u součástí se složitější konstrukcí. Elektrody v tomto případě tvoří soustavu s kombinacemi následujících: neotáčející se pevná podložka, otáčející se kotoučová elektroda s pevnou osou, nebo posuvná podložka. *[5]*

Švové svařování je technologický postup výroby svaru kdy:

- nastavené parametry svařování vytváří s pomocí kotoučových elektrod bodové svary v určité vzdálenosti od sebe a vytváří tak *švový přerušovaný svar* (Obrázek 15). Tento způsob svařování je využíván při dlouhé délce svařované plochy, kdy není těsnost zapotřebí a je tím pádem ekonomicky i časově výhodnější než používání bodového svařování.
- kotoučové elektrody tvoří celistvý podlouhlý svar. Tento svar je nazýván *švový nepřerušovaný svar* (Obrázek 15) a v podstatě je tvořen sérií bodových svarů uspořádaných v řadě za sebou těsně se překrývajících, tvořený nepřetržitým průchodem svařovacího proudu elektrodami, popř. je proud modulován. To vytváří svar tak těsný, že při správném postupu (svařovacích parametrech) může být nepropustný plyny ani kapalinami. V praxi se lze s tímto svarem setkat u výrobků jako jsou radiátory, různé plechové nádoby, nádrže a blatníky automobilů apod.

[5], [8]

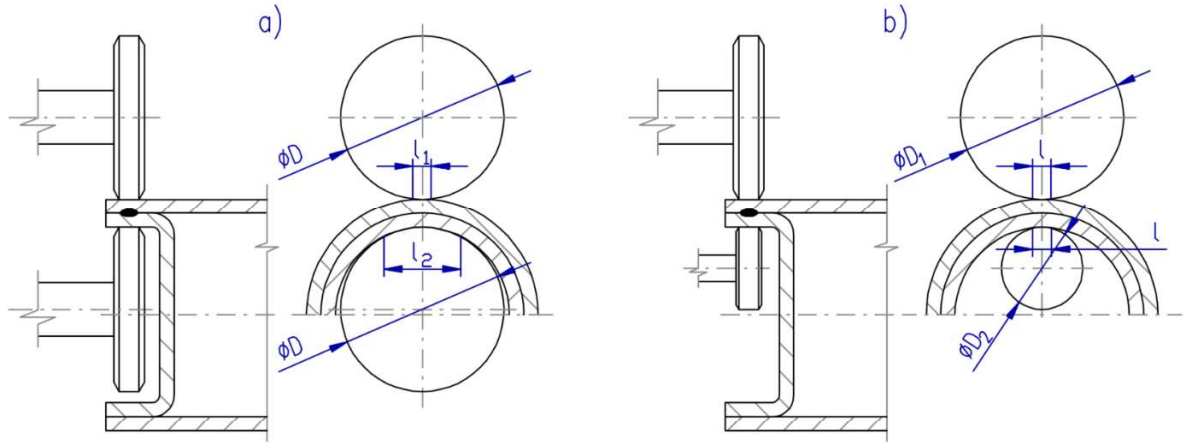


Obrázek 15 - Typy svarů švového svařování

Zdroj: [5], vlastní zpracování

4.5.1 Tepelná rovnováha švového svařování

Již dříve bylo zmíněno, že švové a bodové svařování jsou si svými vlastnostmi značně podobné. Tepelná rovnováha švového svarového spoje není výjimkou, pouze je průměr elektrody nahrazen šířkou kotouče a přibývá jeden další faktor – průměr elektrodového kotouče. *[5]*

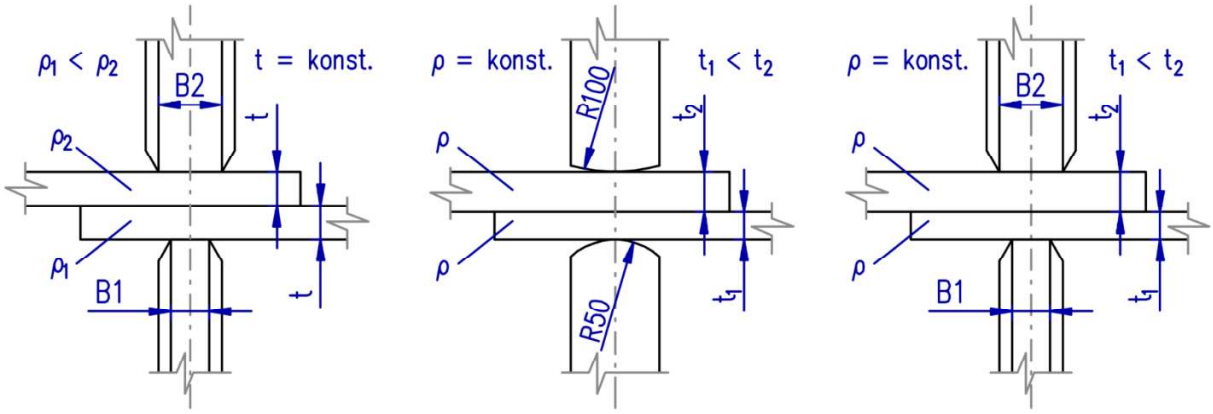


Obrázek 16 - Tepelná rovnováha švového svařování – pracovní plochy elektrod

Zdroj: [5], vlastní zpracování

Obrázek 16 ukazuje na typickém příkladu problematiku velikosti pracovní plochy. V případě *a)* jsou průměry kotoučů shodné. Tím pádem je pracovní plocha l_2 mnohem větší než pracovní plocha l_1 a koncentrace proudu působícího na svařované dílce by byla rozdílná. Svar by tedy byl nerovnoměrný a proto nekvalitní. V případě *b)* je průměr kotouče D_2 volen tak, aby pracovní plocha l obou kotoučů byla totožná. *[5]*

Dalším faktorem v soustavě je jakost a tloušťka svařovaných dílců, zde se docílí tepelné rovnováhy změnou šířky kotoučové elektrody, popřípadě volbou elektrody s jiným zaoblením.



Obrázek 17 - Vyrovnání tepelné rovnováhy s různými parametry elektrod a materiálů

Zdroj: [5], vlastní zpracování

4.5.2 Parametry švového svařování

Švový svar tvoří série bodových svarů uspořádaných za sebou v daných intervalech, proto jsou parametry švového svařování obdobné jako parametry bodového svařování. Pár jich zde však přibývá: Jakost švového svaru ovlivňuje rozteč jednotlivých svarů mezi sebou, vyvinutý tlak, proud, rychlost a velikost cyklu svařování a rozměrové parametry kotoučové elektrody, jako je šířka či profil elektrody a její průměr. *[1], [5]*

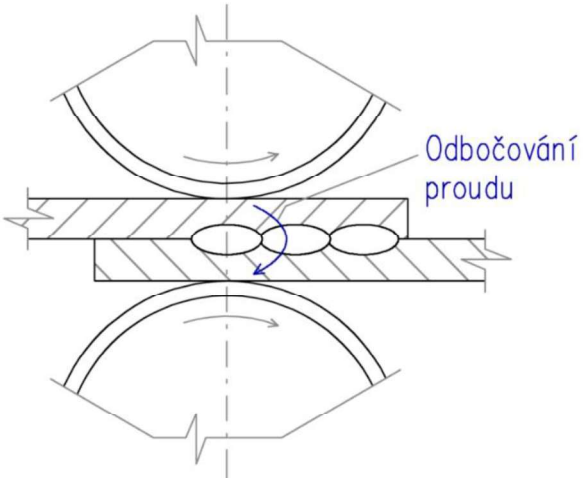
- **Svařovací tlak**

Volba velikosti použité přítlačné síly kotouče na svařovaný díl úzce souvisí s druhem, jakostí a povrchu svařovaných materiálů, tvaru, rozměrech a materiálech kladek. U volby tlaku se také bere v zřetel opotřebování, a tím tedy životností, kotoučových elektrod. *[1]*

Při procesu svařování se elektrody odvalují a není tedy možné udržet svarovou čočku pod tlakem i po vytvoření svaru, jako je tomu u bodového svařování. Taktéž velikost přítlačné síly přímo souvisí s velikostí třecí síly mezi elektrodou a svařovaným dílcem – při malé přítlačné síle může materiál proklouzávat a tím je kvalita svaru výrazně snižována. Z těchto důvodů je třeba udržovat svařovací tlak značně vysoký, téměř dvojnásobný oproti bodovému svařování. Tím se ale kotoučové elektrody výrazně opotřebovávají – řešením je použití širších elektrod, kdy je možné vynaložit větší přítlačné síly na svařované dílce (současně je ale nutné zvýšit elektrický příkon – proud). Opotřebování elektrod lze také snížit správnou volbou jejich chlazení při svařování. Opotřebování nástrojů se v praxi klade veliký nárok – při zdeformování elektrod je jakost svaru nevyhovující a náklady spojené se svařováním se zvyšují. *[5]*

- **Svařovací proud**

Velikost použitého proudu při švovém svařování závisí rovněž na druhu, jakosti, povrchu, tvaru a rozměrech svařovaných dílců, rozměrech kotoučových elektrod, ale i na svařovací rychlosti, přítlačné síle a svařovacím cyklu. Proud se musí zvýšit právě v situacích, jako je vyšší svařovací rychlost, svařovací tlak a větší šířka elektrod, či kratší svařovací cyklus. Při svařování přerušovaném, kdy se proud přerušuje pro vytvoření více bodových svarů v řadě, se proud přerušuje 5krát až 20krát za sekundu, v závislosti na svařovací rychlosti. Svařovací proud je také úzce spjatý s jevem nazývaným *odbočování proudu* (Obrázek 18). Proud při švovém svařování neprochází přímo od dotyku jedné elektrody k dotyku druhé, ale vybočuje přes oblasti s nižším odporem, což je v tomto případě předchozí vytvořená svarová čočka, a vznikají tím ztráty. *[1], [5], [8]*



Obrázek 18 - Odbočování proudu

Zdroj: [5], vlastní zpracování

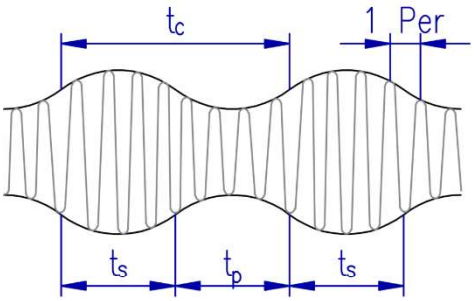
- **Svařovací rychlost**

Svařovací rychlost je identická s obvodovou rychlostí odvalujících se elektrod a závisí na druhu a tloušťce svařovaných dílců, kdy se se zmenšující tloušťkou rychlost zvyšuje. Dále hraje významnou roli velikost svařovacího proudu a počet svařovacích cyklů za jednotku času, kde při jejich zvyšování může technolog zvýšit i svařovací rychlost. *[1]*

V praxi se musí ovšem brát v zřetel zvláštní potřeby a možnosti svařování jednotlivých dílců. Nejčastěji se rychlost švového svařování pohybuje od 0,5 do 6 m/min. Například při svařování dlouhých přímých ocelových trubek z ocelových pásů, je možno svařovat do rychlosti až 30 m/min, avšak svařování více složitě zakroucených dílců vyžaduje svařování zpomalit, zvláště kvůli složité manipulaci a tím i podmíněné zručnosti obsluhy (svářeče). Zvyšováním rychlosti svařování se také technolog vystavuje riziku tvorby a nekvalitních a netěsných svarů. *[5]*

- **Svařovací cyklus**

Dalším parametrem v procesu švového svařování je svařovací cyklus. Svařovací cyklus je poměr času kdy proud prochází elektrodami a materiálem a času kdy jimi proud neprochází. Oba časy se volí v závislosti na různých parametrech – čas průchodu proudu podléhá druhu a tloušťce svařovaných dílců a velikosti použitého proudu, zatímco čas přerušení je posuzován dle požadované rozteče jednotlivých svarů a svařovací rychlosti. Při nižších rychlostech svařování může docházet k přehřívání svarů a tím je jejich jakost znehodnocena. K zamezení tomuto jevu se využívá přerušování proudu či modulace proudu (Obrázek 19), kdy je mezi časem svařovacího impulzu (t_s) proud na určitý čas přerušen (t_p) a tím je vytvořen kvalitnější a vzhlednější svarový spoj. Součet těchto časů je nazýván právě čas svařovacího cyklu (t_c). Využití modulace u švového svařování je dosaženo zaručeného provaření jednotlivého bodového svaru v řadě, aniž by byl zřetelný vtisk elektrody do svařovaných dílců. U svařovacích rychlostí nad 6 m/min není modulace proudu zapotřebí, jelikož při takto vysokých rychlostech k přehřívání nedochází. Příloha 3 ilustruje vliv svařovací rychlosti a použité modulace na tvar výsledného švového svaru. *[1], [5]*

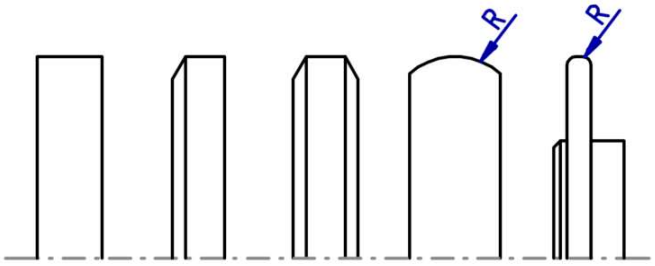


Obrázek 19 - Modulace svařovacího proudu

Zdroj: [5], vlastní zpracování

- **Konstrukce a rozměry kotoučových elektrod**

Při volbě tvaru pracovní plochy kotoučových elektrod se musí brát v zřetel druh svařovaného materiálu, kde se pro ocel používají ploché pracovní plochy elektrod a pro švové svařování hliníku, jeho slitin a dalších neželezných kovů se volí zaoblené (Obrázek 20). Dalšími faktory jsou svařovací proud, tlak a přístupnost svařovaného spoje, podle kterých se dále volí i průměr a šířka elektrod. *[1]*



Obrázek 20 – Běžné tvary kotoučových elektrod pro švové svařování

Zdroj: [5], vlastní zpracování

Švové svařování se stejně jako bodové rozděluje smyslem svařování na *přímé* a *nepřímé* svařování. Přímé švové svařování se vyznačuje souosými kotoučovými elektrodami, kdy je každá z elektrod umístěna z jedné strany svařovaného materiálu. Elektrody nepřímého švového svařování jsou pak umístěny zpravidla z jedné strany svařovaných dílců. Uzpůsobením tvaru, konstrukce a velikosti kotoučů elektrod lze svařovat nejrůznější plechy. Některé příklady přímého a nepřímého svařování jsou na obrázcích Příloha 4 a Příloha 5. *[5]*

4.5.3 Volba svařovacích parametrů švového svařování

Dva grafy Příloha 6 a Příloha 7 znázorňují závislosti mezi jednotlivými parametry švového svařování popsanými v předchozí kapitole. První graf pojednává o svařovací rychlosti, která je určována dle hodnot modulace (přerušování) tak, aby bylo dle požadavků výroby docíleno adekvátního překrytí bodových svarů a tím byl vytvořen celistvý těsný svar, nebo bylo dosaženo přesné rozteče jednotlivých bodových svarů. Druhý graf poukazuje na volbu svařovací rychlosti podle normalizovaných průměrů kotoučových elektrod a počtu otáček. Otáčky kotoučových elektrod se mění podle konstrukce stroje buď plynule, či po stupních. *[5]*

Tabulka Příloha 8 uvádí parametry švového svařování pro v praxi nejběžněji používaných materiálů ke svařování. Nízkouhlíkové oceli s obsahem uhlíku do 0,3 % a austenitické nerezavějící oceli (CrNi) jsou ke svařováním nejvhodnější – svařitelnost dobrá. Svařitelnost

hliníku je o něco horší než u těchto materiálů, přesto je však hojně používán. Svařování ocelí se se zvyšujícím obsahem uhlíku stává složitějším, stejně tak se hůře svařují feritické oceli, na které mají tepelné změny nepříznivý účinek, a martenzitické (samokalitelné) oceli, které lze svařovat pouze velmi pomalu s použitím malého proudu, jeho delším průchodem a nutným bezprostředním tepelným zpracováním po svaření. Švové svařování hliníku a jeho slitin je o něco horší než u svařování bodového, jelikož z důvodu jeho vysoké tepelné a elektrické vodivosti je při svařování přivozena malá účinnost kvůli velkým ztrátám odbočováním proudu skrz svařovaný materiál. *[5]*

4.5.4 Povrchová úprava materiálu před švovým svařováním

V praxi je před samotným svařováním ještě třeba dbát vysoké pozornosti důkladnému očištění povrchu svařovaných dílců pro vytvoření dokonalého svaru. Svařováním materiálu neočištěného například od rzi není možné ideální svar vytvořit, jelikož svařovací proud prochází pouze čistými místy, vzniká zde vysoká koncentrace proudu a nastávají nevyhovující okolnosti jako náhlé místní tavení materiálu, či opalování elektrod. Takto znehodnotit se mohou kotoučové elektrody již po pár použitích a jejich životnost se velmi výrazně snižuje. *[5]*

- **Mechanické čištění materiálu**

Povrch materiálu je třeba očistit od nečistot jako jsou okuje, rez, či různé laky apod. K mechanickému čištění je nejvhodnější kartáčování, broušení, nebo moření materiálu. Nedoporučuje se použití pískování materiálu, jelikož po otryskání povrchu pískem mohou na povrchu ulpět jeho jemné částice, které následně zvyšují přechodový elektrický odpor mezi elektrodami a svařovanými dílci. Elektrody se výrazněji opotřebovávají a svařování se stává ekonomicky náročnějším. *[5], [8]*

- **Chemické čištění materiálu**

U zoxidovaného povrchu svařovaného materiálu se nedoporučuje využívat technik mechanického očišťování povrchu. Oxidová vrstva na povrchu materiálu vytváří při svařování nepříznivý odpor, jelikož vrstva oxidu není konstantní. Provaření dílců je pak u každého z jednotlivých bodů různé a svar se stává nespolehlivým. Očištění materiálu kartáčem či jinými mechanickými způsoby se pouze poruší souvislost oxidové vrstvy, nebo se zahřeje a hrozí opětovné okysličení. Chemické čištění je nejvhodnější používat v sériové a hromadné výrobě. Očištěné ocelové plechy se doporučuje svařovat nejpozději do tří dnů po jejich mechanickém či chemickém očištění. *[5], [8]*

5 Praxe bodového a švového svařování

Následující podkapitoly referují o strojích bodového a švového svařování, a situacích, s kterými se může každodenně setkat obsluha odporových svářecích strojů.

5.1 Svářecí stroje bodového svařování

Odporové svařovací stroje (svářečky) rozeznáváme hlavně v ohledu na elektrickou energii, kterou stroj přizpůsobuje k vytvoření svarového spoje. Rozdělení strojů dle svařovacího proudu:

- proud síťového kmitočtu – kmitočet (frekvence) svařovacího proudu je totožná kmitočtu napájecí sítě
- proud sníženého (zvýšeného) kmitočtu – kmitočet svařovacího proudu je nižší nebo vyšší než kmitočet napájecí sítě
- stejnosměrný puls proudu – svařovací proud je reprezentován jediným kladným či záporným pulsem
- usměrněný proud – svařovací proud je transformátorem usměrňován
- akumulovaná energie – svařovací proud je reprezentován energií akumulovanou například v kondenzátoru svařovacího stroje

[5]

Dále se svařovací stroje rozdělují dle mnoha dalších parametrů, jako např. dělení dle specializace (univerzální, jednoúčelové), způsobu zatížení sítě (jednofázové, trojfázové), konstrukce stroje (stacionární stojanové či stolní, mobilní přenosné, pojízdné či závěsné, jednobodové, vícebodové apod.), počtu svařovacích míst (jednomístné, vícemístné), stupně automatizace (mechanické, poloautomatické, automatické) a dle pohonu (lidskou silou, elektromotorem, hydraulicky, pneumaticky). Svářecí stroje pro bodové odporové svařování se pak dělí hlavně dle konstrukce a dle mechanismu vyvíjejícího přítlačnou sílu elektrod na svařované dílce. Tento mechanismus se dělí na nožní, pneumatický, motorický a hydraulický. *[5], [8]*

5.1.1 Stabilní bodové svařovací stroje

Jako stabilní (stacionární) se označují svařovací stroje tehdy, pokud je stroj pevně připevněný k podlaze či stolu a není s ním při procesu svařování možné manipulovat.

V příloze na obrázku Příloha 9 je znázorněna nejjednodušší bodová svářečka typu BN-16/30. Přítlačná síla je vynaložena právě nožní pákou svářečky, zapojenou přes převodový mechanismus k hornímu ramenu svářečky, a to je přitlačováno vůči spodnímu ramenu. *[8]*

1 – elektrody
2 – ramena
3 – ohebný pás
4 – sekundární závit
5 – primární závit
6 – koncový spínač
7 – nožní páka
8 – převodový mechanismus
9 – odpadní miska chlazení

Další běžně se v praxi vyskytující stabilní svařovacím strojem je svářečka s pneumatickým přítlačným mechanismem (Příloha 10). Horní rameno svářečky je upevněno na pneumatickém válci, který zajišťuje svařovací tlak a pracovní, či pomocný zdvih ramena. *[8]*

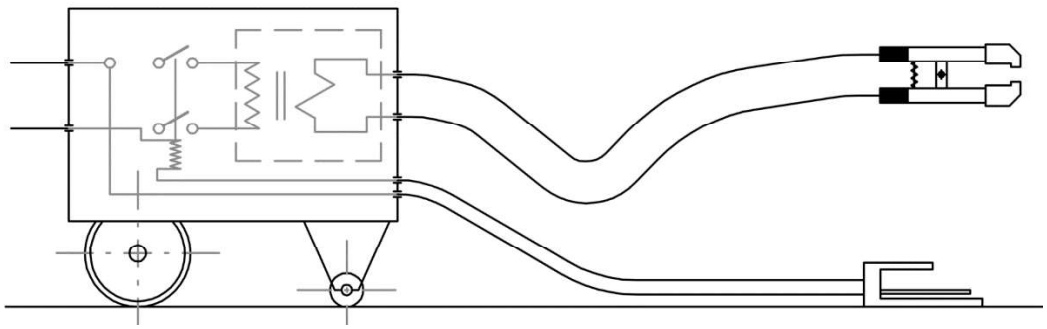
1 – vzduchový válec
2 – horní rameno
3 – dolní rameno
4 – elektrody
5 – sekundární přívod
6 – elektro-pneumatický ventil
7 – kohout pro pomocný zdvih
8 – časové relé
9 – vodní chlazení
10 – zvedací zařízení

5.1.2 Mobilní bodové svařovací stroje

Závěsná svářečka přijde vhod zejména při svařování objemných součástí jako je například karoserie automobilu. Takto velké svařované dílce by svařovat na stabilních svářečkách nešlo kvůli jejich rozměrům a jejich složité manipulaci. Celý stroj je zavěšený na pojízdné konzole a obsluha má v ruce pouze svařovací kleště s elektrodami. Princip závěsné svářečky je znázorněn na schématu Příloha 11. Závěsné svářecí stroje mají mnoho různých provedení, ale tento princip bývá zpravidla zachován. V praxi se využívá různé variace výkonů svařovacího transformátoru, mechanismu svářečky, včetně různých tvarů svařovacích kleští a dalších. Ty se v sériové a hromadné výrobě přizpůsobují speciálním potřebám výroby. *[8]*

1 – svařovací transformátor
2 – elektrická ovládací skříň
3 – zástrčkový přepínač
4 – svařovací kleště
5 – sekundární kabely
6 – elektromagnetický ventil
7 – tlakový spínač
8 – impulsní tlačítko
9 – páčkový přepínač

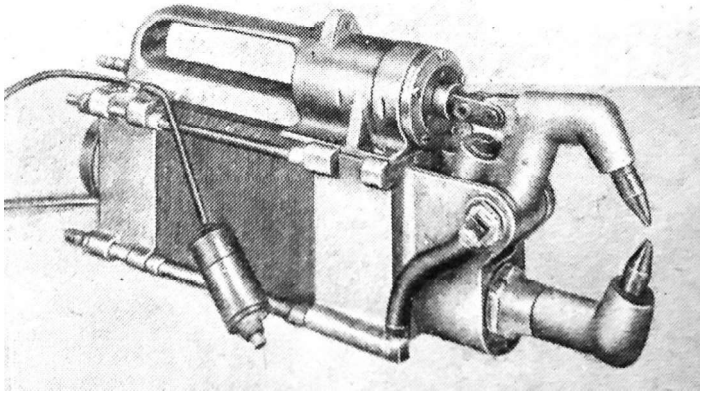
Dalším mobilním svařovacím strojem je pojízdná svářečka, kde je celý stroj umístěný na pohyblivém podvozku s kolečky (Obrázek 21).



Obrázek 21 - Schéma pojízdného bodového svařovacího stroje

Zdroj: [5], vlastní zpracování

Přenosné odporové svářečky (Obrázek 22) jsou velmi běžné u kusové výroby, popř. jsou využívány pro pomocné svařování výrobků při jejich sestavování do velkých celků.



Obrázek 22 - Přenosný bodový svařovací stroj

Zdroj: [8]

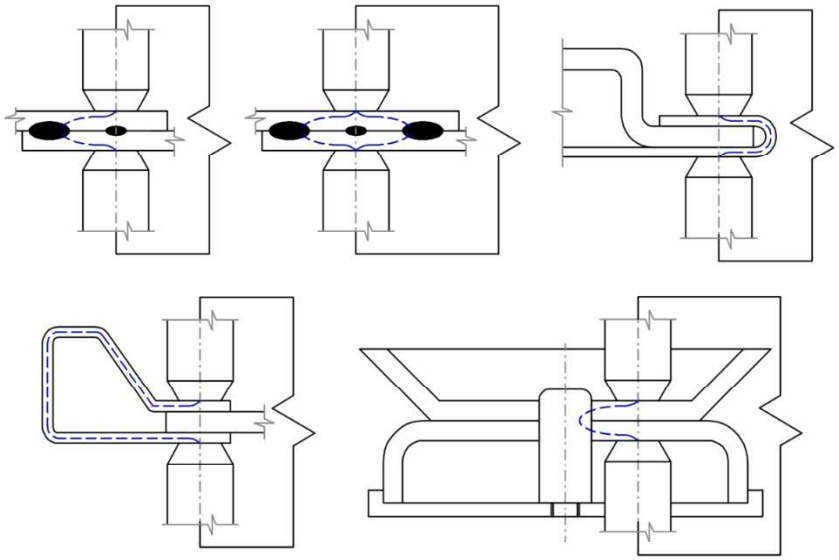
Přítlačný mechanismus kleští závěsných, pojízdných i přenosných svářeček pak mohou disponovat pouze ručním vyvozováním tlaku (když to potřeby výroby nevyžadují), běžně se ale využívá pneumatického či hydraulického pohonu tlaku, aby tak bylo dosaženo cílené přítlačné síly. *[8]*

5.2 Chyby při bodovém svařování

Kvalita a zejména pevnost bodových svarů je v některých průmyslových odvětvích velice významným faktorem. Nepravidelnost kvality svarů pak může ovlivnit funkčnost i bezpečnost samotného výrobku. Jakost svaru je v praxi kontrolována a hodnocena právě dle nároků na spolehlivost svaru, a to od fyzického měření průměru svarové čočky, přes ultrazvukové měření, až po destruktivní mechanické zkoušky pevnosti. *[15]*

- **Odbočování proudu**

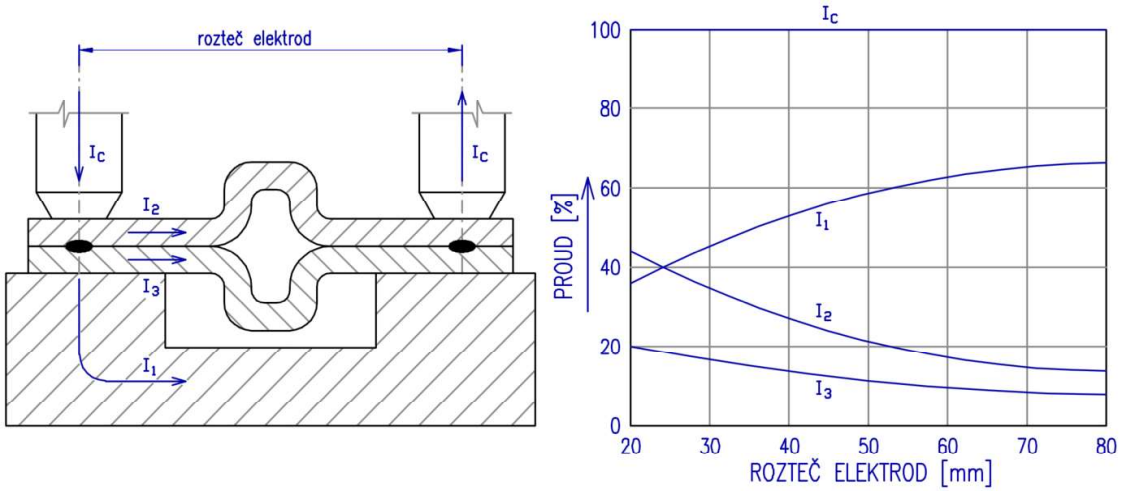
V některých případech může nastat situace, která se nazývá odbočování (šuntování) elektrického proudu. Tato situace nastává, když má proud procházející svařovací soustavou možnost projít jinou cestou než předpokládaným svarovým spojem. Proud tedy zpravidla odbočuje trasou nejnižšího elektrického odporu (předchozí zhotovený svar, svařované dílce apod.), tím není mezi svařovacími elektrodami vytvořeno dostatečné teplo, a svar není kvalitní. Obrázek 23 znázorňuje nejběžnější příklady z praxe, které mohou vyústit ve svařenec s nekvalitním svarem, právě kvůli odbočování proudu. *[5], [8], [14]*



Obrázek 23 - Příklady odbočování proudu přímého bodového svařování

Zdroj: [5], vlastní zpracování

Dalším typickým případem odbočování proudu nastává při nepřímém bodovém svařování, kdy proud odbočuje skrz horní svařovaný dílec (Obrázek 24). Tato situace nastane, pokud je rozteč mezi elektrodami příliš malá. K zamezení těmto ztrátám je třeba volit dostatečné rozteče elektrod a materiál opěrné desky s co nejlepší elektrickou vodivostí. Zpravidla se volí materiál měď. *[5]*

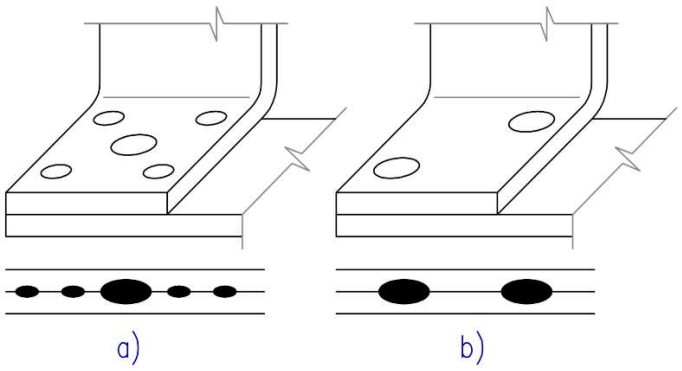


Obrázek 24 - Příklad odbočování proudu u nepřímého bodového svařování

Zdroj: [5], vlastní zpracování

Na Obrázku 25 je předveden a závislost mezi odbočováním proudu a následnou únosností svarového spoje. Na Obrázku 25a) je nejprve vyhotoven bodový svar uprostřed svařovaných dílců. Následně jsou zhotoveny další čtyři svary okolo, s úmyslem svaření dílců na více místech

a docílit tím vyšší únosnosti spoje. Tyto čtyři svary jsou však ovlivněny odbočováním proudu skrz prostření svar, který je v těsné blízkosti všech ostatních, a jsou tedy nekvalitní. Volba roztečí bodových svarů na Obrázku 25b) je volena správně – tedy trojnásobný až čtyřnásobný průměr bodového svaru u svařování běžné oceli, pětinásobný až šestinásobný průměr u svařování lehkých kovů a jejich slitin. Svar není ovlivněn odbočováním proudu, kvalita svarů je vyhovující a ve výsledku mají tyto dílce s dvěma bodovými svary stejnou únosnost jako dílce s pěti svary. *[5], [14]*

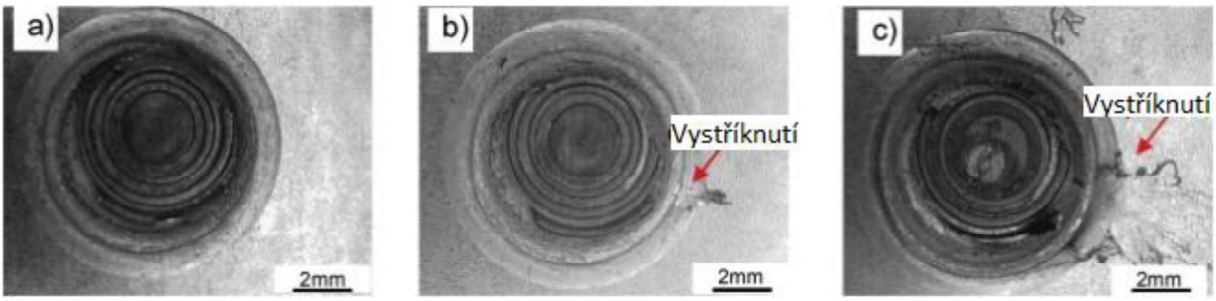


Obrázek 25 - Únosnost bodových svarů

Zdroj: [5], vlastní zpracování

- **Vystříknutí**

K vystříknutí žhavého roztaveného materiálu ze svarové čočky může dojít, pokud jsou dva svařované plechy špatně slícované, nebo pokud je přítlačná síla nastavena příliš malá. Rozžhavený materiál má například větší tendenci vystříknout, pokud se svařují dva různé kovy. V takovém případě vystříkne zpravidla ten, který má vyšší tepelnou vodivost. Obrázek 28 názorně ukazuje strukturu kvalitního svaru *a),* svarové čočky s malým vystříknutím *b),* a svarové čočky se značným výstřikem *c)*. Vystříknutí roztaveného materiálu pryč z místa svaru značně zeslabuje pevnost a tím i celkovou kvalitu svaru. *[12]*



Obrázek 26 - Vystříknutí roztaveného materiálu ze svarové čočky

Zdroj: [12]

- **Další chyby svařování**

Tabulka *Příloha 12* stručně a jednoduše znázorňuje další běžné chyby, které mohou nastat u bodového svařování. Zpravidla se jedná o chyby obsluhy – špatné očištění či slícování svařovaných dílců, špatné nastavení svařovacích parametrů, nerovnost svařovaných plechů, nesprávná pozice či kvalita svařovacích elektrod apod. Chyby mohou také nastat z důvodu jako například nadměrné opotřebení elektrod, vůle svařovacího stroje, či kolísání elektrické energie v síti. *[5], [12]*

5.3 Svářecí stroje švového svařování

Následující podkapitoly referují o strojích, běžně se vyskytujících v dílenské praxi švového odporového svařování. Stejně jako u strojů bodového svařování, se jedná především o starší modely, se kterými je možné se setkat, avšak novější, moderní stroje stále nosí stejné rozdělení. Jak je již už velmi zažitým standardem, starší stroje bývají svou konstrukcí velmi kvalitní, proto jsou v praxi stále hojně používané.

5.3.1 Stabilní švové svařovací stroje

Svařovací stroje pro švové svařování se dělí dle způsobů svařování, a to, jestli je svařování průběžné nebo přerušované a zda se na stroji svařuje příčně nebo podélně. Svařovací stroj pro svařování přerušované vyžaduje regulaci svařovacího proudu. Využívá se mechanických modulátorů proudu, v praxi se však uživatel setká spíše s elektronickými vypínači. Svařování se dále dělí na příčné a podélné, podle směru otáčení elektrod a posuvu svařovaného materiálu při procesu svařování – pokud se kotoučové elektrody stroje otáčejí kolmo k rovině ramen svařovacího stroje, jedná se o svařování s *příčným* pohybem, naopak pokud jsou elektrody na ramenech svářečky umístěny rovnoběžně s těmito rameny stroje, jedná se o svařování s *podélným* pohybem svařovaných dílů. Konstrukce ramen švových svařovacích strojů bývá uzpůsobena tak, aby bylo možné kotoučové elektrody otáčet a tím je tak adaptovat potřebám výroby, proto jsou elektrody umístěny na tzv. hlavě svářečky na konci ramen, která je otočná. Takto řešené svářečky se nazývají univerzální. Tyto svařovací hlavy umožňují přívod svařovacího proudu do elektrod. Skládají se z hřídelů elektrod, uložených ve valivých ložiskách. Ložiska jsou izolována tak, aby jimi neprocházel svařovací proud. Příklad univerzálního švového svařovacího stroje je k nalezení v příloze pod označením Příloha 13. *[5], [8]*

5.3.2 Speciální švové svařovací stroje

Nejběžněji využívané švové svařovací stroje v praxi jsou stabilní (stacionární), avšak často se vyskytují i jiné konstrukce těchto svářeček, jako jsou závěsné, portálové svářecí stroje apod. Závěsné švové svářečky (Příloha 14) jsou, stejně jako závěsné bodové, určené zejména pro svařování objemných součástí, u kterých je manipulace u stroje značně komplikovaná. Portálové švové svářečky (Příloha 15) slouží především pro spojení velkých tabulí plechů. *[5]*

5.4 Chyby při švovém svařování

- **Průběžné (nepřerušované) svařování**

U každého druhu svařování je očištění materiálu před svařováním velmi důležité, avšak u vytváření průběžného svaru je ještě podstatnější. Plechy zrezivělé, nebo znečištěné okujemi vytváří přetížení kontaktních ploch elektrod a často se pak stává, že jsou do měděných elektrod i svařovaného materiálu vypáleny malé krátery, které svar i elektrody znehodnocují. Napětí v síti by při průběžném svařování neměl výrazně kolísat (více než o 5 %), aby nedocházelo k nežádoucím změnám proudu. *[8]*

- **Vznik nežádoucích výparů**

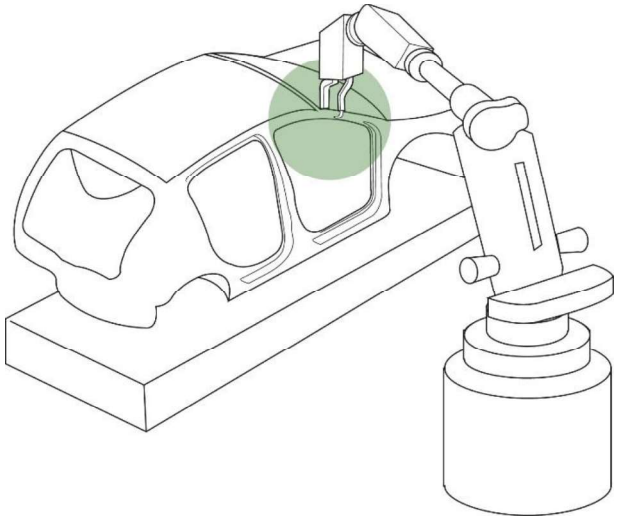
Při svařování plechů s povrchovou úpravou obsahující zinek, olovo nebo cín, či s použitím svařovací pasty, vznikají nebezpečné výpary. V takové situaci je nezbytně nutné, aby bylo na švové svářečce připevněno odsávací zařízení. *[5]*

- **Další chyby svařování**

U švového svařování se pak vyskytují svým principem stejné chyby jako u svařování bodového (kapitola 5.2 Chyby při bodovém svařování – další chyby svařování), tzn. špatné slícování svařovaných plechů, očištění plechů před svařováním, špatná pozice či kvalita a tvar elektrod, nastavené parametry apod.

5.5 Robotické svařování

V moderním průmyslu je výroba stále více a více automatizovaná (automatizace = zavedení robota do výrobní operace, vyřazení lidské pracovní síly), což přispívá zejména k ziskovosti, tedy rychlosti a produktivitě, nezbytné ve velkoobjemovém výrobním procesu. Právě ziskovost hraje v zavedení robotické pracovní síly nejvýznamnější roli. Automatizace svařování v automobilovém průmyslu s linkovou výrobou započala již kolem roku 1970 a od té doby se neustále vyvíjí, zejména pak v oblasti bodového svařování. Použití robota u svařování karosérie automobilu je názorně předvedeno na Obrázku 27. *[9], [17]*



Obrázek 27 - Využití robotizovaného svařování v automobilovém průmyslu

Zdroj: [18]

Svařovací roboty se rozdělují především podle stupně volnosti pohybu (flexibility), kterou musí zaujmout při samotném svařování. Tato flexibilita se určuje podle použitého souřadnicového systému konstrukce robota – kartézské souřadnice (X-Y-Z), cylindrické, sférické a kloubové sférické souřadnice. Všechny tyto konstrukce strojů jsou ukázány na obrázku Příloha 16. Svařovací roboti jsou vybaveni trasovacími zařízeními, které určují přesná místa svaru na výrobku. V praxi existuje veliké množství těchto systémů a moderní vývoj technologií přináší stále nové možnosti v oblasti robotizace výroby. *[17], [18]*

6 Ekonomické zhodnocení

Tato kapitola analyzuje bodové odporové svařování z hlediska ekonomického. Náklady bodového svařování jsou porovnány se svařováním laserovým, které je také velmi hojně využíváno v hromadné výrobě a s obloukovým svařováním v ochranné atmosféře plynu CO_2, jež je naopak častěji využívána v kusové výrobě.

Následující tabulka udává ceny jednotlivých typů svařování. Tyto ceny jsou orientační, záleží na cenách jednotlivých proměnných, jako jsou ceny elektrod (a jejich životnost), energií, či práce a dalších komponentů potřebných ke svařování. Tyto ceny jsou různé u každého obchodníka různé a s časem se cena na trhu mění.

	Bodové svařování			Laserové svařování				Obloukové svařování v ochranné atmosféře	
		režim svařování			rychlost svařování [m·min^{-1}]				
		tvrdý	měkký		15	4	2		
ceny svařo-vání [Kč]	cena za 1 svar	1,1	2,9	cena za 1m svaru	1,1	4	7,9	cena za 1m svaru	3,7
	cena za 10 svarů	11,2	28,8						
	cena za 10^2 svarů	112,4	287,9						
	cena za 10^3 svarů	1124	2879,1						

Tabulka 3 - Ekonomické porovnání svařování

Zdroj: [19], [20], [21], vlastní zpracování

Laserové svařování je nevýhodné z hlediska svých vysokých pořizovacích nákladů a následně nákladů spojených s obsluhou stroje. Technolog se společně s ekonomem musí shodnout na výhodnosti pořízení této technologie do výrobního procesu, kde hlavním hlediskem je objem výroby. Laserovým svařováním je vytvořen velmi kvalitní svarový spoj, svou strukturou podobný obloukovému svařování v ochranné atmosféře, které je do ekonomického porovnání zahrnuto pro orientační účely. Odporové svařování je navzdory ceně svaru velmi rychlé a ve výrobě vede k vysoké produktivitě. Vysoká produktivita výroby je velmi zásadní, proto je odporové svařování stále hojně využíváno v průmyslu celého světa.

Celá tabulka ekonomického porovnání bodového laserového a obloukového svařování, včetně vstupních hodnot jsou uvedeny v příloze, pod označením Příloha 17. Ekonomické zhodnocení odporového svařování bylo vlastním zpracováním převzato ze zdroje [19], ekonomické zhodnocení laserového svařování je dle [20] a obloukové svařování bylo vyhotoveno v aplikaci Weld cost calc XL, získaného ze zdroje [21].

7 Závěr

V bakalářské práci byla pomocí literární rešerše popsána podstata odporového svařování, postupy tvorby bodového a švového svaru, včetně stručných doporučení a postupů pro volbu svařovacích parametrů, nutných k vytvoření kvalitní svarové čočky, či švového svaru.

V samostatné kapitole pro bodové i pro švové svařování byly vyzdviženy úskalí, kterým by se měl svářeč vyvarovat, pravidla a doporučení, která dodržovat, aby zachoval vyhovující konstantní jakost svaru a co nejvíce prodloužil životnost svařovacích elektrod správnými postupy při procesu svařování.

K závěru práce byly popsány nejběžnější, a v praxi se často vyskytující, stroje pro bodové a švové odporové svařování, jejich typy a technické provedení včetně aktuálního stavu s popisem odporového svařovacího robota linkové automatizované automobilové výroby.

Obsah literární rešerše o odporovém svařování doplňuje ekonomické zhodnocení práce, kde byly porovnány náklady na bodové odporové svary s laserovým svařováním, které je touto dobou na vzestupu a je v praxi využíváno stále více a se svařováním obloukovým v ochranné atmosféře CO_2, což je jedno z nejběžněji volených typů svařování. Záleží na počtů svarových bodů volených na 1 metr délky svařovaných dílců, přesto však z analýzy vyplývá, že cena bodových svarů je vyšší než cena jednoho metru svaru laserového či obloukového svaru. Cena bodového svaru je však kompenzována vysokou produktivitou práce, která není ve výpočtech cen zahrnuta. Produktivita, tedy rychlost tvorby svarů, je jedním ze zásadních faktorů, díky kterým je odporové svařování tolik využíváno v praxi.

Práce na téma *Odporové svařování v praxi* by mohla být také rozšířena i o další typy odporového svařování – výstupkové, stykové odtavením a stykové stlačením. Bakalářská práce by však nesplňovala daný maximální rozsah stran. Diplomová práce na toto téma by mohla být o tyto typy rozšířena, včetně například dílenských analýz pevnosti svarových spojů různých materiálů, zkoušky životnosti elektrod, rozšířené ekonomické analýzy apod.

Všechny informace v této práci vycházely z literárních knižních pramenů či odborných článků a všechny zdroje byly řádně citovány v kapitole 8 Seznam použité literatury, použité symboly, seznam obrázků, tabulek a příloh, jsou uvedeny v následujících kapitolách.

8 Seznam použité literatury

[1] KUNCIPÁL, Josef. Teorie svařování: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní fakulty vysokých škol technických. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.Technologie svařování – R. Kovařík, F. Černý

[2] KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. Nové technologie ve svařování. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.

[3] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. Technologie svařování. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 978-80-7082-697-3.

[4] WEMAN, Klas. Welding processes handbook. 2nd ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-0-85709-510-7.

[5] PLÍVA, Ladislav. Odporové svařování. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975. Řada strojírenské literatury.

[6] LIPA, Milan. Bodové a švové zvárane. Bratislava: Slovenské vydavatelstvo technickej literatury, 1966.

[7] Robotic welding: international trends in manufacturing technology. Bedford: IFS Publications, 1987.

[8] PLÍVA, Ladislav. Odporové svařování v praxi. 2. dolpl. vyd. Praha: SNTL, 1963. Knižnice strojírenské výroby.

[9] LANE, Jack D. Robotic welding. New York: Springer-Verlag, c1987. ISBN 0387166769.RAJARAJAN, C., P. SIVARAJ, M. SEEMAN a V. BALASUBRAMANIAN.

[10] Influence of electrode force on metallurgical studies and mechanical properties of resistance spot welded dual phase (DP800) steel joints. *Materials Today: Proceedings* [online]. Elsevier, 2020, 2020 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319332523

[11] ZHOU, Kang a Ping YAO. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. *Mechanical Systems and Signal*

Processing [online]. Elsevier, 01.06.2019 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327019300573#b0045

[12] CHEN, Can, Liang KONG a Min WANG. The robustness of Al-steel resistance spot welding process. Journal of Manufacturing Processes [online]. Elsevier, 07.2019 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612518316165

[13] SUN, Daqian, Yueying ZHANG a Yanjun LIU. Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded joints of 16Mn steel and 6063-T6 aluminum alloy with different electrodes. Materials & Design [online]. Elsevier, 2016, 05.11.2016 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516309728

[14] YU, Jiyoung, Mohd FARIDH a Young Whan PARK. Adaptive resistance spot welding method that reduces the shunting effect. Journal of Manufacturing Processes [online]. Elsevier, 2018, 10.2018 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612518303086

[15] SUMMERVILLE, Cameron, Paul COMONPST a Matthew DOOLAN. A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques. Procedia Manufacturing [online]. Elsevier, 2019, 2019 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919301751

[16] ORDOÑEZ, J.H., R.R. AMBRIZ a C. GARCÍA. Overloading effect on the fatigue strength in resistance spot welding joints of a DP980 steel. International Journal of Fatigue [online]. Elsevier, 2019, 04.2019 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112318307436#f0015

[17] ROUT, Amruta, B.B.V.L. DEEPAK a B.B. BISWAL. Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing [online]. Elsevier, 2019, 04.2019 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584517302132

[18] LOPES, Thiago Cantos, C.G.S. SIKORA a Rafael Gobbi MOLINA. Balancing a robotic spot welding manufacturing line: An industrial case study. European Journal of Operational Research [online]. Elsevier, 2017, 16.12.2017 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221717305180

[19] BC. STEINER, Jaromír. Pevnost bodového spoje v měkkém a tvrdém režimu svařování [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-04-8]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102156&fbclid=IwAR23sm6qzIKjPq3oWUr8u8KOMk44x4vjFNcmbLHSMkwvMhloxDcat-Jv2_o. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.

[20] BC. KAČÍREK, David. Optimalizace procesních parametrů pro laserové svařování tenkostěnných polotovarů z nerezavějící oceli [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-04-8]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127833&fbclid=IwAR1NPXK_urFs1jcZEwvOoJj0Im92Udb1wVmIhoGfUsDtQz-VH-PA7FjdtzQ. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

[21] MRUCZEK, Mark F. Weld cost calc XL. Magazín praktického svařování [online]. 7.8.2006, 2006, 1-5 [cit. 2020-04-8]. Dostupné z: https://www.svarbazar.cz/phprs/rservice.php?akce=tisk&cisloclanku=2006051602

9 Seznam použitých symbolů

symbol	popis	Jednotka SI
B	Šířka kotoučové svařovací elektrody švového svařování	mm
d, D	Průměr	mm
Q	Teplo	J
R, r	Rádius; Ohmický odpor	°, rad; Ω
ρ	Hustota materiálu	kg/m^3
e, e'	Rozteč svarových bodů švového svařování	mm
f	Frekvence střídavého proudu	Hz
F, F_S	Svařovací síla	N
I, I_S	Svařovací proud	A
i	Počet bodů na jednotku délky	-
t	Čas; tloušťka plechu	s; mm
t_c	Čas jednoho pracovního cyklu	s
t_s	Čas svařovacího impulsu	s
t_p	Čas přerušení (přestávky)	s
v_s	Rychlost švového svařování	m/s

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Dělení svařování 2
Obrázek 2 - Princip odporového svařování 3
Obrázek 3 - Bodový svarový spoj 5
Obrázek 4 - Grafický průběh svařování 6
Obrázek 5 - Běžné způsoby bodového svařování 6
Obrázek 6 - Speciální způsoby bodového svařování 7
Obrázek 7 - Graf množství tepla v soustavě bodového svařování 7
Obrázek 8 - Složky odporu při svařování 8
Obrázek 9 - Závislost odporu na svařovacím čase 8
Obrázek 10 - Tepelná rovnováha bodového svařování 9
Obrázek 11 - Únosnost bodových svarů 11
Obrázek 12 – Normální (vlevo) a programový (vpravo) průběh bodového svařování 13
Obrázek 13 - Vliv vyvinutého tlaku elektrod na pevnost svaru 13
Obrázek 14 - Princip švového svařování 16
Obrázek 15 - Typy svarů švového svařování 17
Obrázek 16 - Tepelná rovnováha švového svařování – pracovní plochy elektrod 18
Obrázek 17 - Vyrovnání tepelné rovnováhy s různými parametry elektrod a materiálů 18
Obrázek 18 - Odbočování proudu 20
Obrázek 19 - Modulace svařovacího proudu 21
Obrázek 20 – Běžné tvary kotoučových elektrod pro švové svařování 22
Obrázek 21 - Schéma pojízdného bodového svařovacího stroje 26
Obrázek 22 - Přenosný bodový svařovací stroj 27
Obrázek 23 - Příklady odbočování proudu přímého bodového svařování 28
Obrázek 24 - Příklad odbočování proudu u nepřímého bodového svařování 28
Obrázek 25 - Únosnost bodových svarů 29
Obrázek 26 - Vystříknutí roztaveného materiálu ze svarové čočky 29
Obrázek 27 - Využití robotizovaného svařování v automobilovém průmyslu 32

11 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Měkký a tvrdý svařovací režim 10
Tabulka 2 - Hodnoty měrného svařovacího tlaku bodového svařování 12
Tabulka 3 - Ekonomické porovnání svařování 33

12 Seznam příloh

Příloha 1 - Svařitelnost materiálů 1
Příloha 2 - Tabulka doporučených hodnot pro přímé bodové odporové svařování 2
Příloha 3 - Vliv modulace proudu a svařovací rychlosti na tvar švového svaru 3
Příloha 4 - Příklady přímého švového svařování 4
Příloha 5 - Příklady nepřímého švového svařování 5
Příloha 6 - Graf závislosti mezi svařovací rychlostí, roztečí svarových bodů a modulace 6
Příloha 7 - Graf závislosti mezi svařovací rychlostí, otáčkách elektrod a různými průměry elektrod 7
Příloha 8 - Parametry švového svařování 8
Příloha 9 - Nožní bodový svařovací stroj BN-16/30 9
Příloha 10 - Pneumatický bodový svařovací stroj BP-30/60 10
Příloha 11 - Schéma závěsného bodového svařovacího stroje 11
Příloha 12 - Nejčastější chyby bodového svařování 12
Příloha 13 - Stabilní univerzální švový svařovací stroj 13
Příloha 14 - Závěsný švový svařovací stroj 14
Příloha 15 - Portálový švový svařovací stroj 14
Příloha 16 - Pohyb robotického ramene 15
Příloha 17 - Ekonomické porovnání různých typů svařování 16