

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Havlín
Martin

2021



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havlín** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **476490**
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
 Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
 Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
 Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Přehled aktuálního stavu kondenzátorového odporového svařování se zaměřením na automobilový průmysl

Název bakalářské práce anglicky:

Overview of capacitive discharge welding with a focus on the automotive industry

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je podrobná rešerše v oblasti kondenzátorového odporového svařování. Popis svařovacího procesu při výstupkovém přivařování matic. Přehled výrobců, jejich nabídky, technických řešení a způsobů řízení svařovacího procesu.
 - Popis technologie kondenzátorového svařování elektrickým odporem, výhody, nevýhody
 - Přehled výrobců kondenzátorových odporových svařovacích zdrojů,
 - Přehled kondenzátorových odporových zdrojů a způsobů řízení procesů
 - Využití kondenzátorového odporového svařování pro heterogenní spoje se zaměřením na automobilový průmysl
 - Vady vznikající při kondenzátorovém odporovém svařování, typy, příčiny
 - Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

[1] Dobbelin, R. / Winkler, T. / Lindemann, A. / Teichert, C.,: Design of Pulsed Power Transformers for Capacitor Discharge Resistance Welding Machines (English), ISBN: 3928643436
 [2] Rusch, H.J./ Stocks N.: CD Multi-Pulse Welding of Nuts on 22MNB5+AS150

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

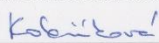
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **30.10.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.01.2021**

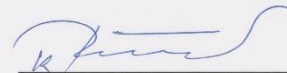
Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**



doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



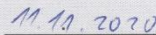
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



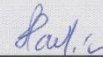
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.



Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce je přehled současného stavu v oblasti odporového svařování se zaměřením na kondenzátorové zdroje, a porovnání dvou odporových svařovacích metod (středofrekvenční svařování stejnosměrným proudem - MFDC a kondenzátorové svařování – CD) včetně uvedení jejich výhod a nevýhod. Dále je v práci uveden přehled světových výrobců kondenzátorových strojů, jsou popsány hlavní výrobní trendy strojů včetně nastavitelných parametrů. Druhou část bakalářské práce tvoří experiment, který si kladl za cíl porovnat základní charakteristiky svarů provedených výše zmíněnými metodami odporového svařování (kondenzátorové a stejnosměrné středofrekvenční). Svary byly porovnány z hlediska geometrie, charakteristických rozměrů, vad a mikrotvrdosti (zkouška dle Vickerse).

Klíčová slova:

Kondenzátorové svařování, automobilový průmysl, odporové svařování, výstupkové svařování

Abstract:

The aim of this bachelor thesis is to make an overview of the current state of resistance welding with a focus on capacitor sources, and a comparison of two resistance welding methods (Middle Frequency Direct Current - MFDC welding and Capacitive Discharge - CD welding), including their advantages and disadvantages. Furthermore, the work provides an overview of global manufacturers of capacitor machines, describes the main production trends of machines, including adjustable parameters. The second part of the bachelor's thesis consists of an experiment, which aimed to compare the basic characteristics of welds performed by the above-mentioned methods of resistance welding (capacitive discharge welding and middle frequency direct current welding). Welds were compared in terms of geometry, characteristic dimensions, defects and microhardness (Vickers test).

Keywords:

Capacitive discharge welding, automotive industry, resistance welding, projection welding

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Přehled aktuálního stavu kondenzátorového odporového svařování se zaměřením na automobilový průmysl vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne.....

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ:

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D. za věcné připomínky, obětavost, čas a cenné rady, které mi byly velkým přínosem během vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod.....	4
1 Teoretická část	5
1.1 Odporové svařování	5
1.1.1 Vznik tepla u odporového svařování	6
1.1.2 Základní metody odporového svařování	8
1.1.3 Výhody odporového svařování	9
1.1.4 Rozdělení odporového svařování	9
1.1.5 Svařovací parametry a režimy	10
1.1.6 Časový program odporového svařování	12
1.2 Výstupkové svařování.....	15
1.2.1 Tepelná bilance ve spoji výstupkového svařování	17
1.2.2 Tvary výstupků pro výstupkové svařování plechů.....	18
1.2.3 Výstupkové svařování matic	19
1.2.4 Svařování svorníků	21
1.3 Svařovací stroje	21
1.3.1 Svařovací zdroje pro odporové svařování.....	23
1.4 Typy elektrod pro odporové svařování	24
1.4.1 Životnost elektrod	27
1.5 Technologie kondenzátorového svařování.....	27
1.5.1 Vady svarů vznikající při kondenzátorovém svařování	29
1.6 Přehled výrobců a jejich systémů	30
1.6.1 Němečtí výrobci	30
1.6.2 Indičtí výrobci	34
1.6.3 Čínští výrobci.....	36
2 Experimentální část	37
2.1 Návrh experimentu	37
2.1.1 Vlastnosti svařované matice a její rozměry	37
2.1.2 Ocel 22MnB5+AS150	38
2.1.3 Svařovací stroj firmy Kapkon.....	39
2.1.4 Středofrekvenční svařovací lis firmy Dalex	40
2.1.5 Metalografie.....	40
2.1.6 Mikrotvrdość	41

2.2	Výsledky a jejich diskuze	41
3	Závěr	49
	Bibliografie.....	50
	Seznam obrázků	56
	Seznam tabulek	57

Seznam použitých zkratek a symbolů

HSS	Rychlořezná ocel	
Q	Množství vyvinutého tepla	[J]
I	Elektrický proud	[A]
I_{sv}	Svařovací proud	[A]
R	Celkový odpor	[Ω]
R_d	Odpor dotyku elektrod	[Ω]
R_m	Měrné odpory svařovaných materiálů	[Ω]
R_k	Odpor mezi svařovanými materiály	[Ω]
t	Čas	[s]
t_{sv}	Svařovací čas	[s]
t_s	Doba svařování	[s]
t_p	Doba přestávky	[s]
F_{sv}	Přítlačná síla elektrod	[N]
DZ	Zatěžovatel (doba zatížení)	[%]
HB	Tvrдость dle Brinella	
Rc	Časová konstanta obvodu	
ČSN EN	Harmonizovaná Evropská norma	
MFDC	Středofrekvenční svařovací stroj	
CD	Kondenzátorově svařující stroj	

1. Úvod

Dnešní trendy v automobilovém průmyslu vytvářejí velký tlak na vývoj nových ocelí. Důvodem jsou stále se zvyšující emisní normy, které nutí výrobce automobilů používat pro své výrobky oceli, které jsou pevnější, tažnější a přitom lehčí. Tyto pokročilé vysokopevnostní ocele jsou velice obtížně svařitelné, čímž se zvyšuje tlak na technologie a svařovací zařízení, jak tyto moderní materiály svářet. Cílem této Bakalářské práce je tedy podrobná rešerše v oblasti odporového svařování se zaměřením na kondenzátorové svařování. Tento způsob svařování není novou metodou. Ovšem nyní, díky pokrokům v elektrotechnické oblasti již lze kondenzátorové svařování za přijatelných cenových podmínek zařazovat do průmyslových aplikací. Díky těmto pokrokům lze nyní svařovat materiály dříve obtížně (či vůbec) svařitelné kombinace materiálů. Tato metoda má proto nyní extrémní nárůst možností využití.

V experimentální části je zpracován experiment, který porovnává svarové spoje nízkouhlíkové matice normy DIN 928 se za tepla tvářeným ocelovým plechem z materiálu 22MnB5 s povrchovou úpravou AS150. Spoje byly svařeny kondenzátorovým strojem firmy Kapkon KKC 07 – MCS a středofrekvenčním svařovacím lisem firmy Dalex PMS 11-4 . Svary byly následně podrobeny optické analýze. Na vyleštěných a naleptaných příčných řezech byly naměřeny charakteristické rozměry, jako jsou tepelně ovlivněné oblasti, délky svarů, délky výronků a následně na nich byla provedena zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse.

1 Teoretická část

Při odporovém svařování je spoj tvořen za působení kombinace tlaku a odporového (Joulova) tepla. Vznik tepla je způsoben průchodem elektrického proudu svařovanými materiály za působení tlaku. Do místa svaru je proud přiveden elektrodami, které jsou ve většině případů tvořeny mědí nebo její slitinou. Dále lze využít materiály na bázi žáruvzdorných kovů, jako je wolfram a molybden, vyrobené práškovou metalurgií. [1]

1.1 Odporové svařování

Odporové svařování se řídí normou ČSN EN ISO 4063: Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování. Podle této normy je tato metoda řazena do skupiny tlakového svařování z důvodu nutnosti použití plastické deformace pro vznik svaru. Podstata v elektrickém odporovém svařování spočívá v průchodu elektrického proudu svařovaným materiálem, čímž v něm vzrůstá odporové teplo až do výše, kdy dochází k tavení a vzniku svarové čočky na rozhraní mezi svařovanými plechy. Pro popis pracovních postupů a konstrukčních uspořádání elektrod se používá norma ČSN EN ISO 4063. [1]

1.1.1 Vznik tepla u odporového svařování

Teplo, které se vytváří v místě svařování je definováno vztahem:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \text{ [J]}, \quad \text{Rovnice 1 [1]}$$

Kde R ...je celkový odpor mezi elektrodami [Ω]

I ...je proud protékající elektrodami [A]

t ... je čas svařování [s]

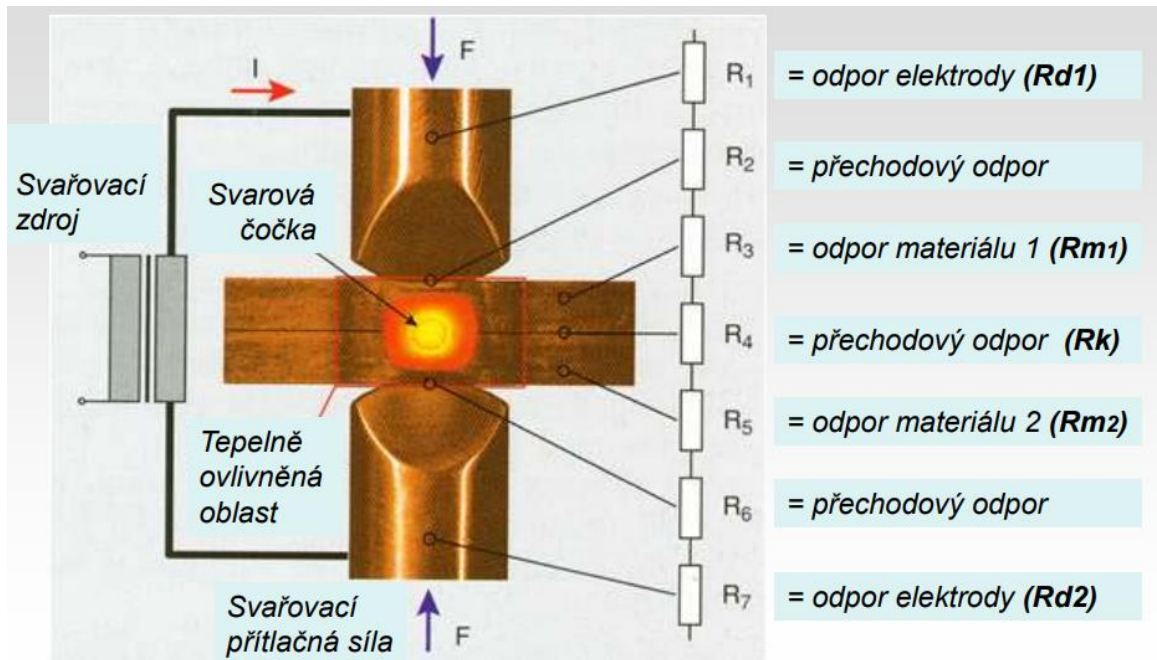
Při reálném využití této závislosti lze regulačními prvky zdroje ovlivnit další veličiny: velikost svařovacího proudu I_{SV} [A], dobu průchodu svařovacího proudu t_{SV} [s] a velikost přitlačné síly elektrod F_{SV} [N], která z části také ovlivní velikost odporu R [Ω], tudíž odpor R nezáleží pouze na druhu elektrod a svařovaném materiálu. [1][5][7][13]

Elektrických odporů vstupujících do procesu je několik typů, dle rovnice 2 součtem tvoří výsledný odpor R_{SV} :

- **Odpor dotyku elektrod (R_d)** – Liší se podle tvaru použité elektrody. Při dotyku mezi elektrodou a svařovaným materiálem vzniká odpor elektrody, který není žádoucí v tomto místě při odporovém svařování.
- **Měrné odpory svařovaných materiálů (R_m)** - Mohou se také lišit vzhledem k měrnému odporu použitého materiálu. Jak už vlivem tloušťky, či průřezu svařovaného materiálu, ale také měrným odporem, který je pro každý materiál jiný – závisí na typu materiálu.
- **Odpor mezi svařovanými materiály (R_k)** – Velikost odporu ovlivňují různá znečištění, která se nacházejí na povrchu svařovaného materiálu. Jsou to například vrstvy oxidů, kde je nutno brát v úvahu i jejich tloušťku, dále nerovnosti povrchů a již zmíněná velikost přitlačné síly F_{SV} . Dále tento přechodový odpor ovlivňují povlaky elektrod.

Výsledný odpor R_{SV} určuje rovnice:

$$R_{SV} = R_{m1} + R_{m2} + R_{d1} + R_{d2} + R_2 + R_3 + R_k \quad \text{Rovnice 2 [1]}$$



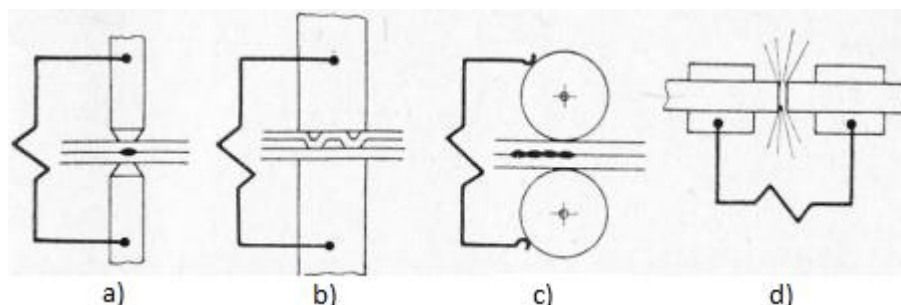
Obrázek 1.: Odporů při bodovém svařování [1]

Pro odporové svařování je dále důležitá i tepelná rovnováha, která určuje výsledné provaření obou spojených součástí. Tepelná rovnováha se musí dodržovat, když se svařují rozdílné materiály, nebo jiné tloušťky plechů. V případě rozdílných tloušťek plechů se volí větší průměr svařovací elektrody na stranu tlustšího plechu. Podobný problém vzniká u svařování materiálů s rozdílným ohmickým odporem, kde se u materiálu o větší hodnotě ohmického odporu použije elektroda o větším průměru a na materiál o nižší ohmické hodnotě odporu se volí elektroda s menším průměrem. Tudíž průměr elektrod je přímo úměrný ohmickému odporu materiálu a nepřímo úměrný elektrické vodivosti materiálu. Dále se musí zvažovat vzájemná vzdálenost svarů jak od sebe, tak od okrajů plechů. [25][38]

1.1.2 Základní metody odporového svařování

Odporově lze svařovat několika způsoby, které se liší možnostmi tvarů svařovaných částí, ale také tvarem, či uspořádáním elektrod: [1][9]

- bodové: způsob pro spojování překrývajících se plechů. Spojované plechy jsou sevřeny dvěma elektrodami a v místě stlačení projde elektrický proud. Teplem, které vzniká v místě dotyku těchto plechů, se vytváří svar v podobě svarových čoček;
- švové: elektrody jsou ve tvaru kotoučů které svařují střídavým proudem buď souvisle, ale i přerušovaně. Elektrody musí být nepřetržitě a intenzivně chlazeny vodou z důvodu velkého množství svarů (například za 1 vteřinu vznikne 100 velice malých svarů[9]). Výhodou je, že spoje mohou být jak přeplátované, tak tupé;
- výstupkové: bývá označované jako odporové svařování na lisu. Tato metoda je velice produktivní. Na přirozených, nebo záměrně vytvořených a vhodných výstupcích se materiál vlivem největší hustoty proudu nataví a následně vyvozenou přítláčnou silou dojde k deformaci nataveného materiálu, čímž vznikne svar;
- stykové: také svařování odtavovací a pēchovací. Podmínkou těchto svarů je kovová čistota a hladký povrch stykových ploch. V celé styčné ploše vzniká svarový spoj s využitím, nebo bez odtavovací fáze svařovacího procesu. Proces s odtavením se vyznačuje opakujícím se přibližováním a oddalováním stykových ploch, přičemž na povrchu těchto ploch dochází k opakujícím se zkratům. Následkem je velký nárůst teploty na těchto plochách a při dostatečném natavení se uskuteční stlačení a vzniká svar. Přičemž proces bez odtavení spočívá v principu procházejícího proudu. Jedná se o odporové teplo, které stykové plochy nahřívá a při teplotě ploch přibližně 1200°C se stykové plochy stlačí k sobě a vzniká svar.



Obrázek 2.: Druhy odporového svařování: a) odporové; b) výstupkové; c) švové; d) stykové [7]

1.1.3 Výhody odporového svařování

Svařování elektrickým odporem má celou řadu výhod:

- velmi krátký čas svařování a tím i nižší spotřeba energie. Svařovací čas se pohybuje v rozmezí od 0,04 až 2 sekundy (nejvíce záleží na typu režimu, dále na materiálu);
- u odporového svařování je důležitou výhodou, že se využívá fyzikálních vlastností materiálu. Tím, že se využívá odporové teplo a vzniklý svar je tvořen roztaveným základním materiálem, nemusíme používat žádný přídavný materiál, který musí splňovat chemické, pevnostní, nebo jiná kritéria, jako je tomu například u svařování obalenou elektrodou;
- lze svařovat i materiály s rozdílným chemickým složením (jedná se o heterogenní spoje);
- díky transformátorovým zdrojům, které se používají pro tuto metodu je možno vyvíjet dostatečně vysoké proudy k uskutečnění kvalitních svarů i jinak obtížně svařitelných materiálů;
- v průběhu svařování se na elektrody přenáší teplo, a proto jsou intenzivně chlazeny vodou. Důvodem je potřeba snížení teploty v bodě dotyku elektrody se svařovaným materiálem, které vzniká kombinací odporu dotyku elektrod (viz. kapitola 2.1.1) a vysokým hodnotám proudu. Chlazením se docílí výrazně menšího tepla mezi elektrodami a svařovaným materiálem, než je v bodě dotyku svařovaných plechů a méně intenzivní znečištění povrchu elektrod. [1][7][9][10]

1.1.4 Rozdělení odporového svařování

Dle uspořádání elektrod lze dělit odporové svařování na přímé a nepřímé:

- přímé: překrývající se díly svírají protilehlé elektrody v ose, které tlačí proti sobě;
- nepřímé: svařované díly jsou umístěny na vodivé podložce, přičemž elektrody dosedají obvykle pouze na jeden svařovaný díl, zatímco druhý díl se opírá o podložku. Vytvoří se smyčka, kterou prochází svařovací proud a vytvoří se svar;
- mimo těchto klasických uspořádání existuje i řada dalších, které umožňuje svařovat více bodových svarů naráz. [1][5][12][13]

1.1.5 Svařovací parametry a režimy

Jako u každého svařování se nabízí pestrá škála kombinací jednotlivých parametrů, které určují produktivitu a výsledné mechanické vlastnosti. V bodovém svařování se určují dle tří veličin. Jsou jimi:

- 1) svařovací proud I_{sv}
- 2) přítlačná síla elektrod F_{sv}
- 3) svařovací čas t_{sv}

Pokud se svařuje jinými metodami odporového svařování, mohou se vyskytnout jiné parametry. U švového například rychlost svařování, nebo přerušování (modulace) svařovacího proudu. Odporově lze svařovat dvěma režimy. Jsou to režimy tvrdé a měkké:

- měkký svařovací režim je charakterizován nízkým svařovacím proudem a proudovou hustotou do 200 A/mm^2 , dlouhým časovým intervalem ($0,5 \div 2$ sekund) a nízkou přítlačnou silou elektrod do 1000 N (tlak do 60 N/mm^2). Pro tento režim je typická větší ztráta energie vedením a kvůli delšímu svařovacímu času i sáláním tepla do okolí. Z toho vyplývá, že jsou i elektrody více zatížené, tudíž je potřeba častější úprava a tím i výměna. S tím, jak přítlačná síla působí delší čas, se deformuje svarový spoj, otisky elektrod jsou větší (jsou hlubší) a struktura zrna je hrubozrnná (menší pevnost výsledného spojení). Výhoda, proč se tato metoda používá je snížení rizika zakalení svařovaného materiálu, což je vhodné zejména u ocelí s vyšším obsahem uhlíku. Další výhodou je možnost využití strojů, které nemají velký příkon, což se projeví v pořizovacích nákladech svařovacího stroje. Další výhodou je, že není potřeba v místě používání svařovacího stroje instalovat velké průřezy elektrických vodičů. [24]

Nevýhodou měkkého svařovacího režimu je nižší produktivita kvůli delším strojovým časům. Dále vznikají velké deformace a napětí ve svarových spojích. Kvůli delší době, kdy je teplo vnášeno do svařovaného materiálu vzniká hrubozrnná struktura, která se projevuje sníženou pevností. Poslední nevýhodou je větší nutnost úprav svařovacích elektrod frézováním jejich povrchu, kvůli jejich znečišťování.

- tvrdý svařovací režim je charakterizován vysokým svařovacím proudem a proudovou hustotou od $200 \div 500 \text{ A/mm}^2$, krátkým časovým intervalem (okolo 0,16 sekund) a vysokou přitlačnou silou elektrod okolo 2000 N (tlak přes 80 N/mm^2). Vlivem větších přitlačných sil (tlaků) vyvíjených na elektrody jsou tyto sice více zatížené mechanicky, ale malé svařovací časy jsou zárukou nižší teplotní zátěže elektrod a tím se celkově zvyšuje jejich životnost. Díky tomu se režim vyznačuje vyšší účinností a větší produktivitou vzhledem ke kratším časům (velice ceněná vlastnost například v automobilovém průmyslu), kdy nedochází k tak velkým tepelným ztrátám – menší tepelně ovlivněná oblast z čehož vyplývá menší deformace než u měkkého režimu.

Nevýhodami tohoto režimu jsou vyšší náklady na pořízení stroje z důvodu potřeby vybavení schopným systémem (hydraulickým či pneumatickým) pro vyvinutí dostatečného tlaku a dostatečně silnou konstrukci. Dále je potřeba dostatečné energetické zázemí podniku [24]. Ve svarech vzniká vyšší napětí. Budoucí spoj musí být pečlivě předpřipraven. Tvrdým režimem se spojují legované oceli, neželezné kovy a slitiny neželezných kovů [12][13][18][25].

V porovnání s kondenzátorovým svařováním si lze povšimnout, že proudová hustota u odporového svařování se nachází na hodnotách pro měkký režim okolo 200 A/mm^2 a pro tvrdý $200 - 500 \text{ A/mm}^2$. U kondenzátorového svařování je tato hodnota sice menší (proudová hustota se pohybuje přibližně okolo hodnoty 100 A/mm^2 v závislosti na volbě elektrod či výstupků), ale proudy samotné jsou extrémně vysoké (dokonce až 750kA). Tyto proudy jsou do místa svaru přivedeny ve velice krátkém čase. Největšího průběhu proudu je již docíleno ve 3 ms, přičemž čas svařování je mezi 2 až 10 ms. Kondenzátory se poté nabíjí od 1,5 s a déle. Další odlišnost tvoří přitlačná síla elektrod, která je u kondenzátorového sváření podstatně větší – třeba i 200 kN [11][40].

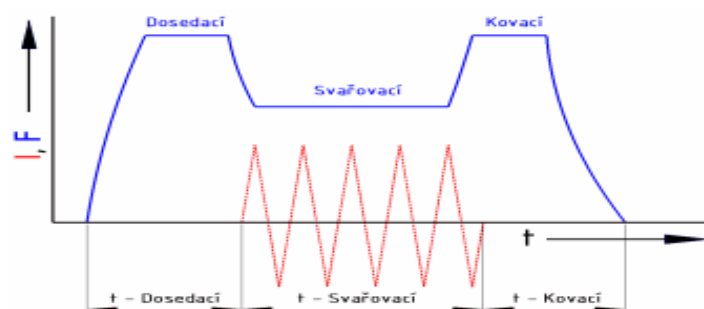
1.1.6 Časový program odporového svařování

Kvalitního svaru lze dosáhnout také správným časovým průběhem svařování, takzvaným svařovacím programem. Svařovací programy jsou na čase závislé sledy svařovacích parametrů, které podstatně ovlivňují výsledné vlastnosti svaru. Základní rozdělení je podle průběhu síly (přítlačné síly elektrod) anebo průběhu proudu, které působí v různých kombinacích. Nejprve se vyvodí přítlačná síla elektrod a až poté se s zpožděním se přivádí svařovací proud. Je nutné, aby se síla F_{sv} neuvolnila před dostatečným ochlazením svarové čochky. Je zde riziko vzniku dutin ve svaru. Tento svařovací program lze doplnit o další fáze (například předehřev, žhání a podobně). Časový program lze rozdělit na tři úseky:

- dosedací - síla F_{sv} zlepšuje dosedání dotykových ploch a tím zajišťuje rovnoměrný přechod elektrického proudu zpočátku svařování.
- svařovací - během tvorby svaru přítlačná síla udržuje tavící se materiál v uzavřené dutině a brání jeho vystříknutí.
- kovací - tlak působí i po přerušení přívodu proudu a tím se zlepšuje struktura svaru (zjemněním zrna a odstraněním necelistvostí), což se pozitivně odráží na mechanických vlastnostech. [1][4][5][12][13][18]

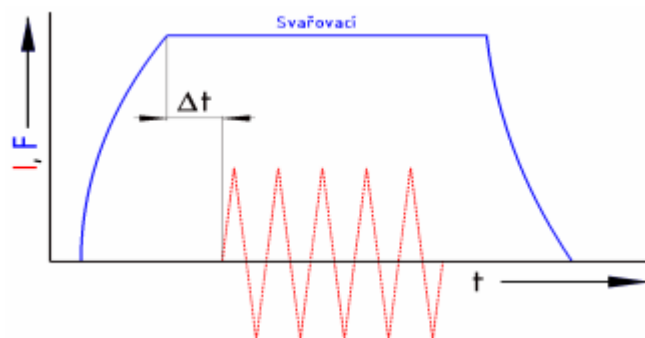
Příklady svařovacích programů:

- a) **Svařovací program s vícenásobnou změnou přítlačné síly elektrod.** Zde se zpočátku vyvodí dosedací síla, která vytváří lepší kontakt a vyrovnává možné deformace svařovaného materiálu. Snížení síly na svařovací sílu provádíme, protože je pro svařování příliš vysoká. Po ukončení svařování se síla opět zvýší na sílu kovací.



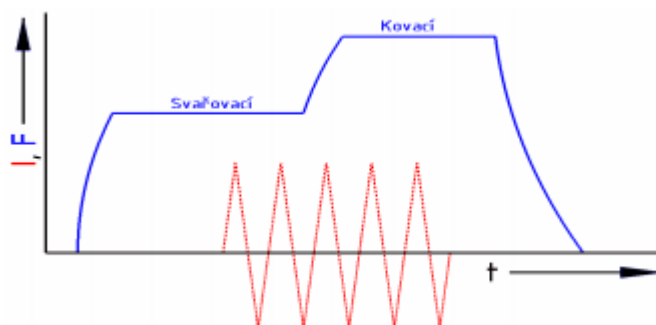
Obrázek 3.: Svařovací program s konstantní kovací silou [18]

- b) **Svařování konstantní přitlačnou silou elektrod.** V Obrázku (obr 2.1.6 b)) je znázorněno sepnutí svařovacího proudu po časové mezeře, kdy se zajišťuje kvalitní kontakt. Po zastavení toku svařovacího proudu se síla nemění a zůstává konstantní, kvůli dosažení lepší kvality spoje a omezení vzniku dutin ve spoji. Síla by měla být konstantní, dokud teplota spoje neklesne pod teplotu 400°C.



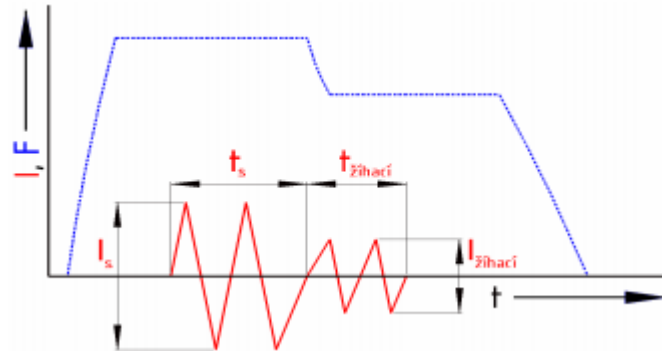
Obrázek 4.: Časový průběh svařování při konstantní přitlační síle elektrod [18]

- c) **Svařování s kovací silou.** Kovací síla navozená po svařování zjemňuje výslednou strukturu svařovaného materiálu. Také zlepšuje mechanické vlastnosti. Pro dosažení ještě lepších výsledků je vhodnější využít postupně se zvyšující sílu na hodnotu síly kovací hned po navození svařovacího proudu.



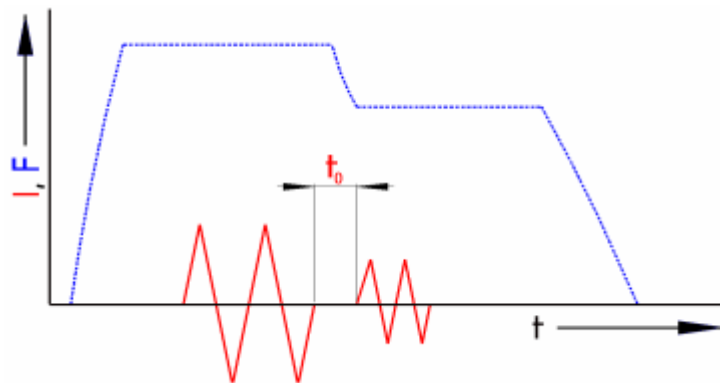
Obrázek 5.: Svařování s kovací silou [18]

- d) **Svařování s dvojnásobnou změnou svařovacího proudu.** Princip tkví ve snížení svařovacího proudu na žíhací proud, kdy se snižuje rychlost ochlazování svaru a tím se předchází možnému zakalení u ocelí.



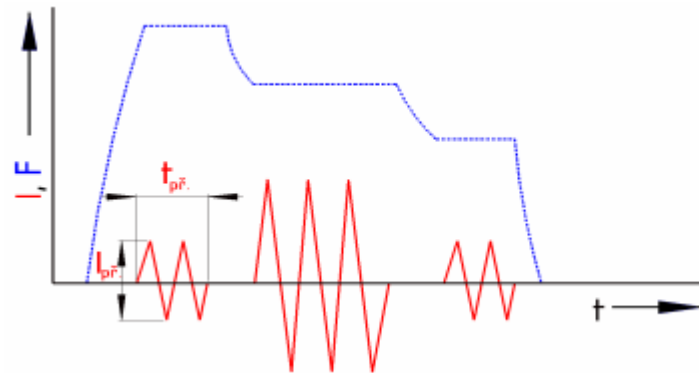
Obrázek 6.: Svařování s dvojnásobnou změnou svařovacího proudu [18]

- e) **Svařování s dvojnásobnou změnou svařovacího proudu a přerušením.** Po přerušení svařovacího proudu dojde ke ztuhnutí svaru a překročení teploty překrytí. Následně je vyvozen další proud, menší než svařovací, čímž se dá svar popouštět, nebo lze provádět normalizační žíhání svaru.



Obrázek 7.: Svařování s dvojnásobnou změnou svařovacího proudu s přerušením [18]

- f) **Svařování s předehřívacím proudem.** Proud je vnášen určitý časový úsek, čímž lze zlepšit kontakt svařovaných dílů, které jsou deformované, protože vytvořeným teplem plechy změknou. Dále předehřev zpomaluje chladnutí svařence po svařování. Tato metoda je výhodná z hlediska materiálů, které jsou náchylné k zakalení.

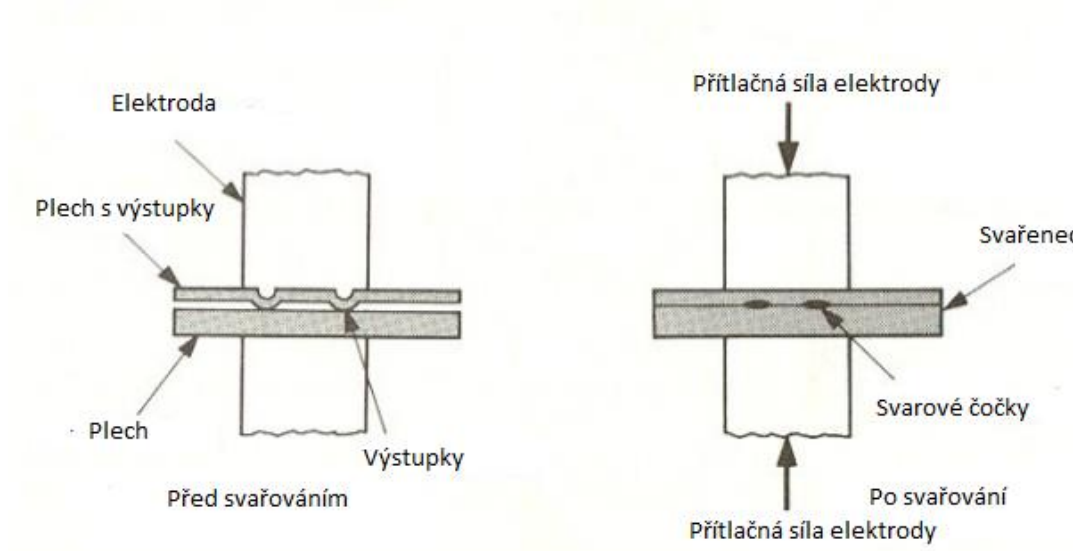


Obrázek 8.: Svařování s předehřívacím proudem [18]

1.2 Výstupkové svařování

V dnešních automobilech najdeme více než 300 výstupkových svarů a jiných spojovacích prvků, jako jsou matice, šrouby a jiné upínací prvky. Kvalita provedení uchycení těchto komponentů může ve velké míře ovlivnit spolehlivost a bezpečnost jak právě zmíněného automobilu, tak i jiných strojů nebo zařízení. I například takové prvky, jako je zadní nebo přední náprava u automobilu, bezpečnostní pásy, sloupky řízení. To vše je uchyceno na těchto prvcích. Proto je jejich precizní přivaření nezbytné pro bezpečnost [29].

Výstupkové svařování je odporový proces, kde je proud směřován do předem definovaných vytvořených nebo přirozených výstupků, které jsou určeny k roztavení. Obvykle se výstupky vytváří předem lisováním nebo ražbou na jednom, či na obou částech materiálu. Díky těmto malým výstupkům může být u symetrických součástí redukován vnesený proud, protože ve svařované oblasti je vysoká proudová hustota. Toto umožňuje využití tvrdších a houževnatějších materiálů elektrod. Tato metoda se hojně používá v kombinaci s kondenzátorovým svařováním. U výstupkového svařování je důležitější spíše než tvar, či velikost elektrod, svařovací proud (jeho hustota) [1][9][13][20][42].



Obrázek 9.: Princip výstupkového svařování [19]

Výhody výstupkového odporového svařování jsou:

- zvýšená produktivita díky vzniku několika svarů současně,
- elektrody mají delší životnost,
- svary mohou být těsněji vedle sebe,
- povrch i vzhled svaru je zlepšený oproti jiným odporovým spojům,
- mohou být svařované součástky, které jsou jiným způsobem svařitelné jen obtížně [17][18][30].

Mohou být dokonce svařovány i povrchově upravené a znečištěné povrchy. Přítlačná síla elektrod využívaná při výstupkovém svařování je schopna překonat tyto bariéry omezující, nebo bránící svařovacímu procesu a svařování lze uskutečnit. Teplem, které vzniká během svařovacího procesu, začnou sublimovat další znečištění, a tak je možné svar dokončit v dostatečné kvalitě. Ovšem výsledek není tak optimální, jako když je základní materiál očištěn [17][18][30].

Výstupkové svařování je omezené pouze konstruktérem dané součástky.

Jednou z nevýhod je, že musíme volit takovou sílu, aby se při navozování svařovací síly F_{sv} neprotlačili výstupky skrz druhý materiál (výstupek musí být prvotně nataven, a nesmí se zborstit pod tlakem svařovací síly elektrod ještě v tuhém stavu). Poté by totiž mohlo docházet jak ke zhoršení výsledných mechanických vlastností, tak i k vytvoření studených spojů, z důvodů nedosažení dostatečné proudové hustoty. Prvotním důkazem, že se svařování provedlo správně, je vytlačení výronku v oblasti výstupku ven [17][18][30].

Z výrobního hlediska je výhodná krátká doba svařování za cenu vyššího proudu. Je proto nutné dimenzovat svařovací parametry tak, aby nedocházelo k přehřívání a tím k sublimaci kovu vlivem vysokých teplot. Pokud by byla sublimace kovu příliš vysoká (například při svařování ocelí HSS), je výhodné využít technologii pulzního svařování, kdy nedochází k tak dlouhodobému zatěžování svařovacím proudem, čímž se sníží sublimace kovu. Tuto technologii lze použít i pro svařování plechů větších tloušťek, nebo kovů s nízkou tepelnou vodivostí [29].

1.2.1 Tepelná bilance ve spoji výstupkového svařování

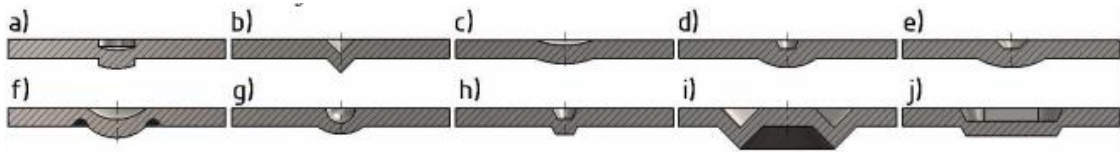
Výstupkové svařování se většinou využívá právě pro nesymetrické díly, které se kompletně liší ve svém tvaru (matice-plech). Takové uspořádání je kvůli nerovnováze tepla nepříznivé. Tyto nesymetrie lze obejít tvrdším svařovacím režimem, protože díky velmi malým časům svařování je omezen poměr mezi odvedeným teplem ze spoje a teplem potřebným k vytvoření spoje. Čím nesymetričtější tvary těles jsou, tím je doporučeno použít tvrdší proces svařování, pro dosažení co nejkratších časů. Nevýhodou tvrdého svařovacího režimu je, že dochází k lokálním ohřevům materiálu a mohutným výstřikům ze svaru [13][14][15][17].

Z těchto důvodů je snaha navrhovat spoje takovým způsobem, aby nebyl prováděn za extrémních podmínek. Správné umístění výstupků buď na jeden, druhý, nebo oba dílce, je první nezanedbatelnou úlohou předpřípravy. Dále se upravují upínací čelisti přípravků, které jsou určeny pro jednoúčelové aplikace, nebo se upravuje průměr elektrod přivádějících svařovací proud do spojovaných materiálů. Výstupky odvádějí menší množství tepla, než je tomu u rovných ploch. Proto jsou výstupky široké a nízké. Při rozdílných tloušťkách svařovaných materiálů, se výstupky vytvářejí na tlustším z nich. Pokud jsou si tloušťky dílců blízké, nebo stejné, volíme tvorbu výstupků na materiálu, který má vyšší tepelnou vodivost [7][13][14][15].

Teplo, které vzniklo ve svaru, se šíří v rámci svařeného dílce, dále upínacími čelistmi a elektrodami. Elektrody jsou zhotovené z materiálu s vysokou elektrickou i tepelnou vodivostí, protože teplo, které je odvedené do elektrody, je s porovnáním tepla odvedeného do okolí o mnoho větší. Teplo, které se odvádí do okolí je zanedbatelné [14][15][17].

1.2.2 Tvary výstupků pro výstupkové svařování plechů

Pro výstupkové svařování plechů jsou navrhovány například tyto výstupky:



Obrázek 10.: Tvary výstupků [16][17]

Popis obrázku 2.2.3:

- a) malá nosnost – nedoporučuje se,
- b) malý rozměr – nevyhovuje,
- c) nevhodné pro plechy do 3 mm, u tlustších plechů ojediněle,
- d) pro tloušťky plechů 0,75 mm - 2,5 mm, případně více,
- e) pro tloušťky plechů 0,75 mm - 2,5 mm, případně více,
- f) pro tloušťky plechů 0,75 mm - 2,5 mm, případně více,
- g) méně obvyklé, potřeba většího svařovacího výkonu,
- h) pro plechy nad 3 mm, optimální, u plechů s větší tloušťkou,
- i) pro plechy do 0,75 mm, velká plocha, větší tuhost, špatně se umísťuje na okraje,
- j) vyšší pevnost v porovnání s kruhovými výstupky, ale vyžadují větší proudy, tlaky, vhodné na okraje, větší lisovací síla.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, výstupky se vytváří lisováním nebo ražbou a mohou mít různé tvary. Každý tvar výstupku má své určení a vhodnost využití vzhledem k průchozímu svařovacímu proudu a svařovacímu tlaku. Výstupky jsou tvořeny v rozmezí tlouštěk materiálu od 0,3 - 6 mm. Pod hodnotu tloušťky 0,3 mm by výstupek byl téměř nerozlišitelný a nad hodnotu 6 mm je tvorba výstupku technologicky náročná. Při tvoření výstupku by nemělo docházet k oslabování materiálu. Každý výstupek by měl být při svařování identický a neporušený pro vytvoření stejných a stejně kvalitních spojů. Dále se výstupky volí i s ohledem na vzdálenost od okrajů svařovaných materiálů. Znázornění výstupků viz Obrázek 10.: Tvary výstupků [16][17] [16][17].

1.2.3 Výstupkové svařování matic

Pro výstupkové svařování matic jsou primárně využívány matice typu:

- a) **Kruhov**é matice s výstupky. Primárně mají tři výstupky, které brání otočení (utrnutí) při otáčení [32].



Obrázek 11.: Kruhová matice s výstupky [32]

- b) **Matice na bázi jazýčků**. Používají se do přírub, nebo úzkých kanálů. V případě zobrazeném na obrázku je osazena dvěma výstupky ve tvaru žeber [32].



Obrázek 12.: Jazýčková matice s výstupky [32]

- c) **Obd**élníkové matice. Tyto matice jsou navrženy na obdél níkové základně s dírou se závitem ve středu. Jsou osazeny čtyřmi výstupky, které zajišťují maximální pevnost [33].



Obrázek 13.: Obdél níková matice s výstupky [33]

- d) **Single Tab**. Jedná se o svařovací matici, která je vybavena jednou dírou a jediným výstupkem. Tento jediný výstupek poskytuje hlubší a pronikavější svar, než je u předešlých variant, a proto je možné ho použít pro tlustší materiály [34].

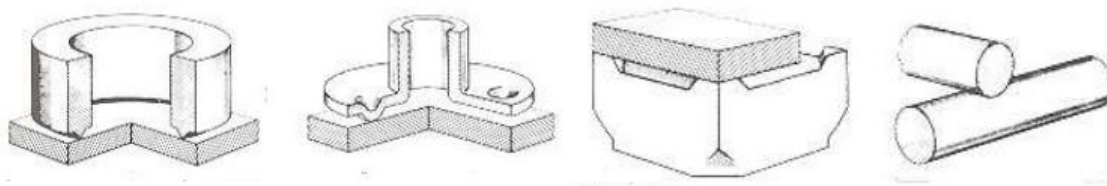


Obrázek 14.: Single tab [34]

V předešlých čtyřech obrázcích si lze povšimnout, že okolo funkčních ploch je vždy vytvořen zaoblený výběžek, nebo kuželová plocha. Tyto prvky mají za účel, mimo funkční plochy závitů i vystředění díry se závitem vůči díře v základním materiálu, se kterým mají být tyto matice svařeny. Jsou nedílným prvkem při přivařování matic [32][33][34].

Znázorněné matice jsou pouze základními typy. Lze kombinovat tvary, typy (využívají se i typy primárně určené pro výstupkové svařování plechů), počet a umístění výstupků, stejně jako se dá kombinovat počet děr (závitů) [16][17][29].

V automobilovém průmyslu se vyskytují díly na místech, které nejsou uzavřené a mají zajištěn dobrý odvod vlhkosti. Zde se používají matice, které mají výstupky jednotlivě rozmístěné. V případech, kdy musí být zajištěná voděodolnost celého svařence, aby nedocházelo ke zvýšení agresivity korozního prostředí, se používají matice, které mají výstupek vedený v jediném celku. Tento výstupek je nazýván prstencovým [29].



Obrázek 15.: Druhy výstupků (zleva: prstencový výstupek, kruhově rozmístěné jednotlivé výstupky, jednotlivé výstupky po rozích čtverce, výstupky pro svařování kulatin) [1]

Proud, který je potřeba pro vytvoření svarového spoje při výstupkovém svařování je menší, než je tomu u klasického bodového svařování. Ovšem elektrický proud musí být dostatečně velký, aby se zajistilo natavení výstupku, a ne deformace výstupku vlivem přitlačných sil elektrod. Přitlačná síla elektrod po svařování přesto musí být dostatečně velká, aby všechny výstupky vytvořené na matici byly vyrovnány a v dotyku se základním materiálem. Tím docílíme požadované kvality svaru, s minimálními riziky studeného spoje a přílišnou sublimací kovu [29].

Z výše uvedených důvodů musí být svařovací stroj schopen sledovat přitlačnou sílu elektrod, kterou svařovací stroj vyvíjí, aby mohl rozpoznat, kdy všechny výstupky dolehly a zda síla nepřekračuje hodnotu, která by zdeformovala výstupek nebo základní materiál. Další vady, které může způsobit pomalé sledování přitlačné síly elektrod jsou: nedostatečné nebo přílišné stlačení výstupků s deformací matice, nebo základního materiálu i nedostatečné vytlačení výronku, který je známkou dobře provedeného svaru [29].

1.2.4 Svařování svorníků

Kondenzátorové svařování lze využít například pro svařování svorníků, kde se využívá vysokého počátečního výboje, který kondenzátor dokáže vygenerovat. Na svornících, které jsou určeny k následujícím metodám, jsou vytvořeny hroty (výstupky), které stojí za úspěšností těchto metod [27].



Obrázek 16.: Svorník se zapalovacím hrotem [27]

1.3 Svařovací stroje

Odporové svářecí stroje se skládají ze dvou základních částí: mechanické a elektrické.

- Mechanická část zajišťuje upnutí a přitlačení svařovaných částí rameny, na jejichž koncích jsou proti sobě uloženy elektrody. V podstatě se jedná o lis;
- elektrická část vnáší elektrickou energii do místa, kde se mění na teplo viz. Kapitola 2.2.1. Tato část je tvořena u odporového svařování transformátorem se speciální konstrukcí, kterou doplňují zařízení schopná zapínání a vypínání proudu [25].

Doba zatížení vyjadřuje, jak je stroj zatěžován svařováním. Pravidelně se střídá doba, kdy je svářecí stroj zapnutý (t_s) a kdy je vypnutý (perioda přestávky- t_p). Z následujícího vzorce lze vyjádřit doba zatížení v průběhu svařovacího cyklu [25].

$$\frac{t_s}{t_s+t_p} \cdot 100\% = DZ\% \quad \text{rovnice 3 [25]}$$

Kde t_s doba svařování [s]
 t_p doba přestávky [s]
DZ..... doba zatížení

U kondenzátorového svařování je prakticky mechanická část stejná. Je tvořena výhradně hydraulickými rameny, která jsou předurčena k vyvíjení větších přítláčných sil elektrod během svařování, která je potřeba při kondenzátorovém svařování. Stroje mohou být vhodně konstrukčně pozmeněny pro vestavění do automatických linek. Například ve tvaru portálu, nebo s rámem ve tvaru písmene C [39][40].

Elektrickou část tvoří kondenzátory, nebo kondenzátorové baterie. Přenos energie do místa svaru je veden z kondenzátoru přes pulzní transformátor a řádově během jednotek milisekund je svar hotov. Výhodou je, že energie potřebná pro nabití kondenzátoru je menší. Ve výsledku je tato technologie 5 až 10 krát úspornější na energii ve srovnání se stroji středofrekvenčními. Díky nabíjení kondenzátorů, a ne odběrem přímo z elektrické sítě, je tato technologie nenáročná na elektrické rozvody a pokročilé jištění. Tím eliminujeme nežádoucí zpětné rušení rozvodné sítě [25][39][40].

1.3.1 Svařovací zdroje pro odporové svařování

Svařovací zdroje se využívají pro generování dostatečné velikosti elektrického proudu a musí splňovat dostatečná kritéria pro ochranu bezpečí obsluhy a k zajištění co nejlepšího svaru [25].

Pro odporové svařování využíváme jak stejnosměrný, tak střídavý proud, ale i zdroje kondenzátorového typu. Svařovací zdroje dělíme dle těchto kritérií:

Přenos tlaku:

- s mechanickým přenosem tlaku (kusová výroba, opravy),
- s pneumatickým přenosem tlaku (sériová výroba) ,
- s hydraulickým přenosem tlaku.

Podle typu a pohybu ramen:

- s pohybem po kružnici,
- s výsuvnými horními i spodními rameny,
- s výsuvným horním ramenem a vyměnitelným spodním ramenem,
- s přímočarým pohybem,
- svařovací lisy.

Podle elektrického napájení

1. jednofázové transformátory – primární proud, který je odebírán přímo ze sítě, je regulován většinou tyristorovým modulem. Výhodou těchto strojů je konstrukční jednoduchost. Nevýhoda tkví v nesymetrickém zatížení sítě.
2. Třífázové transformátory
 - s usměrněním proudu – Třífázové napájení zajišťuje rovnoměrnější přívod elektrické energie do místa svaru, čímž se sníží čas svařování a stejně tak i potřebný svařovací proud. Výhodou je možnost svařování neželezných kovů a materiálů, které mají vyšší elektrickou vodivost,
 - bez usměrnění proudu.

3. Středofrekvenční a vysokofrekvenční invertorové svařovací zdroje – pracují s frekvencí 1-25kHz schopné generovat proud až 150kA. Výhodou je možnost svařování neželezných kovů a slitin, nebo materiálu vyrobených práškovou metalurgií. Lze také svařovat různé typy povlaků. Další výhodou je vysoká kvalita svarů, kratší svařovací časy a delší životnost elektrod.
4. Kondenzátorové svařovací zdroje – kondenzátory (kondenzátorové baterie) jsou nabíjeny přesnou hodnotou energie potřebnou pro vznik svarového spoje, který je vytvářen znatelně větším svařovacím proudem než transformátorové, či středofrekvenční zdroje. Proud z kondenzátorové baterie je vnášen do místa svaru přes vybíjecí transformátor. Výhodou je podstatně kratší čas svařování (do 100ms) než u předchozích zdrojů a schopnost přivádět jen přesné množství potřebné energie pro vznik svarového spoje [1][7].

1.4 Typy elektrod pro odporové svařování

Elektroda se nachází v přímém styku se svařovanou součástí, přičemž je součástí sekundárního obvodu. Elektroda primárně přivádí do místa svařování velký svařovací proud. Z tohoto důvodu je nutné, aby elektroda byla zhotovena z materiálu, který dokáže přenést takový výkon – tedy aby vodila. Základním materiálem je proto měď. Pro výstupkové svařování ovšem nejsou klíčové pouze elektrické vlastnosti jako je vodivost [25][26][31].

Elektrodový materiál by měl splňovat:

- již zmíněnou dostatečnou elektrickou a tepelnou vodivost, která musí být splněna i za vyšších teplot při svařování,
- v případě výstupkového svařování musí snést dostatečné mechanické zatížení, aby se elektroda nedeformovala vzájemně s výstupkem po přivedení přitlačné síly elektrod,
- s předešlým bodem související co nejvyšší teplota „měknutí materiálu“. To znamená, že musí splňovat dostatečně vysokou mez kluzu za vyšších teplot, aby nebylo předčasně dosaženo plastických deformací. Tím se materiál bude pohybovat v oblasti elastických (vratných) deformací. Takto se zajistí, že se veškerá vnesená síla během svařování soustředí do předem navržených míst a s postupným opakovaným zatížením nepůsobí jinde, nebo ve větší oblasti, vlivem deformace elektrody,

- během vysokých teplot je zvýšená náchylnost materiálu k oxidaci, a proto musí mít elektrodový materiál vysokou odolnost proti oxidaci,
- kvůli kvalitě výsledného svaru a stejně tak životnosti elektrody musí být materiál elektrod dostatečně odolný proti opotřebení za vyšších teplot,
- obrobitelnost je další důležitý aspekt, protože vlivem difúze se z elektrody na svařovaný materiál usazuje materiál (ale i ze svařovaného materiálu na elektrodu), který snižuje účinnost svařování vzhledem ke vznikajícím slitinám na povrchu elektrod. Proto s ohledem na předešlé body se po určitém počtu provedení svarů musí elektrody obrobit speciálními frézami (obrábění ovšem nelze provádět neustále dokola a tato úprava je počtem opakování omezená),
- pro maximální dodržení předchozích bodů by byly potřeba obrovské výrobní náklady – proto se volí kompromis vzhledem k požadavkům svaru a co nejnižšími výrobními náklady [25][26].

Dosáhnout požadovaných vlastností, nebo zlepšit vlastnosti elektrod lze povrchovými úpravami elektrod. Tento problém se řeší zejména v souvislosti s automobilovým průmyslem, kdy se bodově svařují pozinkované plechy. Roztavený zinek totiž reaguje s mědí, kterou elektroda obsahuje a vzniká slitina mosazi, čímž se zásadně a nežádoucně snižuje vodivost elektrody. Proto probíhá výzkum v této oblasti a jako výhodné se jeví řešení na elektrody nanášet povlak, který je tvořen ze tří vrstev: Ni/(TiCp/Ni - slitinou titanu, kopernicia a niklu)/Ni. Tato vícevrstvá ochrana snižuje nežádoucí legování mezi zinkem a slitinou mědi [26].

Například pro bodové svařování je všestranným materiálem CuCr1zr (slitina chromu – 80%, mědi – 12% a zirkonia – 8%), který se využívá téměř ve všech případech, pokud není nutná zvýšená pevnost nebo vyšší vodivost elektrody. Tvářením mědi za studena lze dosáhnout hodnoty tvrdosti 120 HB. Ovšem při dosažení přibližně 200 °C se tato tvrdost ztratí vlivem žíhání, kdy dojde k odpevnění materiálu. Teplota, při které elektroda pracuje během odporového svařování, se pohybuje v rozmezí hodnot 600 až 700 °C. Při těchto teplotách je možnost dodržet tvarovou stálost pouze speciálně mechanicky a tepelně zpracovanou mědí. Legujícím prvkem je chrom, který se při tepelném zpracování vylučuje na hranicích zrn mědi, kde zvyšuje tvrdost trvale, pokud není opakovaně překračovaná hranice teploty 500 °C. Vlivem tohoto překračování stejně vznikne omačkání elektrody [25][26][31].

Hlavní zásadou u odporového svařování je tedy dokonalé chlazení elektrod [25].

Tabulka 1.: Přehled vlastností a využití materiálů elektrod pro odporové svařování [25][37]

Označení materiálu	Tvrдость HB	Elektrická vodivost (% Cu)	Teplota měknutí (°C)	Použití
CuCr1Zr	130-160	43-50	220	Bodové svařování
E – Cu*	80–95	Min 96	180	Všeobecné, lehké kovy
Co – Cd	96	Min 64	300	Bodové a švové svařování
Cu- Ag4 – Cd	115	75–85	400	Švové, rychlobodové, výstupkové svářečky
Cu-Ni2 – Si	180	20–25	450	Čelisti pro stykové a výstupkové svařování
ASCO – A – 60 (slinutý materiál)	100–140	22	700	Svařování mědi, stykové svařování
CuCoNiBe	210-260	25	480	Výstupkové svařování

*Měď tvářená pro elektrotechnické účely.

1.4.1 Životnost elektrod

Životnost svařovacích elektrod pro výstupkové svařování popisuje norma ČSN EN ISO 8166. Počet svarů, který je vykonán jedním párem elektrod, bez jakéhokoliv opracování dosedacích ploch, nebo jejich přestavení, se označuje jako trvanlivost elektrody. Jak se elektroda používá, dochází k jejímu postupnému opotřebování a tím se zhoršuje především kvalita výsledného svaru. Dále dochází vlivem deformace elektrody i k nechtěné deformaci svařovaného materiálu. Kvůli těmto opotřebením musíme znát životnost elektrod, tedy hranici, za kterou je nutné elektrodu obrobit, nebo vyměnit za nový pár elektrod, aby k těmto defektům nedošlo. U kondenzátorového svařování je životnost elektrod zásadně prodloužena, díky rychlosti svařování, kdy je eliminováno prohřívání elektrod. Díky rychlosti svařování nedojde k nežádoucímu snížení pevnosti, vodivosti a tvrdosti elektrod. Vzhledem k přesné hodnotě energie vnášené do svarové plochy nedochází k tak zásadnímu napalování nečistot na povrchy elektrod, a proto je také proces stabilnější a bez nutnosti průběžné kontroly a údržby kvality elektrod a jejich dosedací kvality na svařované části [7][40].

1.5 Technologie kondenzátorového svařování

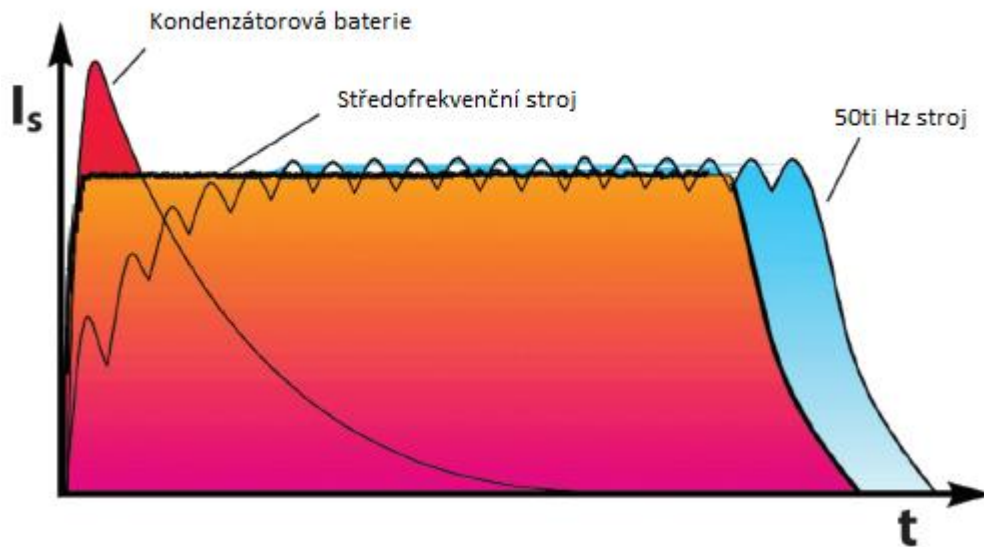
Jedná se o progresivní a velice produktivní svařovací metodu. Zažívá velký rozmach zejména v automobilovém průmyslu, protože automobily mohou být díky této metodě lehčí a zároveň pevnější díky vývoji možností svařování materiálů, které byly dříve extrémně obtížně svařitelné a samotné svařování je významně rychlejší. Ovšem prozatím probíhá vývoj kleští, kterými lze osadit automatizovaného robota, pro možnost jeho zakomponování do automatických linek [28]. V automobilovém průmyslu se využívá ke spojení různých čepů, svorníků, tenkostěnných dílů a navařování matic či šroubů na plechové výlisky a dále při výrobě ozubených kol. Tato technologie spadá pod svařování elektrickým odporem, ovšem liší se způsobem vnášení elektrické energie do místa svaru. Hlavní výhodou kondenzátorového svařování je zkrácení času svařování a s tím souvisejícím snížením spotřeby energie. Díky krátkému impulzu, jenž je do místa svaru přiváděn z nastřádané energie v kondenzátoru, a ne přímo z elektrické sítě (jako tomu je u klasického odporového svařování), se zmenší tepelně ovlivněná oblast svaru do takové míry, že výsledný svar je téměř bez vnitřních pnutí a deformací. Místo svaru nemusí být chráněno žádnými plyny a nevyžaduje se zvláštní prostředí. Tyto skutečnosti umožňují svařování plechů již od tloušťky 0,8 mm. Další výhodou je nepodmíněné chlazení elektrod z důvodu minimálního přenosu tepla na elektrody [20][28][42].

Tato technologie je dále výhodná s ohledem na materiál, kdy se kombinací velkých proudů a krátkých časů svařování eliminují vzniky vrubů a hromaděním dilatačního napětí na hranici základního a tepelné ovlivněného materiálu. Díky tomu je omezena možnost vzniku mikrotrhlin při cyklickém zatěžování svařeného materiálu [40].

Další nespornou výhodou oproti klasickým způsobům odporového svařování je možnost spojit obtížně svařitelných nebo dříve i nesvařitelných ocelí, kde je obsah uhlíku i 0,6 %. Dále lze použít při svařování ocelí nelegovaných, za tepla tvářených a kalených, vysokopevnostních a heterogenních materiálových kombinací oceli a barevných kovů a konečně díly s velmi odlišnou tloušťkou průřezů svarových ploch. Tyto skutečnosti jsou velmi ceněné v automobilovém průmyslu [40].

Přes tyto všechny nesporné výhody má kondenzátorové svařování dvě nevýhody. První nevýhodou je nemožnost nastavit čas vybíjení kondenzátoru – svařovací čas. Lze nastavit pouze hodnotu proudu. Druhou nevýhodou je cena svařovacího zařízení, tedy pořizovací náklady [23][40].

Princip kondenzátorového odporového svařování spočívá v nashromáždění vysokého elektrického náboje v kondenzátoru, který po přivedení impulzu vybije tuto energii krátkým impulzem do transformátoru, který přetransformuje proud do místa svaru. Transformátor indukuje pulz proudu o velikosti 3-300 kA působící po dobu 1,2 – 14 milisekund. Přičemž lze celý cyklus zopakovat během 1 až 3 sekund po předchozím svařování. Při svaru dochází k vybití celého kondenzátoru. Tento proces samozřejmě vyžaduje programové řízení. Omezením kondenzátorového svařování spočívá v nutnosti konstrukčně vymezeného svarového průřezu (tj. místo, předdefinované k vytvoření svaru), abychom dosáhli dostatečné proudové hustoty v místě svaru a kondenzátorová baterie se nevybila před konečným vytvořením definovaného svaru. Což znamená využití metody výstupkového svařování – tudíž předlisováním výstupků, nebo vytvořením prolisů. Díky využití výstupkového svařování lze využívat menší úroveň energie v kondenzátoru (využití kondenzátorů s menší kapacitou) [20][21][23][40].



Obrázek 17.: Charakteristika proudového průběhu kondenzátorové baterie, středofrekvenčního stroje a 50ti Hz stroje [17]

Jako u každého způsobu svařování je důležité před zahájením svařování zkontrolovat kvalitu povrchu a mít znalost o svařovaném materiálu. Ovšem kondenzátorovým svařováním lze svařovat i heterogenní spoje ocel, mosaz, hliník (lze i hliník na hliník) [20][21].

1.5.1 Vady svarů vznikající při kondenzátorovém svařování

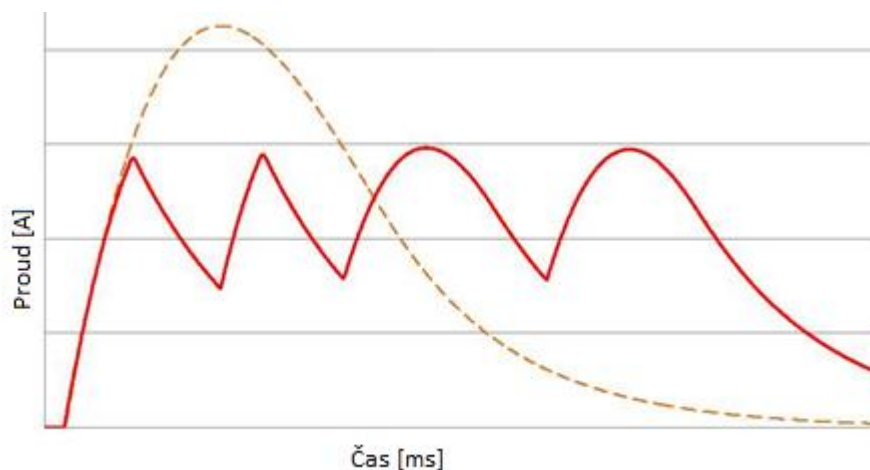
Kondenzátorové svařování může zapříčinit nežádoucí metalurgické jevy. Významným vlivem na tyto nežádoucí jevy má doba svaru. Bylo zjištěno, že optimální doba svařování (t_s) by se měla rovnat dvojnásobku časové konstanty obvodu R_c . Pokud je doba svařování t_s větší než dvakrát R_c , vznikne vada neúplným svařením spoje, z důvodu předčasného vybití kondenzátoru. Pokud nastane opačná situace a čas svařování bude delší než dvojnásobek časové konstanty obvodu, vznikne studený spoj, kvůli ztrátě energie v obvodu, a ne ve svarovém spoji [41].

1.6 Přehled výrobců a jejich systémů

1.6.1 Němečtí výrobci

Kapkon GmbH

Firma Kapkon disponuje strojem, který je nejuniverzálnější pro kondenzátorové svařování – systém vícekondenzátorových zdrojů (zkratkou MCS – multi-capacitor source). Tento systém je složen kombinací 25 kondenzátorů, které jsou zapojené do 4 kondenzátorových bank. Tyto banky mohou být nezávisle na sobě nebo současně a s různými časovými prodlevami spuštěny kontrolovaným způsobem. Díky těmto čtyřem kondenzátorovým bankám není nutné čekat sekundy na nabití kondenzátoru a je možné využívat tepelné vazby - jak kov vlivem průchodu proudu zvyšuje svou teplotu, stoupá i jeho odpor a tím opět jeho teplota. Tento systém dokáže extrémně snížit tepelně ovlivněnou oblast, díky své rychlosti spojení svařence, a přesto je spojení velmi pevné. Díky možnosti nastavení úrovně energie v kondenzátorových bankách tento systém tvoří obrovskou možnost využití. Zejména v oblasti obtížně spojitelných heterogenních spojů. Například vysokopevné materiály, nebo kombinace CW a Cr ocelí. Firma Kapkon nabízí stroje s maximálním proudem od 60 do 750 kA [42][43].



Obrázek 18.: Znárodnění svařování s jedním kondenzátorem (přerušovaná křivka) a se 4 kondenzátory (plná křivka) v závislosti proudu na čase [43]

Dalšími prvky, které nabízí systém vícekondenzátorových zdrojů firmy Kapkon jsou:

- kombinací pulzních sekvencí je umožněno regulovat svařovací proud a vznikající teplo tak, aby parametry vedly k co nejlepšímu spoji,
- možnost úpravy povrchu a jeho aktivace počátečními impulzy, což snižuje riziko výstřiku roztaveného kovu a vede k vyšší stabilitě procesu,
- možnost nastavení doby náběhů proudů díky různým kapacitám kondenzátorů,
- možnost impulsy svařenců předeřhřívát, nebo naopak zpomalovat jeho ochlazování,
- zvyšování špičkového proudu, nebo jeho snižování ,
- v neposlední řadě je možné simulovat postup svařovacích proudů díky softwaru spojeném se svařovacím systémem [42][43].



Obrázek 19.: Vícekondenzátorový stroj firmy Kapkon [43]

Conntronic

Další německá firma Conntronic nabízí 4 typy strojů.

První řada nese název L – Rám typu C s pneumatickým pístem, přítlačnou silou od 20 do 45 kJ; F řada je v podstatě řada L vylepšena o výškově nastavitelný stůl a druhé ochranné okno; následující řada E stále se stejnými parametry je přizpůsobena pro tělesně hendikepovanou obsluhu. Výškové nastavení je poháněno motorovým pohonem a je možné obsluhovat jej v stojící i sedící pozici.

Řady L, F, E mohou být obohaceny o oddělený box a píst poháněn servomotorem.

Řada P – nejvyšší – portálová řada schopna svařovat díly o výšce 800 mm během 10 ms silou od 60–200 kJ. Tuto řadu je možné obohatit o otočný stůl a je možné ji zautomatizovat dle potřeby. Dále je možné všechny řady využívat v případě potřeby jako středofrekvenční stroje [54].



Obrázek 20.: Stroj firmy Conntronic řady P [54]

Bokli

Firma Bokli nabízí maximální hodnotu proudu od 30 do 1000 kA, přítlačnou sílu elektrod od 0,1 do 400 kJ, opakovatelnost svařování za 2,5 s.

Stroje nabízí v provedení C ráků, ráků portálových a ráků individuálních.

Elektrická část strojů se skládá z kondenzátoru vybíjejícím se vysoce výkonným tyristorem do transformátoru.

Přednostmi strojů firmy Bokli jsou:

- monitorování průběhu a kvality svařování díky snímačům posunů, proudů a sil,
- možná interakce systému stroje s vyhodnocením dat v Microsoft Excel,
- integrovaná kontrola kvality a dokumentace,
- zaručení přesnosti svarů díky robustní konstrukci odolné proti zkroucení,
- možnost použít elektrody do velikosti 190 mm,
- návrh vlastních transformátorů s o 30% vyšší účinností [44].



Obrázek 21.: Kondenzátorový svařovací stroj typu C formy Bokli [44]

1.6.2 Indičtí výrobci

SMD spot weld

Indická firma nabízí kondenzátorové svařovací stroje v rozpětí maximálních proudů od 20 do 90 kA, s možností sledování průběhu proudu, sledování průběžného napětí. Přítlačnou sílu lze vyvozovat hydraulickými i pneumatickými systémy [45].



Obrázek 22.: Kondenzátorový stoj firmy SMD spot weld [45]

Shashi enterprises

Tato firma nabízí stroj o maximální hodnotě proudu 40 kA s maximální přitlačnou silou 9,6 kJ vyvozovanou hydraulickými systémy a maximální možnou velikostí elektrody 150 mm. Tento stroj může být poháněn i dieselovým agregátem [46].



Obrázek 23.: Kondenzátorový stroj firmy Shashi enterprises [46]

Artech

U strojů firmy Artech je možné přednastavit si programy svařování pro různé úlohy. Nabízejí stroje schopné vygenerovat energii od 1 do 30 kVA [47].



Obrázek 24.: Kondenzátorové stroje firmy Artech [47]

1.6.3 Čínští výrobci

Heron

Tato firma nabízí tři řady strojů. První je pro malé firmy, kde se pohybujeme s maximálním proudem od 22 do 65 kA a přitlačnou silou od 10 kJ do 75 kJ.

Druhá je s maximálním proudem od 80 do 230 kA a přitlačnou silou od 10 kJ do 120 kJ.

Třetí řada je individuální (na zakázku), kde se stroje skládají s parametry na přání zákazníka. Firma udává, že tyto stroje dokážou vyrobít v rozmezí parametrů proudů od 90 kA do 1000 kA a přitlačnou silou od 10 kJ do 120 kJ. Maximální zdvih těchto strojů pak může dosahovat hodnoty 950 mm [48].



Obrázek 25.: Svařovací kondenzátorový stroj schopný vyvinout přitlačnou sílu 120 kJ [48]

2 Experimentální část

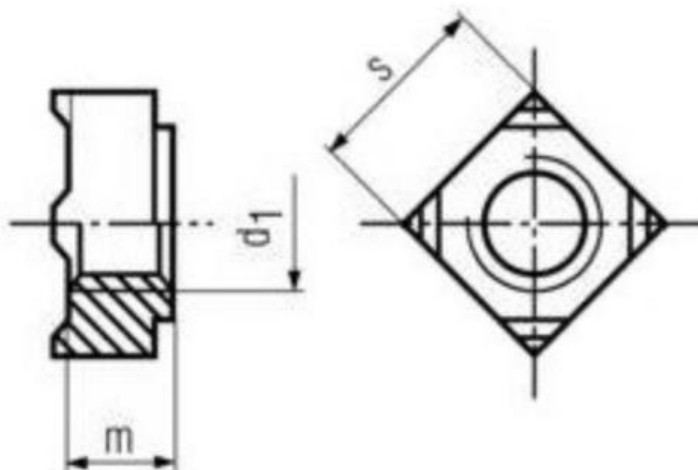
V experimentální části se tato bakalářská práce zabývá porovnáním kvality svarových spojů provedených dvěma stroji. Na kondenzátorovém stroji firmy Dalex - PrimKo 04 a středofrekvenčním odporovém lisu firmy Dalex. Tyto svařovací zdroje se vyznačují vysokou kvalitou svaru.

2.1 Návrh experimentu

Pro porovnání obou technologií byly hodnoceny výstupkové svarové spoje matic z konstrukční uhlíkové ocele s feritickoperlitickou strukturou a vysokopevnostního ocelového plechu (22MnB5+AS150). Při svařování byli použity elektrodové čepičky typu C o průměru 16 mm. Následně tyto svary byly porovnány z hlediska kvality spoje, tedy přítomnosti vad, velikosti tepelně ovlivněné oblasti, šíře spoje a mikrotvrdosti. Cílem je porovnání kvality těchto svařenců a porovnat jejich kvalitu.

2.1.1 Vlastnosti svařované matice a její rozměry

Jako jeden svařovaný materiál byla použita ocelová matice (dle normy DIN 928) s obsahem uhlíku 0,25 % bez povrchové úpravy, osazena 4 výstupky. Pevnostní třída této matice je 8.8. V experimentu byly použity matice M6. Matice o tomto rozměru závitu má výšku 5 mm – rozměr ,m' a délku strany 10 mm – rozměr ,s'. Matice je uzpůsobena výstupkovému svařování - v rozích matice jsou umístěny výstupky, které tvoří kontaktní plochy a budoucí místa svarů.



Obrázek 26.: Schéma matice normy DIN 928

2.1.2 Ocel 22MnB5+AS150

Tato ocel, která se řadí mezi PH (press-hardened) oceli, je vhodná ke kalení, popouštění a tváření za tepla. Po tváření za tepla - především lisováním, získává vysokou pevnost. Tato vlastnost je zapříčiněna bórem, který se přidává do materiálu v malém množství – 0,002% . Po kalení lisováním lze dosáhnout meze pevnosti až 1500 MPa a výsledná struktura je čistě martenzitická. Díky tomu, že má ocel z počátku tvářecího procesu vysokou tažnost, nízkou pevnost, a popustitelnost se tento materiál používá v automobilovém průmyslu na výrobu výztuh a bezpečnostních prvků jako jsou A či B sloupky. V automobilovém průmyslu se dá také využívat na podlahové panely pro úsporu váhy a v součástech deformačních zón vzhledem k poměru váhy a pevnosti. Pro experiment byla použita ocel s povrchovou úpravou AS150, tedy slitina Al-Si, nanesená z obou stran svařovaného plechu. Číselné označení 150 popisuje gramáž naneseného povlaku na m². Tloušťka plechu byla 1,8 mm a tloušťka povlaku 40 μm [7][49].

Tabulka 2.: Chemické složení oceli 22MnB5 [49]

Značení	Chemické složení v %					
	C	Mn	B	Si	Cr	Ti
22MnB5	0,24	1,22	0,002	0,25	0,16	0,03

Tabulka 3.: Porovnání mechanických vlastností oceli 22MnB5 vzhledem k tepelnému zpracování [52]

Zpracování	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Prodloužení [%]	Tvrdost [HV]
Bez tep. zpracování	280-400	480-580	≥20	≥140
Tepelně zpracováno	≥1000	≥1300	≥5	≥440

2.1.3 Svařovací stroj firmy Kapkon

Tento svařovací stroj má maximální kapacitu energie 8200 μF rozdělenou do dvou kondenzátorů. Pro měření byl ovšem využit pouze hlavní kondenzátor, jehož maximální kapacita je 6560 μF . Druhý kondenzátor má kapacitu energie o hodnotě 1640 μF . Stroj má maximální hodnotu proudu 80 kA. Přítlačná síla elektrod je vyvíjena servomotorem a dosáhne maximální síly 8 kN [51].



Obrázek 27.: Kondenzátorový svařovací stroj firmy Kapkon KKC 07 – MCS [51]

2.1.4 Středofrekvenční svařovací lis firmy Dalex

Stroj vyráběn firmou Dalex s označením PMS 11 – 4 využívá pneumatický píst vyvíjející tlak horní elektrodou v rozpětí hodnot 200 – 6000 N. Maximální svařovací výkon je 246 kVA, maximální svařovací proud je 29,6 kA. Maximální vzdálenost mezi rameny je 415 mm [53].



Obrázek 28.: středofrekvenční stroj firmy Dalex s označením PMS 11 - 4 [53]

2.1.5 Metalografie

Na vzorcích byl proveden příčný řez (intenzivně chlazená metalografická pila Labotom 3 – firma Struers) tak, aby byl v řezu vidět celý svar. Vzorek byl zapouzdřen na metalografickém lisu CotiPres 1 (firma Struers) do hmoty MultiFast pro ochranu hran vzorku a lepší manipulaci, dále byl vzorek broušen a leštěn na brusce Phoenix Beta (firma Buehler) a následně leptán leptadlem Nital 2% (nitrid acid in alcohol = 98ml H₂O + 2 ml HNO₃). K pozorování byl použit invertovaný metalografický mikroskop AxioObserver Dm1.

2.1.6 Mikrotvrdość

Pro měření mikrotvrdości podle Vickerse byl použit mikrotvrdoměr IndentaMet (od firmy Buehler). Princip spočívá ve vtlačování čtyřbokého jehlanu zatížením 200 g po dobu dvanácti sekund. Jednotlivé vpichy byly umístěny na přímku, která by měla svisle, či vodorovně procházet základním materiálem skrz střed svaru a skrz tepelně ovlivněnou oblast. Po dosáhnutí oblasti svaru se tato křivka nakloní tak, aby procházela skrz střed svarové oblasti a po dosáhnutí konce svarové oblasti se křivka opět narovnalala do vodorovného či svislého směru. Je důležité, aby byla dodržena vzdálenost vpichů - 2,5x délka strany vtlačeného jehlanu [55].

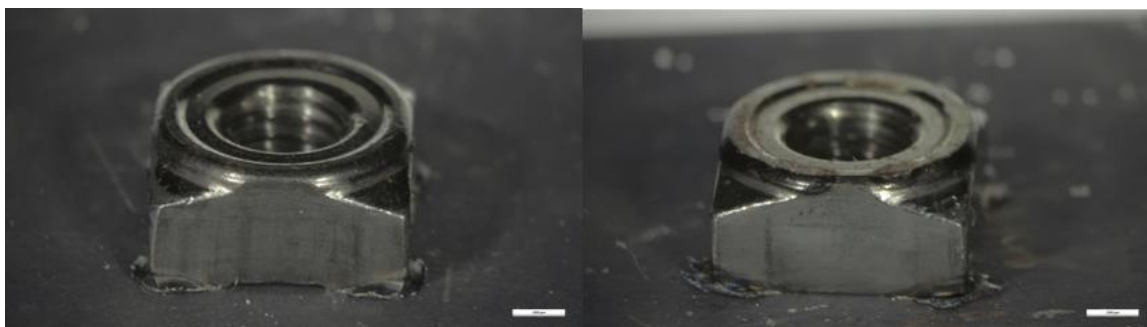
2.2 Výsledky a jejich diskuze

Oba vzorky byli úspěšně svařeny

Otlaky

Matice svařena kondenzátorovým strojem je nepoškozená, neotlačená v oblasti dosedání elektrody. U matice svařené středofrekvenční metodou však jsou zřetelné známky otláčení (Obrázek 31). Tato otláčení byla způsobena pneumatickým pístem, který vyvíjel přítlačnou sílu elektrod pouze na horní elektrodu. Tato chybovost lze vyřešit použitím servopohonů, nebo hydraulických pístů na místo pneumatických. Naproti matice svařená kondenzátorovým strojem (viz. Obrázek 32) žádné takové otlaky nemá.

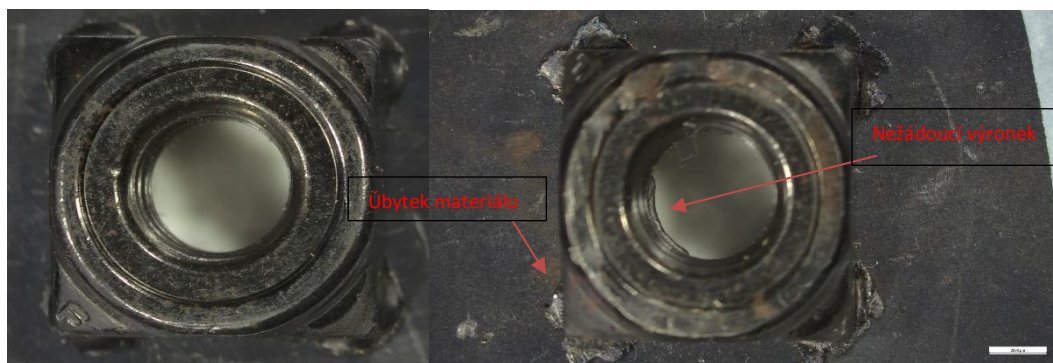
Výronek



Obrázek 29.: Kondenzátorově svařená matice (vlevo) a středofrekvenční svařená matice (vpravo) přibliženo 0,63x

Z výše uvedeného obrázku (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) lze potvrdit, že došlo k úspěšnému vytlačení výronku v obou případech. To je první známka dobře provedeného svaru. U kondenzátorové matice je vidět, že výronek kopíruje původní tvar výstupku a u středofrekvenčního svaru se více roztéká do stran.

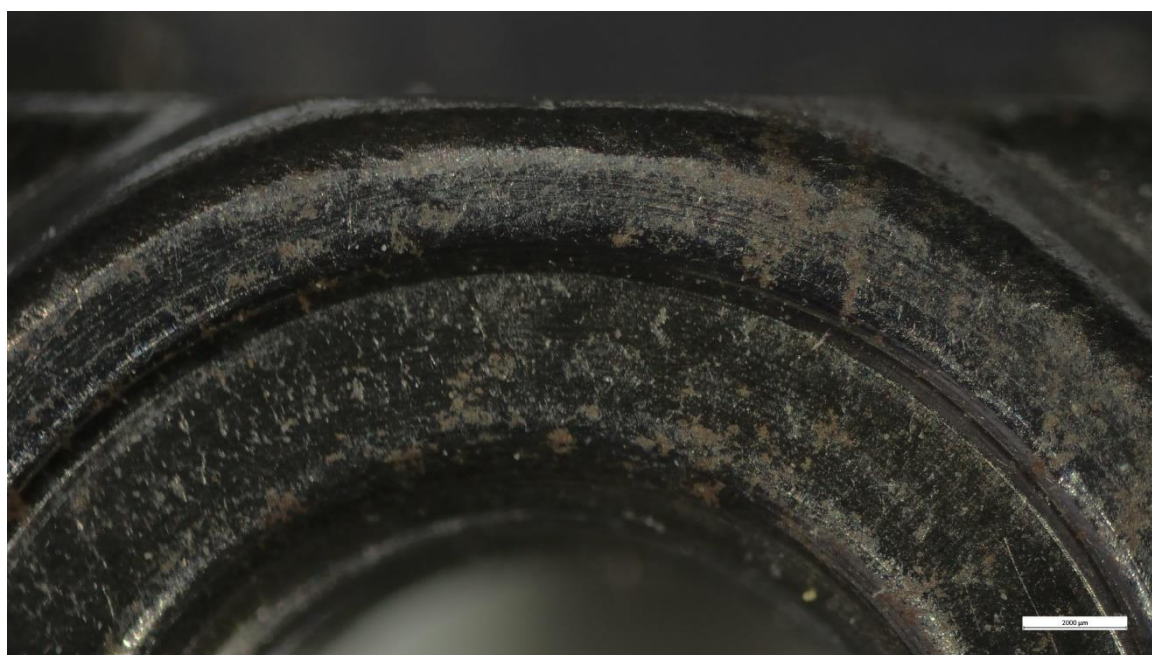
Hlavní důvod, proč se přivaňuje matice je funkčnost jejího závitu, proto se výronek při svařování nesmí dostat do závitového prostoru. Tato chyba se vyskytla u středofrekvenčního svařování a lze si ji povšimnout v levé dolní části závitové díry (Obrázek 30). Vzhledem k vnějším výronkům a jejich tvarům – u kondenzátorového svařování jsou tyto výronky téměř symetricky vytlačeny. U středofrekvenčního svařování jsou výronky nesymetricky uspořádané. V levém dolním rohu (Obrázek 30) je znatelný úbytek materiálu výronku než u zbylých tří. Lze usoudit, že přítlačná síla, která byla vyvíjena na matici nebyla rovnoměrně rozmístěná kvůli pneumatickému pístu a toto narušení rovnováhy vyvíjené síly zapříčinilo vytlačení výronku do závitové díry. Zbylé tři výronky u středofrekvenčního svařování nejsou optimální z důvodu výstřiku roztaveného materiálu ze svarové plochy směrem ze svaru.



Obrázek 30.: Vlevo kondenzátorově, vpravo středofrekvenčně svařené matice přibliženo 0,63x



Obrázek 31.: Otlacení způsobené pneumatickým pístem středofrekvenčního svařovacího stroje



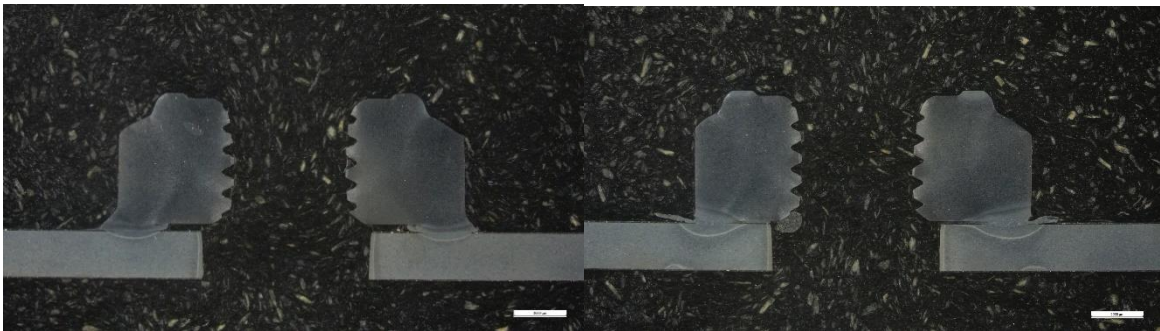
Obrázek 32.: Detail matice svařené kondenzátorovým strojem

Výška navařené matice

Při tomto pohledu na Obrázek 33 je zřetelné, že u kondenzátorového svařování je mezi maticí (nebereme v potaz roztavený výstupek - svar) a plechem mezera, zatímco u středofrekvenčního svařování téměř nikoliv. Tato mezera znázorňuje vlastnost kondenzátorového svařování, kdy je elektrický proud vnášen do místa svařovaných částí po minimální čas. Díky tomuto krátkému času nedochází k tak markantnímu vystříknutí materiálu ze svaru, jako je tomu u středofrekvenčního stroje. V provedeném testu je výsledek celkové výšky matice (to znamená celková výška svařeného plechu s maticí) uveden v tabulce (Tabulka 4). Je už na zvážení každého technologa, co je pro jeho finální produkt vhodnější nebo výhodnější variantou.

Tabulka 4.: Výška navařené matice

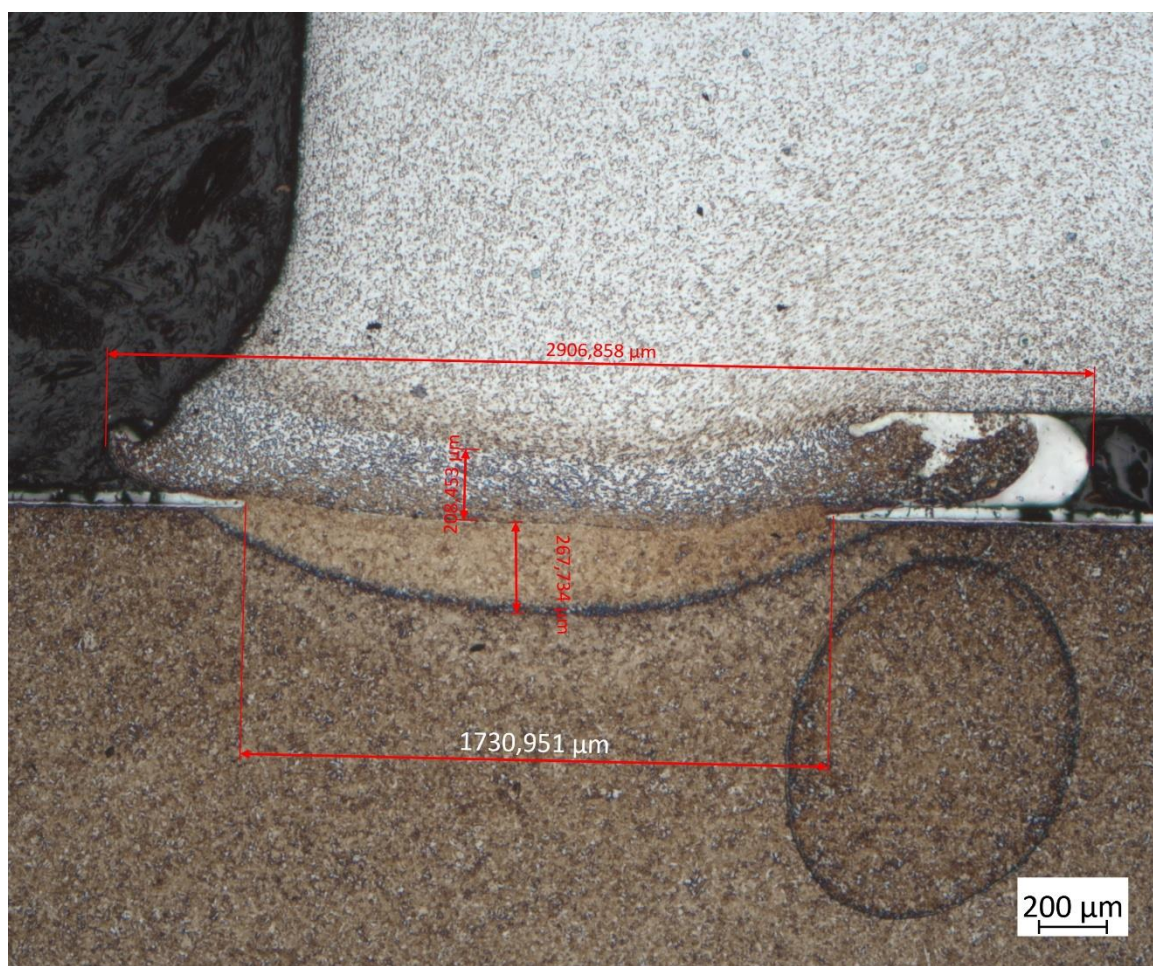
Svařování	Kondenzátorové	Středofrekvenční
Výška [mm]	6,9	6,7



Obrázek 333.: Pohled z boku na řez svařenců (vlevo kondenzátorové, vpravo středofrekvenční svařování)

Rozměry svarů

U kondenzátorového svařování byla naměřena celková délka (vytlačení) výronku je $2907 \mu\text{m}$, přičemž natavená tloušťka výronku je $209 \mu\text{m}$. Výsledná délka svaru je $1731 \mu\text{m}$ a maximální hloubka tepelně ovlivněné oblasti je $268 \mu\text{m}$. Viz Obrázek 34.



Obrázek 34.: Kondenzátorově svařená matice přibližena 25x

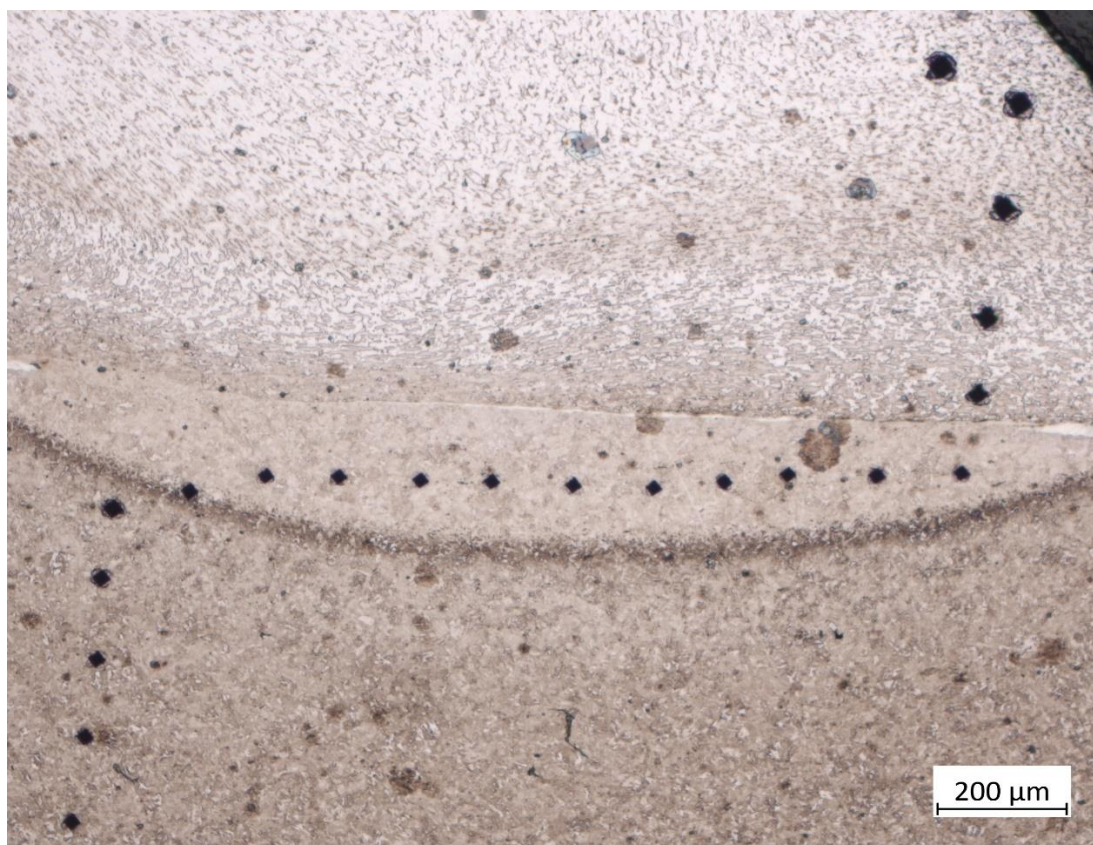
U Středofrekvenčního svařování je celková délka (vytlačení) výronku je $4435 \mu\text{m}$, přičemž natavená tloušťka výronku a tepelně ovlivněné oblasti matice je $641 \mu\text{m}$. Výsledná délka svaru je $1501 \mu\text{m}$ a maximální hloubka tepelně ovlivněné oblasti plechu je $537 \mu\text{m}$. Viz Obrázek 35.



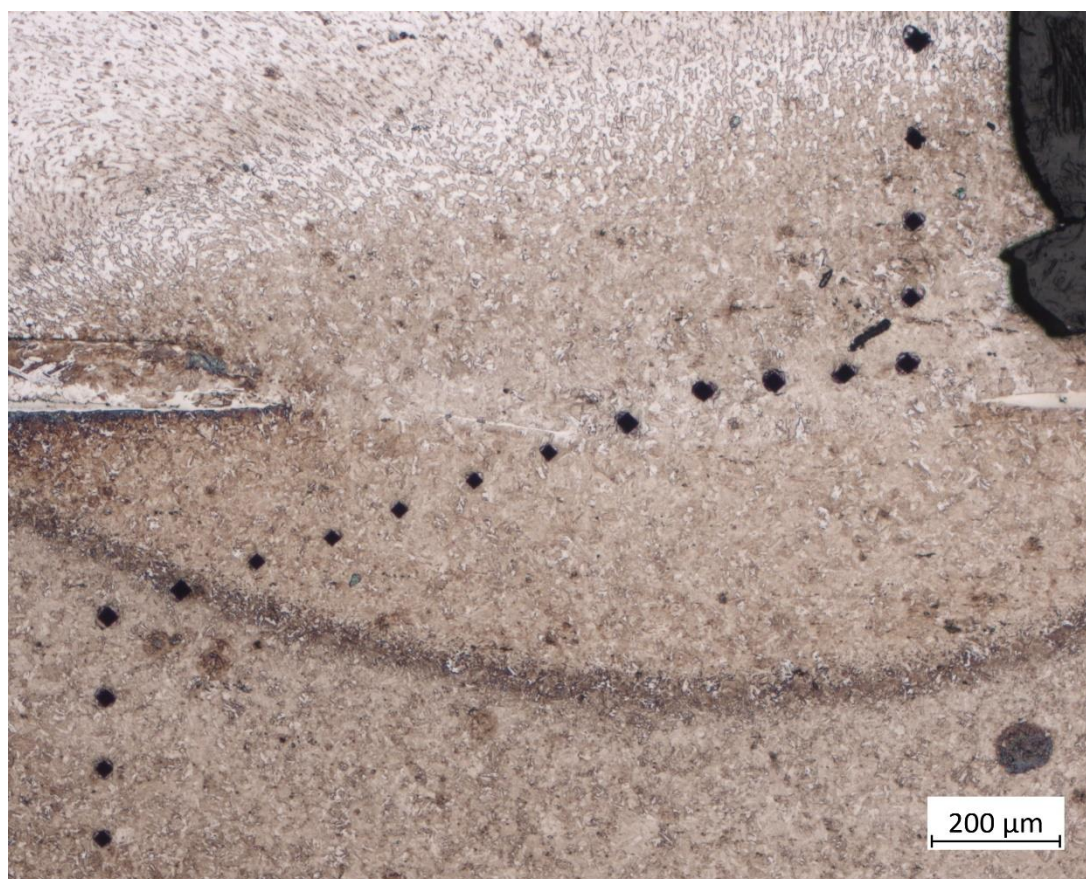
Obrázek 35.: Středofrekvenčně svařená matice přibližena 25x

Mikrotvrdot

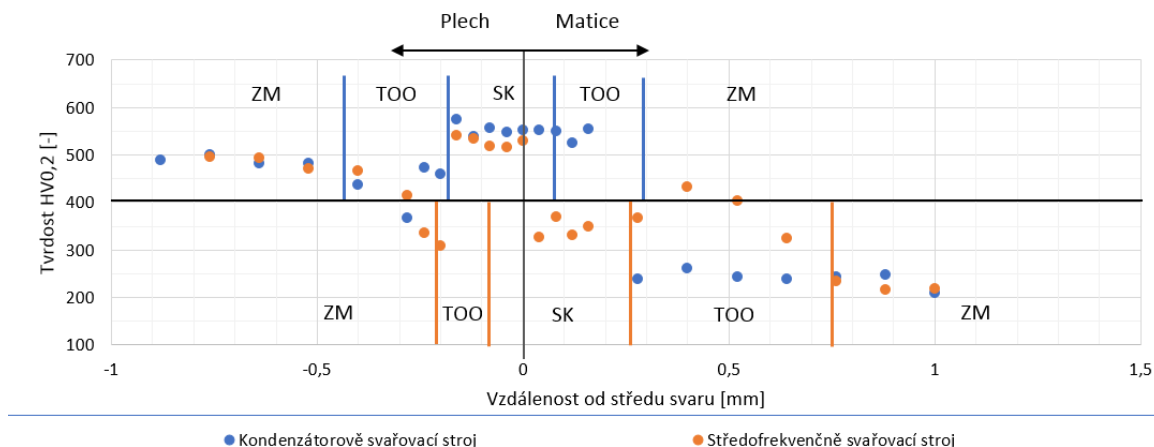
V následujících obrázcích (Obrázek 36; Obrázek 37) jsou znatelné změny tvrdosti vzhledem k vzdálenosti od středu svaru. U obou vzorků je patrné navýšení tvrdosti v části pod dělicí rovinou. Zajímavostí je vysoký skokový nárůst tvrdosti u obou svarů o více jak 200 jednotek tvrdosti dle Vickerse. U Kondenzátorového svařování je na straně materiálu matice vidět, že tvrdost svaru je vysoká, téměř srovnatelná, se svařenou ocelí – zřejmě vlivem zakalení. Naopak u středofrekvenčního svařování se na straně materiálu matice nedosáhlo takové tvrdosti.



Obrázek 36.: Měření tvrdosti na kondenzátorově svařeném vzorku



Obrázek 37.: Měření tvrdosti na středofrekvenčně svařeném vzorku



Obrázek 38.: Grafické znázornění tvrdostí vzhledem ke vzdálenosti od středu svaru

Z grafického znázornění (Obrázek 38) je zřetelně vidět skokový nárůst tvrdosti u středofrekvenčního svařování v oblasti plechu 0,2 mm směrem ke středu svaru. Hodnota tvrdosti se zvýšila o více než 200 HV. Podobný skok tvrdosti je v oblasti plechu i u kondenzátorového svařování o přibližně 300 HV. V celé délce svarového kovu se pohybuje tvrdost okolo 550 HV_{0,2}. U středofrekvenčního stroje jsou vidět kolísavé hodnoty. V oblasti SK (Svarového kovu) je snížení tvrdosti ke středu svaru zapříčiněno nízkou promíšeností svarového kovu, zatímco kolísání tvrdostí v TOO (tepelně ovlivněné oblasti) je způsobeno tepelným popuštěním martenzitu. U kondenzátorového způsobu svařování je průběh změny tvrdostí příznivější. Z obrázků výše (Obrázek 36, Obrázek 37) je znatelná rozdílná tepelně ovlivněná oblast. U kondenzátorově svařeného vzorku (Obrázek 36) je znatelně menší tepelně ovlivněná oblast, než u středofrekvenčně svařeného vzorku (Obrázek 37).

Veškeré naměřené parametry z provedených analýz jsou pro přehlednost uvedeny v Tabulka 5.

Tabulka 5.: Přehled výsledků provedených analýz

Svařování	Kondenzátorové	Středofrekvenční
Maximální tvrdost [HV]	575	540
Minimální tvrdost [HV]	210	216
Výška navařené matice [mm]	6,9	6,7
Délka svaru [μm]	1502	1731
Tepelně ovlivněná oblast matice [μm]	209	641
Tepelně ovlivněná oblast plechu [μm]	268	537
Délka výronku [μm]	2907	4435

3 Závěr

Prvotním cílem práce bylo proniknout do způsobů odporového svařování a zpracovat jeho výhody a nevýhody. Hlavním úkolem bylo zpracovat přehled problematiky odporového svařování detailněji, se zaměřením na kondenzátorové svařování využívané v automobilovém průmyslu. Následně byl proveden přehled světových výrobců kondenzátorových strojů včetně jejich systémů řízení, nastavování parametrů a inovačních trendů.

V experimentální části byly porovnány dva vzorky svařené různými metodami odporového svařování, konkrétně s využitím kondenzátorového a středofrekvenčně stejnosměrného stroje.

Z výsledku je patrné, že kondenzátorovým způsobem se dosahuje meších a užších svarů a užších tepelně ovlivněných oblastí. Stejně jako průběh tvrdosti naměřený přes svary má v případě kondenzátorového svařování příznivější průběh. Rozdíly lze nalézt také ve výsledném tvaru výrobku. U kondenzátorového svařování výrobek kopíruje tvar původního výstupku, zatímco u středofrekvenčního z důvodu většího prohřátí dochází k výstřikům svarového kovu. Jak již bylo zmíněno, z metalografické analýzy je patrné, že u středofrekvenčního svařování je znatelně větší tepelně ovlivněná oblast (na straně matice 641 μm , na straně plechu 537 μm), než je tomu u kondenzátorového způsobu (na straně matice 209 μm , na straně plechu 268 μm). Délka svaru je u kondenzátorového způsobu je výsledná délka svaru delší o 200 μm , díky čemuž lze předpokládat vyšší pevnost. Menší délka svaru je zřejmě způsobena větším výstřikem svarového kovu při středofrekvenčním svařování. Výsledná výška navařené matice je u kondenzátorového vyšší o 0,2 mm.

Po celkovém zhodnocení lze jistě usuzovat, že použití kondenzátorového svařování má vcelku ve všech ohledech pozitivnější výsledky, než je tomu u středofrekvenčního stejnosměrného svařování. Kondenzátorové svařování lze s výhodou použít pro obtížně svařitelné heterogenní spoje například matice DIN 928 na plech 22MnB5 s povlakem AS150.

Bibliografie:

- [1] Kolařík, L.: Prezentace svařování elektrickým odporem, ČVUT – FS – Ústav strojírenské technologie, Praha, 2010 URL: u12133.fsid.cvut.cz
- [2] ASM Specialty handbook. Editor M. M. AVEDESIAN, editor Hugh BAKER. Materials Park: ASM International, 1999. ISBN 0-87170-657-1.
- [3] Dorf, R. C. (2006). *Systems, controls, embedded systems, energy, and machines*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [4] ZHANG, Hongyan a Jacek SENKARA. Resistance welding: fundamentals and applications. 2nd ed. Hoboken: CRC Press, 2011. ISBN 9781466556416.
- [5] PHILLIPS, David H. Welding engineering: an introduction. Chichester: John Wiley, 2016. ISBN 9781118766422.
- [6] Welding and joining of advanced high strength steels (AHSS). 1. Editor Mahadev SHOME, editor Muralidhar TUMULURU. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. Woodhead Publishing series in welding and other joining technologies. ISBN 9780857098580.
- [7] Kondenzátorové svařování matic a vyhodnocování kvality svaru pomocí sledování svařovacích parametrů. DSpace Home [online]. Copyright © [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/12874>
- [8] ČSN EN ISO 4063 (050011) – Svařování a příbuzné procesy – přehled metod a jejich číslování. Dostupné z: https://www.technickenormy.cz/csn-en-iso-4063-svarovani-a-pribuzne-procesy-prehled-metod-a-jejich-cislovani-1/?gclid=Cj0KCQiA3NX_BRDQARIsALA3fILmEQrw81-HMXMaz6-x7uah4mGxmr_R-Qug8erD2MSO-2QJ7I7JI-AaAkIXEALw_wcB
- [9] ELUC. ELUC [online]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1808>
- [10] kondenzatorove-svarovani | ROCKWELD-GROUP. ROCKWELD-GROUP | Svařovací technika - specialista na odporové a laserové svařování [online]. Copyright © [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/kondenzatorove-svarovani/>
- [11] (PDF) The Use of Capacitor Discharge Welding Is on the Rise. ResearchGate | Find and share research [online]. Copyright © 2008 [cit. 22.11.2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279325602_The_Use_of_Capacitor_Discharge_Welding_Is_on_the_Rise

- [12] KUBÍČEK, Jaroslav. Technologie svařování [online]. Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 1994 [cit. 2010-09-25]. [dále jen Kubíček]. Dostupné v archivu pořízeném dne 2012-01-11.
- [13] Resistance Welder Manufacturers' Association. (2003). Resistance Welding Manual, Revised 4th Edition (4th ed.). Resistance Welder Manufactures Assn. ISBN 0-9624382-0-0
- [14] Davis, J. R., Ferjutz, K., & Wheaton, N. D. (1990). ASM handbook vol.6: Welding, brazing and soldering. ASM International.
- [15] O'Brien, A., & Guzman, C. (2007). Welding handbook ninth edition volume 3 welding processes, part 2 (9th ed.). Miami, FL: American Welding Society.
- [16] Výstupkové svařování | ROCKWELD-GROUP. ROCKWELD-GROUP | Svařovací technika - specialista na odporové a laserové svařování [online]. Copyright©[cit.27.10.2020].Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/vystupkove-svarovani/>
- [17] dalex-os_pms_cz_hires (pdf-email/bakalla(plocha)) (ocitovat)
- [18] PEVNOST BODOVÉHO SPOJE V MĚKKÉM A TVRDÉM REŽIMU SVAŘOVÁNÍ Vysoké učení technické v Brně [online]. Copyright ©o [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102156
- [19] Resistance Projection Welding | Engineers Gallery. Engineers Gallery| Arduino Projects | Electronics Project | .net, PHP, [online]. Copyright © [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: <http://www.engineersgallery.com/resistance-projection-welding/>
- [20] Přehled svařování [online]. Copyright © [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
- [21] PROWELD | PROWELD – přivařování svorníků [online]. Copyright © [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: https://privarovanisvorniku.cz/wp-content/uploads/2020/03/ISOFIX-a-PIM-1B_Aktual-1.pdf
- [22] Perspektivní metody spojování materiálu přivařování svorníků [online]. Copyright©[cit.27.10.2020].Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/vyzkum/Trebon09/cd/AR/Va.pdf>
- [23] Casalino, G., & Panella, F. (2006). Numerical Simulation of Multi-Point Capacitor Discharge Welding of AISI 304 Bars. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 220(5), 647–655.

- [24] Technologie svařování [online]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_vyroby_i__svarovani__kubicek.pdf
- [25] Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [26] Coatings on Resistance welding electrodes to extend life Huys • Easier. Smarter. Faster. [online]. Copyright © [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: http://huysindustries.com/wp-content/uploads/huysarticle03-Coatings_on_Resistance_Welding_Electrodes_to_Extend_Life.pdf
- [27] KOCÁK, Tibor. Aplikace kondenzátorového svařování a hodnocení svarů [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/41401>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Vít Jan.
- [28] Capacitor discharge resistance welding emerges as important projection welding option. The Fabricator - Metal Fabricating News, Products, Articles, and More [online]. Copyright © 2020 FMA Communications, Inc. All rights reserved. [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/shopmanagement/capacitor-discharge-resistance-welding-emerges-as-important-projection-welding-option>
- [29] Projection welding for nut and bolt attachment. The Fabricator - Metal Fabricating News, Products, Articles, and More [online]. Copyright © 2020 FMA Communications, Inc. All rights reserved. [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/shopmanagement/projection-welding-for-nut-and-bolt-attachment>
- [30] HUANG, Her-Yueh a Kuang-Hung TSENG. Process Parameters in Resistance Projection Welding for Optical Transmission Device Package. Journal of Materials Engineering and Performance [online]. 2011, 20(2), 244-249 [cit. 2020-05-04]. DOI: 10.1007/s11665-010-9677-2. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-010-9677-2>
- [31] ANANDA, Kamble Vijay. Analysis of Effect of Process Parameters on Resistance Spot Welding Shear Strength. International Journal of Scientific Research [online]. 2012, 2(11), 224-227 [cit. 2020-05-04]. DOI: 10.15373/22778179/NOV2013/72. ISSN 22778179. Dostupné z: http://theglobaljournals.com/ijsr/file.php?val=November_2013_1383312110_d1e39_72.pdf

[32] McMaster-Carr. McMaster-Carr [online]. Dostupné

z: <https://www.mcmaster.com/catalog/114/3151>

[33] Rectangular - 4 Projections | Buckeye Fasteners. [online]. Copyright © 2020 Fastener Industries [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: <https://www.buckeyefasteners.com/catalog/?cid=aaab-rectangular-4-projections>

[34] Single Tab - Single Projection | Buckeye Fasteners. Welcome To Buckeye Fasteners | Buckeye Fasteners [online]. Copyright © 2020 Fastener Industries [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: <https://www.buckeyefasteners.com/catalog/?cid=aaaa-single-tab-single-projection>

[35] Spřahovací trn SD1 10 x 100 - A - S235J2+C450 | Všechno zboží | PROWELD E-shop . Všechno zboží [online]. Dostupné z: <https://proweld.inshop.cz/sprahovaci-trn-sd1-10-x-100-a-s235j2c450>

[36] POLÁČEK, Tomáš. Rozbor technologie přivařování svorníků s hrotovým zážehem [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/93927>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

[37] <https://www.zmrzlik.cz/sl-med.htm>

[38] Hartman, Petr. Vliv povrchových úprav na životnost elektrod při odporovém bodovém svařování v automobilovém průmyslu v automobilovém průmyslu [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/84749>. Diplomová práce. České Vysoké učení technické – fakulta strojní.

[39] capacitor discharge welding machine - Capacitor Discharge Welding Machine Manufacturer from Pune. Manufacturer of spot welding machine & Steam Welding Machine by Shashi Enterprises, Pune [online]. Copyright © [cit. 22.11.2020]. Dostupné z: <https://www.shashienterprise.in/capacitor-discharge-welding-machine.html>

[40] connTRONIC – výhody studeného svařovacího procesu KE-CD (KES-CDW) svařování | ROCKWELD-GROUP. ROCKWELD-GROUP | Svařovací technika - specialista na odporové a laserové svařování [online]. Copyright © [cit. 22.11.2020]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/conntronic-vyhody-studeneho-svarovaciho-procesu/>

[41] Patnaik, S. M. (1996). Development of an Automated Capacitor Discharge Welding System. Oregon State University.

[42] CD welding | Kapkon GmbH. Industrie Schweißanlagen von KAPKON GmbH [online]. Copyright © Copyright 2020 KAPKON [cit. 25.11.2020]. Dostupné z: <https://www.kapkon.de/en/cd-welding/>

- [43] Capacitor Discharge Welding - Revolutionary Electromechanical. [online]. Dostupné z: <https://www.taylor-winfield.com/capacitor-discharge-welding/>
- [44] CD-Welding – BOKLI – KE-Schweißmaschinen, Maschinenbau, CNC-Fertigung. BOKLI – KE-Schweißmaschinen, Maschinenbau, CNC-Fertigung – BOKLI – KE-Schweißmaschinen, Maschinenbau, CNC-Fertigung [online]. Dostupné z: <https://bokli-maschinenbau.de/en/mechanical-engineering/ke-welding/>
- [45] SMD Spot Weld :: Welding Automations | Capacitor Discharge Welding Machine | Air Plasma Cutting Machine | Tig Machine | Welding Machine For sale. SMD Spot Weld :: Seam Welding Machine Manufacturers Chennai | Spot Welding Machine Manufacturers Chennai | Seam Projection Welding Machine Chennai | Spot Projection Welding Machine Chennai [online]. Dostupné z: <http://www.smdspotweld.com/cd-projection-welding-machine.html>
- [46] Manufacturer of spot welding machine & Steam Welding Machine by Shashi Enterprises, Pune [online]. Dostupné z: <https://www.shashienterprise.in/capacitor-discharge-welding-machine.html#capacitor-discharge-projection-welding-machine>
- [47] Capacitor Discharge and Stud Welding Machines Artech [online]. Dostupné z: <https://artechwelders.com/projection-welding/#>
- [48] Capacitor Discharge Resistance Welder Manufacturer | Heron. Resistance Welding Machine | Welding Machine Manufacturer | Heron [online]. Dostupné z: <http://heron-spotwelding.com/1-2-1-120kj-capacitor-discharge-resistance-welding-machine.html>
- [49] MODERNÍ MATERIÁLY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU A JEJICH VLASTNOSTI Z HLEDISKA TVÁŘENÍ [online]. Copyright © [cit. 11.12.2020]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79941/F2-BP-2018-Havelka-Jan-Prehled%20modernich%20materialu%20v%20automobilovem%20prumyslu%20a%20jejich%20lastnosti%20z%20hlediska%20tvareni%20Havelka.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [50] Čtyřhranné navařovací matice DIN 928 bez povrchové úpravy | Šrouby online. Šrouby online | velkoobchod - spojovací materiál, kotvení a upevňovací technika [online]. Copyright © Všechna práva vyhrazena [cit. 11.12.2020]. Dostupné z: <https://www.sroubyonline.cz/spojovaci-material/matice/navarovaci-matice/din-928-ocel-8-bez-povrchove-upravy>
- [51] CD machine combi pulse | Kapkon GmbH. Industrie Schweißanlagen von KAPKON GmbH [online]. Copyright © Copyright 2020 KAPKON [cit. 12.12.2020]. Dostupné z: <https://www.kapkon.de/en/cd-machine-combi-pulse/>

[52] Zhou, J., Wang, B.-Y., Huang, M.-D., & Cui, D. (2014). Effect of hot stamping parameters on the mechanical properties and microstructure of cold-rolled 22MnB5 steel strips. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 21(6), 544–555 [cit. 14.12.2020].

[53] WAHLENMEIER - Spot welding machines. WAHLENMEIER SCHWEISSTECHNIK GMBH – Ihr Partner für Widerstandsschweißsysteme [online]. Copyright © [cit. 14.12.2020]. Dostupné z: <https://www.wahlenmeier.de/en/product-overview/welding-machines/spot-welding-machines>

[54] ct standard machines | conntronic . conntronic | welding system solutions [online].

Dostupné z: <https://www.conntronic.info/ct-standard-machines>

[55] ČSN EN ISO 9015-2 (051134) - Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů Dostupné z: http://www.technicke-normy-csn.cz/051134-csn-en-iso-9015-2_4_88575.html

Seznam obrázků

Obrázek 1.: Odpor při bodovém svařování [1]	7
Obrázek 2.: Druhy odporového svařování: a) odporové; b) výstupkové; c) švové; d) stykové [7] ..	8
Obrázek 3.: Svařovací program s konstantní kovací silou [18].....	12
Obrázek 4.: Časový průběh svařování při konstantní přitlační síle elektrod [18]	13
Obrázek 5.: Svařování s kovací silou [18].....	13
Obrázek 6.: Svařování s dvojnásobnou změnou svařovacího proudu [18].....	14
Obrázek 7.: Svařování s dvojnásobnou změnou svařovacího proudu s přerušením [18].....	14
Obrázek 8.: Svařování s předehřívacím proudem [18]	15
Obrázek 9.: Princip výstupkového svařování [19]	16
Obrázek 10.: Tvary výstupků [16][17].....	18
Obrázek 11.: Kruhová matice s výstupky [32]	19
Obrázek 12.: Jazyčková matice s výstupky [32].....	19
Obrázek 13.: Obdélníková matice s výstupky [33]	19
Obrázek 14.: Single tab [34]	19
Obrázek 15.: Druhy výstupků (zleva: prstencový výstupek, kruhově rozmístěné jednotlivé výstupky, jednotlivé výstupky po rozích čtverce, výstupky pro svařování kulatin) [1]	20
Obrázek 16.: Svorník se zapalovacím hrotem [27]	21
Obrázek 17.: Charakteristika proudového průběhu kondenzátorové baterie, středofrekvenčního stroje a 50ti Hz stroje [17]	29
Obrázek 18.: Znázornění svařování s jedním kondenzátorem (přerušovaná křivka) a se 4 kondenzátory (plná křivka) v závislosti proudu na čase [43]	30
Obrázek 19.: Vícekondenzátorový stroj firmy Kapkon [43]	31
Obrázek 20.: Stroj firmy Conntronic řady P [54]	32
Obrázek 21.: Kondenzátorový svařovací stroj typu C formy Bokli [44]	33
Obrázek 22.: Kondenzátorový stoj firmy SMD spot weld [45]	34
Obrázek 23.: Kondenzátorový stroj firmy Shashi enterprises [46].....	35
Obrázek 24.: Kondenzátorové stroje firmy Artech [47].....	35
Obrázek 25.: Svařovací kondenzátorový stroj schopný vyvinout přitlačnou sílu 120 kJ [48]	36
Obrázek 26.: Schéma matice normy DIN 928	38
Obrázek 27.: Kondenzátorový svařovací stroj firmy Kapkon KKC 07 – MCS [51].....	39
Obrázek 28.: středofrekvenční stroj firmy Dalex s označením PMS 11 - 4 [53]	40
Obrázek 29.: Kondenzátorově svařená matice (vlevo) a středofrekvenční svařená matice (vpravo) přibliženo 0,63x.....	41
Obrázek 30.: Vlevo kondenzátorově, vpravo středofrekvenčně svařené matice přibliženo 0,63x42	
Obrázek 31.: Otláčení způsobené pneumatickým pístem středofrekvenčního svařovacího stroje	43
Obrázek 32.: Detail matice svařené kondenzátorovým strojem.....	43
Obrázek 33.: Pohled z boku na řez svařenců (vlevo kondenzátorové, vpravo středofrekvenční svařování).....	44
Obrázek 34.: Kondenzátorově svařená matice přibližena 25x.....	45
Obrázek 35.: Středofrekvenčně svařená matice přibližena 25x.....	46
Obrázek 36.: Měření tvrdosti na kondenzátorově svařeném vzorku.....	47
Obrázek 37.: Měření tvrdosti na středofrekvenčně svařeném vzorku.....	47
Obrázek 38.: Grafické znázornění tvrdostí vzhledem ke vzdálenosti od středu svaru	48

Seznam tabulek

Tabulka 1.: Přehled vlastností a využití materiálů elektrod pro odporové svařování [25][37].....	26
Tabulka 2.: Chemické složení oceli 22MnB5 [49]	38
Tabulka 3.: Porovnání mechanických vlastností oceli 22MnB5 vzhledem k tepelnému zpracování [52]	39
Tabulka 4.: Výška navařené matice	44
Tabulka 5.: Přehled výsledků provedených analýz.....	48