

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

Ústav strojírenské technologie

**Vliv způsobu řízení svařovacího procesu na kvalitu
odporových svarů**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Ondřej Balihar

Studijní obor: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Balihar** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **467388**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací 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:

Vliv způsobu řízení svařovacího procesu na kvalitu odporových svarů

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of welding process control on the quality of resistance welds

Pokyny pro vypracování:

- Popis odporového svařování se zaměřením na automobilový průmysl
- Přehled a popis svařovacích zařízení používaných v automobilovém průmyslu
- Způsoby hodnocení kvality odporových bodových spojů
- Návrh experimentu pro ověření kvality odporových bodových spojů
- Svaření zkušebních vzorků a jejich vyhodnocení, závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN ISO 14373 (052640). Odporové svařování - Postup pro bodové svařování nepovlakovaných a povlakovaných nízkouhlíkových ocelí. Praha: ČNI, 2015.
- [2] ČSN EN ISO 14273 (051112). Odporové svařování - Destruktivní zkoušky svarů - Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [3] ČSN EN ISO 18278-2 (051330). Odporové svařování - Svařitelnost - Část 2: Hodnocení postupů pro svařitelnost při bodovém svařování. Praha: ČNMZ, 2017.
- [4] ASM Handbook: Volume 6 – Welding, Brazing and Soldering, 1993
- [5] Odborné citační databáze Scopus, WoS, Science Direct, Firemní materiály společnosti Škoda Auto a.s.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

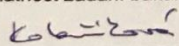
Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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

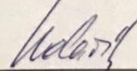
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2019**

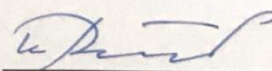
Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**



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



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



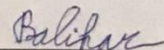
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

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.

29.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Abstrakt

Výsledkem práce je porovnání dvou způsobů řízení odporového svařovacího procesu a vyhodnocení jeho vlivu na kvalitu bodových svarových spojů. Jako základní materiál byla použita za tepla tvářená vysokopevnostní mangan-bórová ocel 22MnB5 s povrchovou vrstvou AlSi, která se v automobilovém průmyslu používá na pevnostní prvky karoserie. Ocelové plechy byly před svařováním upraveny tepelným zpracováním pro simulaci tepelného cyklu během tváření za tepla. Teplota ohřevu byla 920°C a doba výdrže na teplotě byla 7 minut, 11 minut, 14 minut a 5 minut. Pro bodové svařování byl použit odporový lis od firmy Dalex a svařovací zdroj s adaptivním řízením od firmy Elmatech. Pro hodnocení svarových spojů byla použita mechanizovaná stříhová zkouška, měření průměrů svarových čoček a metalografické zkoušky.

Abstract

The result of the work is a comparison two methods control of the resistance welding process and evaluation influence on the quality of spot welded joints. The hot-formed high-strength manganese-boron steel 22MnB5 with an AlSi coating was used as a base material, which is used in the automotive industry for the points of strength elements. The steel sheets were heat treated prior to welding, it simulate the thermal cycle during the hot forming. The heating temperature was 920 ° C and the residence time at the temperature was 7 minutes, 11 minutes, 14 minutes and 5 minutes. For spot welding was used resistance press from Dalex and a power source with adaptive control from Elmatech. For testing of evaluation was used mechanized shear test, diameter measurement of welded lenses and metallographic tests.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Praze dne 1.8.2019

.....

Místo a Datum

.....

Ondřej Balihar

Rád bych poděkoval paní Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D. za její ochotu, odborné vedení a cenné rady při zpracování bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat Janu Voborovi, IWT z firmy ELMA-Tech GMBH za dovezení a zapůjčení robotických kleští, které byly použity při zhotovení této bakalářské práce. Poděkování také patří mým nejbližším za obrovskou podporu a trpělivost.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	6
1. Úvod	7
1.1. Historie svařování.....	7
2. Cíl práce	9
3. Odporové svařování	10
3.1. Bodové svařování	16
4. Materiály v automobilovém průmyslu	18
5. Návrh experimentu	24
5.1. Použitý materiál.....	24
5.2. Popis experimentu.....	25
5.3. Použitá zařízení.....	26
5.3.1. Odporový lis PMS 11-4 (1 000 Hz) od firmy Dalex.....	26
5.3.2. Robotické kleště MIDISpot VISION AV (10 000Hz) od firmy Elmatech.....	27
5.4. Experiment	28
5.5. Použitá metodika zkoušení.....	30
5.5.1. Mechanizovaná zkouška stříhem	31
5.5.2. Metalografická zkouška.....	32
5.5.3. Měření průměru svarových čoček.....	33
6. Výsledky a jejich diskuze	34
7. Závěr	38
Použité zdroje.....	39

Seznam zkratek a symbolů

Q – množství tepla [J]

R – elektrický odpor [Ω]

I – elektrický proud [A]

t – doba průchodu proudu [s]

d_{\min} – minimální průměr [mm]

t – tloušťka plechu [mm]

1. Úvod

Technologie svařování se objevuje již v době bronzové a železné. První pokus o spojování předmětů byl pomocí tepla, jehož zdrojem byl oheň. Postupem času docházelo k rozvoji technik a postupů spojování železných materiálů. Prvním způsobem svařování byla metoda kovářského svařování. Tato metoda využívala teplo (jehož zdrojem byl výše zmíněný oheň) a tlak, který byl vyvíjen na natavený kov pomocí kladiva a kovadliny [1].

1.1. Historie svařování

Současná technologie svařování má počátky v 18. století. Využívala pouze acetylen, který nesl název Ethyn a byl vyvinut Edmundem Davym (Obr. 1.1) v roce 1836. Svařování elektrickým obloukem čekalo na sestavení prvního generátoru elektřiny [2].



Obr. 1.1: Edmund Davy [3]

Prvního využití pro svařování se elektrický oblouk dočkal v roce 1881. Nikolaj Nikolajevič Benardos (Obr. 1.2) se svým kolegou Stanisławem Olszewskim (Obr. 1.2) získali britský patent na svařování elektrickým obloukem v roce 1885, americký patent v roce 1887. Zpočátku se jednalo o svařování uhlíkovými elektrodami. Tento postup byl rozšířen koncem 19. století [1] [4].

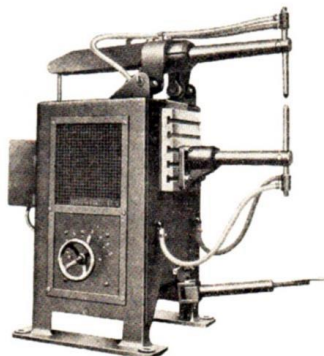


Obr. 1.2: Zleva: Nikolaj Benardos (1842), Stanisław Olszewski (1852) [5] [6]

Postupně docházelo k rozvoji svařování několika směry. Rozdíly těchto směrů byly hlavně v použitém přídavném materiálu, v používání ochranných atmosfér a v metodách využití elektrického oblouku [7].

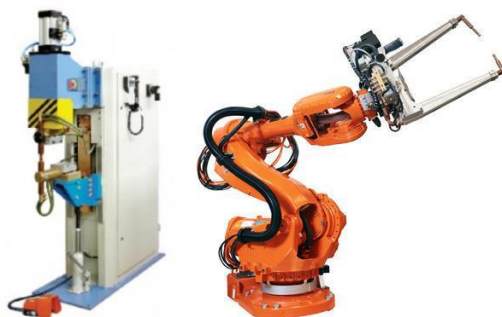
Jedním z nejvýznamnějších směrů svařování pro automobilový průmysl je bodové svařování, které poprvé uskutečnil J. P. Joule v padesátých letech 19. století. Jako první zkoušel svařovat dráty pomocí elektrického proudu. K rozšíření svařování elektrickým odporem došlo v roce 1903, po objevu odporového svařování natupo odtavením [4] [7].

Z důvodu nedostatečně silných zdrojů nastal nejprve rozvoj měkkého odporového svařování. Základní odporové svařovací zdroje (Obr. 1.4) se konstrukčně od historických (Obr. 1.3) příliš neliší. Dochází hlavně ke změnám v elektronice a ve způsobu řízení procesu, případně k různým stupňům automatizace [2] [4].



Obr. 1.3: Historický svařovací zdroj [4]

Odporové svařování nese označení 2 podle ČSN EN ISO 4063. Nejčastější použití je pro spojování dvou plechů bodovým svarem nebo spojování drátů do mříží. Označení 21 dle ČSN EN ISO 4063. Svařované materiály jsou k sobě přitisknuty silou, která působí přes dvě elektrody. Materiál elektrod je nejčastěji měď nebo její slitiny. Měď je dobrý vodič s malým odporem. Svařované ocelové plechy jsou naopak horšími vodiči, mají tedy při průchodu proudu větší odpor. Toho se při odporovém svařování využívá. V materiálu se špatnou vodivostí dochází k vývinu vysokých teplot a k ohřátí styčných ploch plechů nad teplotu tavení, které se následně vlivem tlaku spojí a při chladnutí vytvoří svar. Odporové bodové svary mají vysokou pevnost ve smyku. Dalším materiálem elektrod bývají také slitiny mědi s kobaltem a kadmíem, stříbrem a kadmíem, niklem a křemíkem [1] [2] [4] [7].



Obr. 1.4: Moderní odporový svařovací zdroj [4] [8]

Metoda svařování nachází využití ve všech malosériových i velkosériových oblastech výroby. Výroba se liší pouze úrovní automatizace, kde jde docílit plně automatizované linky. Hlavní využití se nachází v automobilovém průmyslu, kde je na každé karosérii vytvořeno tisíce bodových odporových svarů [4].

2. Cíl práce

Hlavním cílem bakalářské práce je porovnat kvalitu svarových spojů z vysokopevné oceli 22MnB5 s povlakem AISi v závislosti na typu svařovacího zdroje, způsobu řízení svařovacího procesu a fázovém složení povlaku AISi. Byly použity dva svařovací zdroje, první s programovatelným řídicím systémem (PMS 11-4) a druhý s měřením přechodového odporu (MIDIspot VISION AV).

Dílčí cíle práce jsou následující:

- Rešerše s přehledem současného stavu problematiky
- Navržení experimentu
- Svaření vzorků na dvou zdrojích s různým způsobem řízení procesu
- Mechanické a metalografické zkoušky svarů
- Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze

Pro dosažení dílčích cílů byly použity následující mechanické zkoušky:

- Metalografická zkouška
- Mechanizovaná stříhová zkouška
- Měření průměru svarových čoček

3. Odporové svařování

Metoda odporového svařování je velmi populární způsob tvorby svarových spojů. Jedná se o metodu svařování tlakem a teplem, které vznikají při průchodu proudu po určitou dobu svařovaným materiálem. Používá se ve velkém množství různých průmyslových odvětví, např. v automobilovém průmyslu při výrobě karoserií, letectví, stavebnictví, výrobě bílého zboží atd. [9] [10] [11]

Hlavními parametry svařování jsou svařovací proud, přitlačná síla a svařovací čas. Svařovací proudy se pohybují od 10^3 A, svařovací čas od 0,04 do 2 s, přitlačná síla je v rozmezí 500 až 10 000 N. Velikost nastavovaných parametrů se odvozuje od tloušťky a chemického složení svařovaného materiálu. Vychází se z norem, které stanovují průměr svarové čočky a přijatelné množství rozstříků. Nastavené parametry se liší také podle použité metody. Bodové odporové svary se aplikují nejčastěji na přeplátované spoje dvou plechů [9] [11] [12].

Tloušťky plechů svařitelné metodou odporového svařování se pohybují v rozmezí 0,5-5 mm. Metoda se používá pro: nízkouhlíkové oceli, vysokopevnostní oceli, měď, dále slitiny mědi, titanu, hliníku a hořčík. [9] [11]

Základní rozdělení svařovacích režimů podle svařovacích parametrů [12]:

- Tvrdý režim

Svařování v tvrdém režimu je provedeno vysokým proudem působícím krátký čas. Tento režim způsobuje minimální napětí a deformaci svařovaného materiálu, zároveň snižuje spotřebu elektrické energie a opotřebením elektrod. Díky krátkým strojním časům dochází k rychlému chladnutí svaru a k tvorbě jemnozrnné struktury kovu. (Tabulka 3.1)

Hlavním nedostatkem tvrdého režimu je potřeba strojů, které mají mohutné konstrukce a obrovské příkony.

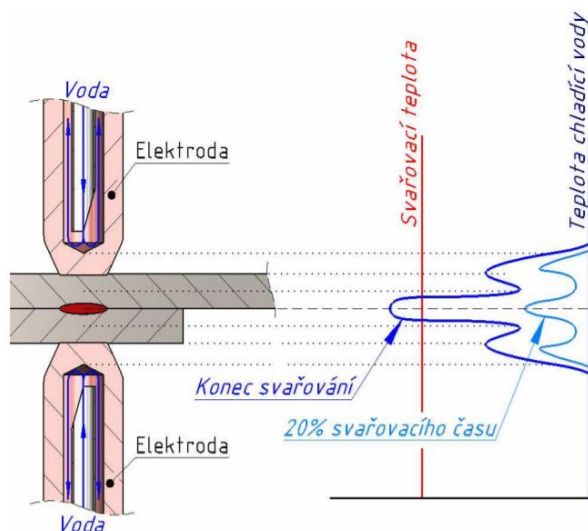
- Měkký režim

Měkký režim nepotřebuje velký příkon, a proto není potřeba velikých strojů. Lze použít menší průřezy vodičů. Režim má menší citlivost na odchylky svařitelnosti materiálů.

Svařování v měkkém režimu je charakteristické nižším proudem působícím po delší čas. Dochází k deformacím a napětí ve svarových spojích, které jsou výrazně větší než při použití tvrdého režimu. Zároveň dochází ke vzniku hrubozrnné struktury, která se vyznačuje nižší pevností. Kromě výše zmíněných nedostatků dochází také k většímu opotřebením elektrod a je tedy třeba častější frézování svařovací čepičky. (Tabulka 3.1)

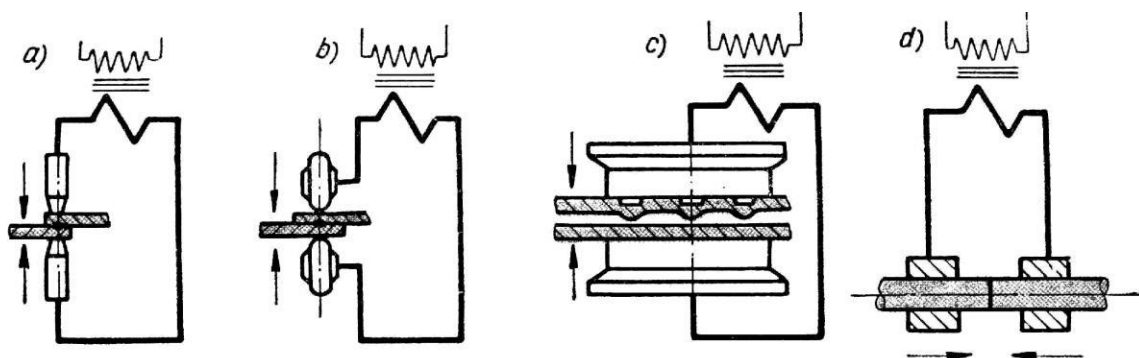
	Měkký režim	Tvrdý režim
Svařovací tlak - p Svařovací síla - F	Do $50 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ Do 1000 N	$\sim 1000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ $\sim 2000 \text{ N}$
Proudová hustota Svařovací proud - I	Do $250 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ Do 5000 A	$\sim 500 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ $\sim 10000 \text{ A}$
Svařovací čas Čas v periodách	Nad 0,5 s Nad 25 per	$\sim 0,16 \text{ s}$ $\sim 8 \text{ per}$

Tabulka 3.1: Svařovací parametry tvrdého a měkkého režimu [12]



Obr. 3.1: Princip svařování elektrickým odporem [4]

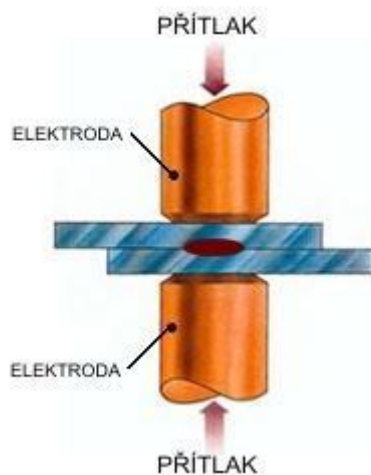
Rozdělení odporového svařování podle metody:



Obr. 3.2: Rozdělení metod odporového svařování: a) bodové odporové svařování b) švové odporové svařování c) výstupkové odporové svařování d) stykové odporové svařování [12]

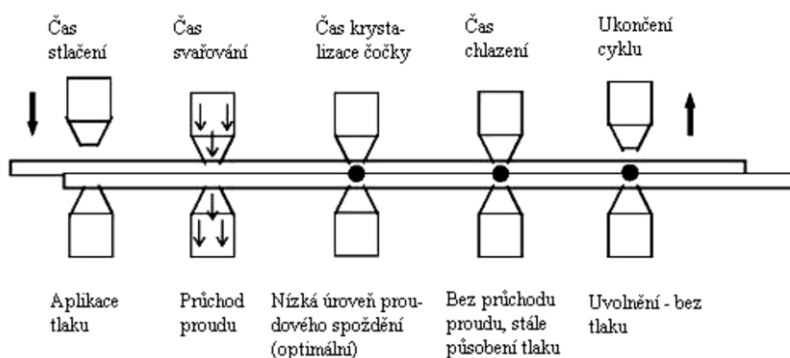
Bodové odporové svařování – metoda 21 podle ČSN EN ISO 4063 [4] [8] [11] [12] [13] [14] [15] [16]

Bodové odporové svařování (Obr. 3.3) je vzhledem k možnosti jednoduché automatizace jednou ze způsobů zvýšení produktivity, čímž lze snížit i výrobní náklady (mzdy, spotřeba materiálu). Na rozdíl od dalších metod svařování se při odporovém bodovém svařování vytváří spoje v krátkých časových intervalech. Energie se využívá k ohřátí svarového místa a tepelně ovlivněná oblast je nepatrná. Díky tomu je tato metoda ekonomická a lze snížit režijní náklady.



Obr. 3.3: Schéma bodového odporového svařování [14]

Metoda bodového odporového svařování patří do oblasti tvorby svarových spojů, které se nevytváří za pomoci elektrického oblouku. Vzniká vlivem elektrického odporu v místě styku dvou svařovaných materiálů. (Obr. 3.3 a Obr. 3.4) Tomuto odporu se říká přechodový odpor. Průchodem vysokého proudu dochází ke vzniku Jouleova tepla a tedy k ohřevu materiálu na teplotu tavení svařovaného materiálu. Materiál je nataven a po následném stlačení elektrodami svařen. Stroje na svařování musí obsahovat mimo výkonného zdroje proudu ještě možnost vyvinout vysoký tlak na místo svaru.



Obr. 3.4: Princip bodového svařování [12]

Teplo vznikající vlivem přechodového odporu v místě styku dvou plechů je vyjádřeno Joule-Lenzovým zákonem [12]:

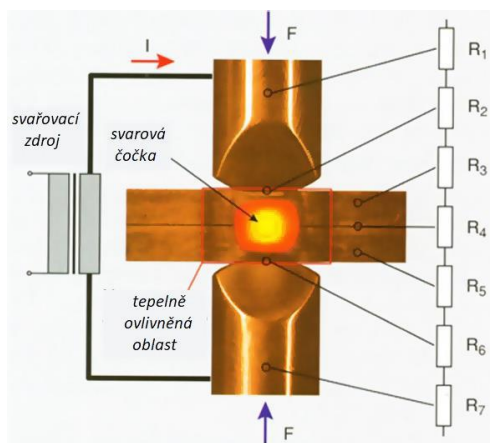
$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (1)$$

kde: Q – množství tepla [J]

R – elektrický odpor [Ω] (složen z jednotlivých odporů)

I – elektrický proud [A]

t – doba průchodu proudu [s]

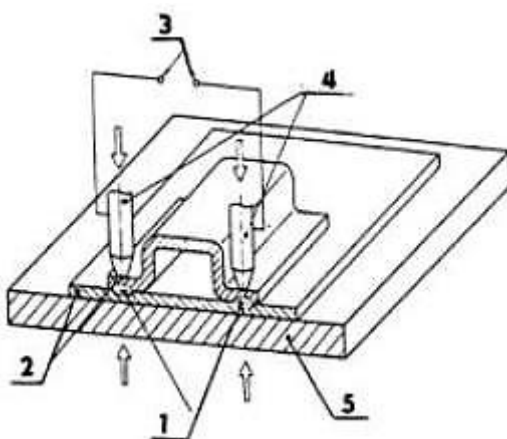


Obr. 3.5: Rozložení odporů při odporovém svařování [4]

Odpor je daný součtem všech odporů, které se při tvorbě svaru vyskytují. Jedná se o odpory přechodové (R_2 a R_6) mezi elektrodou a materiálem, které jsou nežádoucí, odpory elektrod (R_1 a R_7), vlastní měrné odpory svařovaných materiálů (R_3 a R_5), a přechodový odpor mezi materiály (R_4), který je daný nerovnostmi povrchu, vrstvou oxidů a přítlačnou silou. Přechodový odpor mezi dvěma spojovanými materiály je největší, a proto dochází k největší tvorbě tepla právě mezi spojovanými materiály. Odpor mezi elektrodou a materiálem je značně snížen hlavně kvůli intenzivnímu chlazení elektrody vodou, proto ho zanedbáváme. (Obr. 3.5)

Spoj při bodovém svařování tvoří svarové čičky mezi přeplátovanými plechy. Elektrody lze umístit dvěma způsoby:

- Přímé bodové svařování (Obr. 3.3.):
- Dochází k tvorbě svarů v místě dotyku elektrod s materiálem. Elektrody leží proti sobě.
- Nepřímé bodové svařování (Obr. 3.6.):
- Elektrody jsou umístěny z jedné strany svařovaných materiálů na různých místech a polohách.



Obr. 3.6: Nepřímé bodové svařování [12]

1 – bodové svary, 2 – svařovaný materiál, 3 – zdroj proudu, 4 – elektrody, 5 – vodivá deska

Stejně jako v ostatních metodách svařování se i při bodovém svařování mohou vyskytovat vady, které se klasifikují dle normy ČSN EN ISO 6520-2 Klasifikace geometrických vad kovových materiálů-Část 2: Tlakové svařování (Obr. 3.7).



Obr. 3.7: Vady bodových spojů: zleva porušení v dělicí rovině vlivem vnitřních vad, kvalitní svar, nadměrný rozstřík vlivem špatných nastavených parametrů

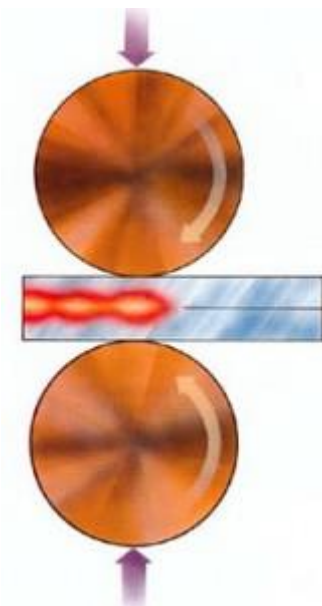
Bodové svařování je doposud nejpoužívanější v automobilovém průmyslu (auta, autobusy, vlaky, tramvaje, letectví). Používá se ale i v jiných oblastech výroby, kde nejsou veliké nároky na těsnost spojů. Nejčastěji se spojují plechy o tloušťkách 2,5 - 3mm, svařovat lze ale i větší tloušťky. (Obr.3.8)



Obr. 3.8: Bodový odporový svařovací stroj [15]

Švové svařování [11] [14] [17]

Švové svařování (Obr. 3.9) je průběžný proces, při kterém se využívá otáčející se elektrody, která jede po překrývajících se materiálech. Výhodou je dobrá těsnost svařených dílů. Využívá se hlavně při výrobě radiátorů, plechových sil a v dalších odvětvích průmyslu, kde je třeba dosáhnout naprosté nepropustnosti. Plechy o tloušťce 1 mm lze svařovat střídavým proudem a to např. 100 proudovými impulsy za 1 s (pak vzniká 100 svarů těsně navazujících na sebe).



Obr. 3.9: Schéma švového svařování [17]

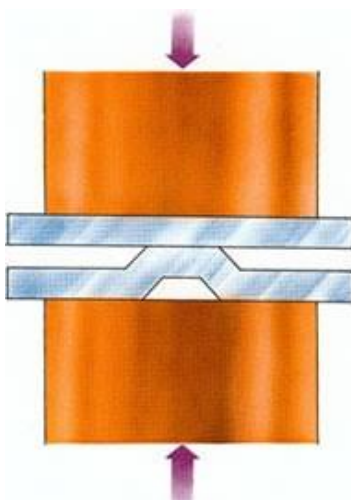
Spoje zhotovené pomocí švového svařování mohou být tupé nebo přeplátované.

Švové svařování lze provádět také pomocí:

- Podložky (svařování na podložce) – jedna elektroda je nahrazena podložkou nebo trnem
- Pohyblivé podložky (svařování s pohyblivou podložkou) – podložka se posouvá a elektroda koná pouze otočný pohyb
- Putujícího kotouče (svařování s putujícím kotoučem) – upnutý materiál má z jedné strany pevnou podložku a z druhé strany otočnou kotoučovou elektrodu

Výstupkové svařování [11] [18]

U výstupkového svařování (Obr. 3.10) jsou na místě svarů předem připravené výstupky. V případě, že je elektroda pokryje, lze svařovat na více místech najednou. Nejčastěji se používají u zdvihátek ventilu, tyčových drátů, spojů u trubek T a křížových atd.



Obr. 3.10: Schéma výstupkového svařování [18]

Stykové odporové svařování [2] [11] [12] [19]

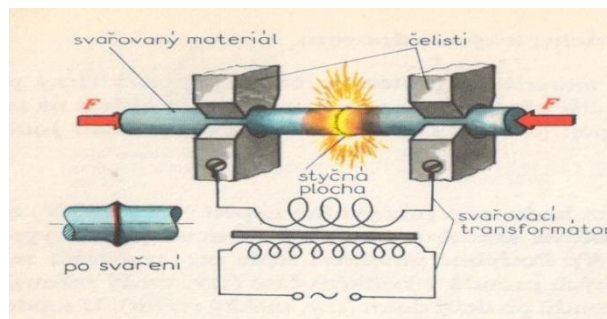
U stykového odporového svařování (Obr. 3.11) jsou svařované materiály upnuty do stroje a následně je na ně vyvinut tlak pomocí upínacího přípravku. Procházející proud se mění na teplo, které je potřebné k natavení spojovaných částí. Ke spojení dochází v celé styčné ploše za již zmíněného tlaku a tepla. Před samotným svařováním je potřeba důkladně očistit stykové plochy od okují tavidlem. Tato metoda se často uplatňuje při výrobě řetězů.



Obr. 3.11: Elektrické odporové svařování řetězů [19]

Způsoby stykového svařování:

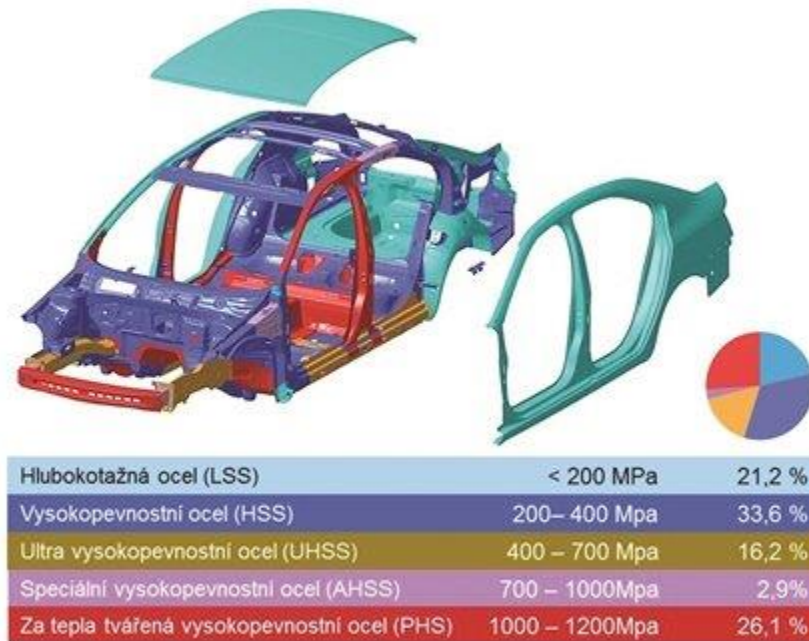
- S odtavením – proud se zapíná před kontaktem stykových ploch, následně dochází ke stlačení a vytvoření svaru.
- Bez odtavení – proud se zapíná až po kontaktu a stlačení stykových ploch. (Obr. 3.12)



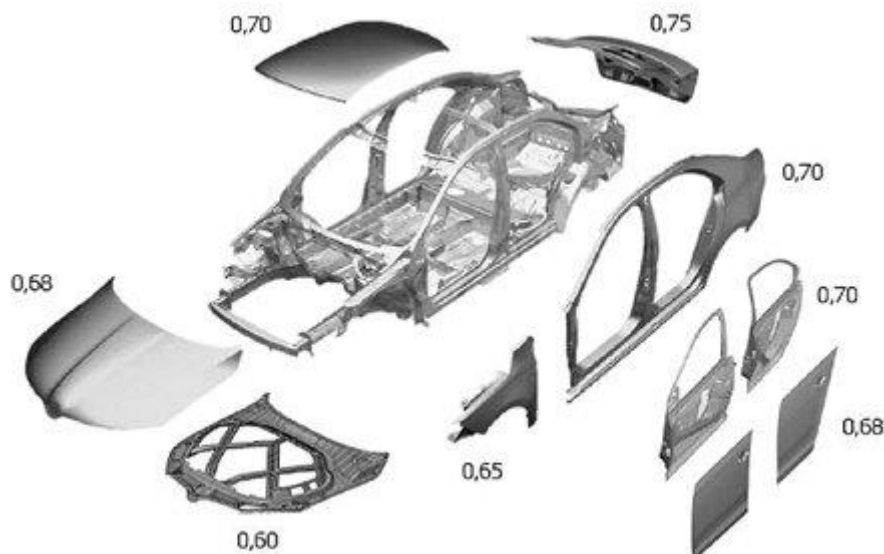
Obr. 3.12: Podstata stykového svařování bez odtavení [19]

3.1. Bodové svařování

Bodové svařování má největší zastoupení v automobilovém průmyslu. Ukázalo se, že tento typ svařování dílů je nejrychlejší. V automobilovém průmyslu jsou všechny svařovací linky automatizované a každé vozidlo obsahuje cca 4 až 5,5 tisíc bodových svarů (počty se liší dle velikosti a typu vozidla). Využívají se např. hlubokotažné a vysokopevnostní oceli (Obr. 3.1.1), které díky vysoké pevnosti mohou být tenčí a mohou tedy z hlediska hmotnosti konkurovat karosériím z hliníku. Karosérie se vyrábí z různých tloušťek plechů různých pevností (Obr. 3.1.2) kvůli snížení hmotnosti vozidel a legislativě EU, která vede ke snižování emisí a spotřebě paliva. Bezpečnostní prvky karosérie vozů některých značek jsou vyráběny z martenzitické vysokopevnostní oceli tvářené za tepla [20] [21] [22].



Obr. 3.1.1: Materiálový koncept karoserie Škoda Octavia [9]



Obr. 3.1.2: Tloušťky plechů [mm] – Škoda Octavia III [9]

Zastoupení jednotlivých svařovacích operací u některých modelů automobilů Škoda Auto. (Tabulka 3.1.1)

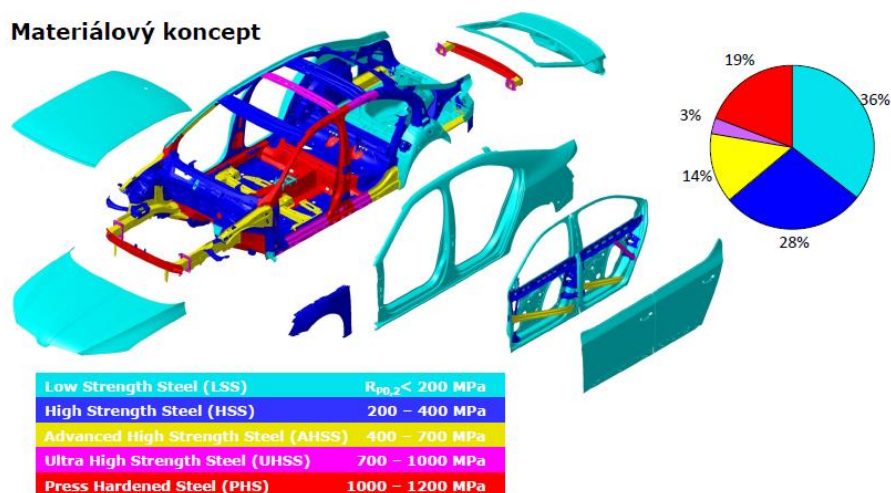
Metoda svařování	Množství	Octavia	Fabia	Superb	Octavia II	Roomster
Bodové svary	ks	4 400	4 500	6 201	5 000	5 217
MIG pájení	m	-	4,0	7,4	2,5	2,0
MAG svařování	m	5,5	1,0	1,2	2,5	7,5
Přivařování svorníku	ks	190	160	214	200	161
Výstupkové svařování	ks	25	46	147	31	34
Laserové pájení	m	-	1,0	1,03	1,6	1,2
Laserové svařování	m	-	-	3,06	0,5	-

Tabulka 3.1.1: Množství svarů na modelech automobilů Škoda [9]

4. Materiály v automobilovém průmyslu

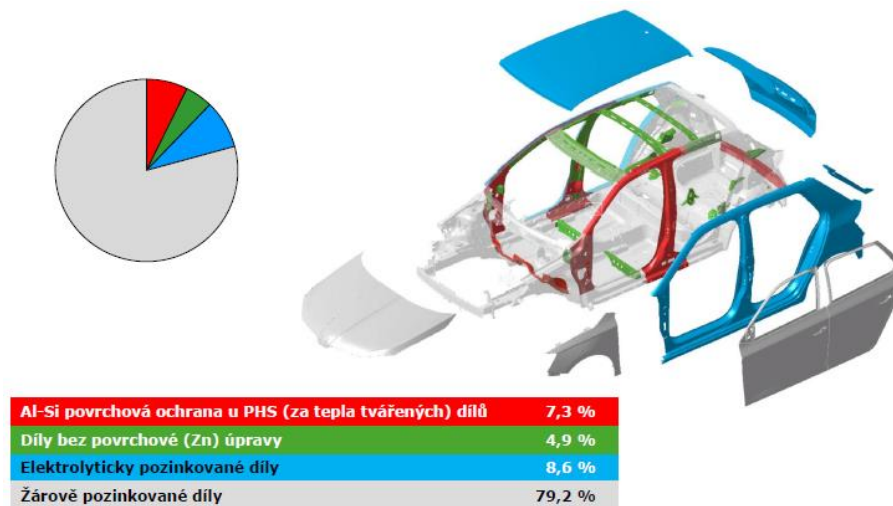
V automobilovém průmyslu dochází k velkému rozvoji a uplatnění rozličných materiálů a jejich kombinacím za účelem snížení hmotnosti a zvýšení bezpečnosti. Využití kovových materiálů je hlavně na nosné konstrukce a různé ochranné prvky jako jsou sloupky, výztuhy a podlaha (Obr. 4.1.). Zastoupení použitých materiálů se liší dle výrobce automobilů a konstrukce vozu. Kromě ocelí se začíná čím dál častěji experimentovat s uhlíkovými vlákny nebo kombinací uhlíkových vláken s konopnými. S používáním lehčích materiálů, které mají zároveň lepší mechanické vlastnosti, výrazně roste cena daného materiálu, a tedy cena celkového výrobku [4] [9] [12].

Samonosné karosérie se sestavují nejčastěji třemi způsoby. Základní a zároveň nejjednodušší je vkládání výztuh do vnějšího rámu. Dalším možným způsobem je složení všech výztuh do vnitřního rámu a následné vložení rámu do vnějšího. Poslední metodou je svaření vnitřního rámu k podlaze a příčnicům a následné přidání vnějšího rámu. Tato metoda je vhodná na přímé bodové svařování, kdy nedochází k ovlivňování vnějším rámem [2] [3] [19].



Obr. 4.1: karoserie modelu Škoda Superb III [22]

Potřebných povrchových vlastností materiálů je dosahováno pomocí povrchových úprav. Pro některé díly je třeba, aby odolávaly vodě, jiné musí odolávat různým chemikáliím a další díly povrchovou úpravu nemají z důvodu odizolování a zamezení přístupu vnějším vlivům, kromě atmosféry (Obr. 4.2) [4] [9] [12].



Obr. 4.2: Ochrana plechových dílů Fabia III [22]

Oceli pro automobilový průmysl:

Nízkopevnostní oceli (LSS) – hlubokotažené s řízenou mezí kluzu

- IF (Interstitial Free) oceli

U nízkopevnostních ocelí nejsou přítomny žádné intersticiální atomy, které by při krystalizaci způsobily zpevnění. Mají extrémně vysokou tažnost a používají se pro tvarově komplikované hlubokotažené díly karoserie. Obsahují feritickou matici a jsou mikrolegovány Ti nebo Nb. Mikrolegování má funkci karbonitridačních stabilizátorů, což má za následek snížení obsahu C a N na nízké hodnoty (0,005 %). Lze je svařovat tavným i tlakovým svařováním. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 4.1 [4].

- Mild oceli

Běžné nízkouhlíkové oceli s nižší pevností, které mají feritickou strukturu, jsou stabilizovány mikrolegujícími prvky jako je Ti nebo Nb. Hlavními zástupci těchto ocelí jsou CS (Commercial Steel) a DS (Drawing Steel), FS (Forming Steel), apod. Dříve byly tyto oceli první volbou pro karosářské plechy. Důvodem, proč se dnes již téměř nepoužívají, je jejich velká hmotnost. Mechanické vlastnosti uvádí Tabulka 4.1 [4].

Vysokopevnostní oceli (HSS) – nejpoužívanější oceli s vysokou pevností

- IF-HS (Interstitial Free – High Strength) oceli

Jedná se o IF oceli, které jsou zpevněny přísadou Mn, Si a P v tuhém roztoku feritu, strukturu mají feritickou. Mají nízký poměr mezi $R_m/R_{p0,2}$. Vysoký exponent deformačního zpevnění zajišťuje vynikající hlubokotažnost, proto jsou vhodné zejména pro složité součásti, které vyžadují vysokou pevnost. Lze je svařovat tavným i tlakovým svařováním. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 4.1 [9].

- BH (Bake Hardenable) oceli

Jedná se o nízkouhlíkové oceli s feritickou strukturou. Zpevnění se dosahuje kontrolovaným žiháním. Tento proces je založen na nízkoteplotním staticko-napěťovém umělém stárnutí. Proces BH stabilizuje dislokace intersticiálními atomy C a N. Musí být velký počet intersticiálních atomů C rozpuštěných v tuhém roztoku na konci výrobního procesu. Řízené stárnutí probíhá při teplotách okolo 170 °C po dobu 20 min v rámci procesu vypalování kataforetického laku. Ke zvyšování meze kluzu dochází vlivem vzniku Cottrelových atmosfér na dislokacích a následnou precipitací karbidů (nárůst R_{e0} o 60 – 80 N·mm⁻²) [9].

Použití ocelí je na panelové díly, díly vnějších bočních dveří, střechy, víka kufrů, nárazníky nebo kapoty. Tyto díly nemají významné zpevnění materiálu během tváření, a proto BH efekt zvyšuje tuhost a stabilitu dostatečně. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 4.1 [9].

- HSLA (High Strength Low Alloy) oceli

HSLA oceli mají velice nízký obsah uhlíku a vysokou plasticitu. Výroba probíhá válcováním za studena a za tepla. Oceli jsou zpevněny mikrolegujícími prvky (V, Ti, Nb) tvořící mikrolegující nitridy, karbidy, karbonitridy, které přispívají ke zjemnění zrna, jemné precipitaci karbidů a zpevnění matrice. Zjemnění zrna je výhodné pro dobrou svařitelnost, zvýšení pevnosti a snížení tranzitní teploty mezi křehkým a tvárným lomem [4].

HSLA oceli byly původně určeny pro výrobu plynovodů a ropovodů, později se prosadily v automobilovém průmyslu. Oceli jsou vhodné jako konstrukční a vyztužené díly dveří, nárazníků, na nosné části karoserie a na některé dynamicky namáhané části podvozku. Chemické složení a mechanické vlastnosti udává Tabulka 4.1 [4].

Pokročilé vysokopevnostní oceli (AHSS – Advance High Strength Steel)

Jsou to oceli pevnější než HSS. Využívají se na bezpečnostní a nosné prvky v automobilech.

- DP (Dual Phase) oceli

Dvoufázové oceli kombinují skvělou pevnost a tažnost. Mají dispergovanou martenzitickou strukturu ve formě ostrůvku (10 – 30 %), vznikajícího transformací zbytkového stabilizovaného austenitu, který se nachází v měkké feritické matici (70 – 90 %), která zajišťuje plasticitu. Tyto nízkouhlíkové oceli mají schopnost vysokého mechanického zpevnění, které vede ke zvýšení meze kluzu po tváření. Podílející se prvky jsou Mn, Cr, Mo, V a Ni. Mez kluzu se také zvyšuje díky efektu BH při vytvrzování laku (až o 80 MPa) jako u BH ocelí. Složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 4.1 [4].

Vzhledem k jejich vysoké schopnosti absorbovat energii a vysokým hodnotám únavové pevnosti jsou dvoufázové oceli válcované za studena nebo za tepla vhodné pro automobilové konstrukční a bezpečnostní díly (podélné nosníky, příčné nosníky, různé výtzuhy). Dosahují meze pevnosti 500 – 1200 MPa. DP oceli lze snadno svařovat při použití obvyklých svařovacích procesů, pokud se upraví svařovací parametry, kvůli většímu procentu legur. Zejména při svařování laserem svary dosahují vysoké pevnosti [4].

- CP (Complex Phase) oceli

CP oceli patří mezi vícefázové oceli. Mají malé množství martenzitu, občas zbytkového austenitu ve feriticko-bainitické matici. Pomalá rekrystalizace, nebo precipitace mikrolegujících prvků Ti nebo Nb se používá na vysoké zjemnění zrna. Vysoká mez kluzu při stejné mezi pevnosti v tahu je výhodou. Využívají se na výrobu jednoduchých dílů v automobilech, kde není třeba veliké deformace (lišty u dveří, příruby sedadel). CP oceli jsou dobře odporově a laserově svařitelné. Složení a vlastnosti udává Tabulka 4.1 [4].

- TRIP (Transformation Induced Plasticity) oceli

Multifázové oceli s transformačně indukovanou plasticitou kombinují vynikající pevnost a tažnost. Jejich mikrostruktura se skládá z ostrůvků zbytkového austenitu (5–15 %) a bainitu (25–40 %) rozptýlených v měkké feritické matici (50–60 %), popřípadě se u některých typů ocelí vyskytuje martenzit (v jednotkách %). Při plastické deformaci se austenit transformuje na martenzit (TRIP efekt). Oceli mají vyšší obsah C než např. DP oceli, pro stabilizaci netransformovaného zbytkového austenitu. Dále mají vyšší obsah Si, Al, Mn pro urychlení transformace feritu na bainit a pro zabránění vzniku karbidů v oblasti bainitu. V důsledku vysoké absorpční energie a únavové pevnosti jsou oceli vhodné pro automobilové konstrukční a bezpečnostní díly (příčné a podélné nosníky, výztuhy pro B sloupky a nárazníky). Tyto oceli jsou dobře svařovatelné bodovým odporovým svařováním za předpokladu správných parametrů. Je třeba upravit elektrodovou sílu a svařovací čas, aby došlo k tvorbě kvalitního svaru z důvodu vyššího uhlíkového ekvivalentu (cca 0,5). Vhodné je svařování metodou MAG, kde není potřeba změn za účelem zabránění vzniku trhlin za studena. Také se dá využít laserové svařování. Složení a vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 4.1 [9].

- TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli

Vysoký obsah Mn (17–24 %), udržující C v tuhém roztoku austenitu, dále dolegovány Al (potlačení přeměny austenitu na martenzit) a Si (zlepšení pevnosti tuhého roztoku). Tyto legury tvoří plně austenitickou a dávají oceli extrémní tažnost při velmi vysoké pevnosti (lepší tvařitelnost než u TRIP ocelí s nízkým obsahem Mn). Velmi dobré mechanické vlastnosti, to je dělá perspektivními v automobilovém průmyslu. Výhodou je dosahování vysoké pevnosti a tvařitelnosti, velice dobré odolnosti proti nárazu a snižování hmotnosti vozidel. Použití v místech deformačních zón karosérie. Obtížná svařitelnost, hlavně metodou TIG. Dána vysokým obsahem legur (Mn) a dvojčatěním. Svarové spoje náchylné na vznik trhlin za tepla v důsledku austenitického tuhnutí (veliká roztažnost objemu při fázi austenitu), která při tuhnutí (ochlazení) způsobuje veliký pokles objemu. Lepších svarů se dosahuje při laserovém svařování, kde oproti metodě TIG nedochází k tvorbě trhlin za tepla, hlavně díky menším tepelným příkonům. U metody TIG je další problém a tím je interkrystalická koroze. Složení a vlastnosti uvedeny v Tabulka 4.1 [9].

- MS (Martensitic Steel) oceli

Mikrostruktura převážně martenzitická s malým množstvím feritu, bainitu. Transformace austenitu při válcování za tepla a následném zakalení, následuje žíhání a dále ještě jedno kalení. Martenzitická struktura se dá získat tepelným zpracováním po tváření. V rámci skupiny vícefázových ocelí vykazují MS oceli nejvyšší úroveň meze pevnosti v tahu (až do 1 700 MPa). Aby se zvýšila tažnost, tak jsou martenzitické oceli po zakalení popuštěny a poskytují při extrémně vysokých pevnostech velmi dobrou tvárnost. Se zvyšujícím se množstvím C se martenzitickým ocelím zlepšuje kalitelnost a dochází ke zpevňování martenzitu. Na zvýšení kalitelnosti se dále používají prvky Mn, Si, Cr, Mo, B, V a Ni. Vysoká mez pevnosti v tahu a další vynikající mechanické vlastnosti dělají tuto ocel vhodnou pro tvorbu bezpečnostních prvků, které potřebují vysokou odolnost proti nárazům. Jsou to hlavně části předního a zadního nárazníku, boční prahové výztuže a střešní příčník. Dobrá odporová a laserová svařitelnost. Složení a vlastnosti v Tabulka 4.1 [4].

Tabulka 4.1: Chemické složení a mechanické vlastnosti ocelí [4]

Prvek	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Al [%]	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]	n ¹ [-]
IF	0,001 – 0,01	-	-	-	165	120-290	47	≥ 0,20
DS	0,02 – 0,15	-	-	-	172	310	46	0,21
IF-HS	max. 0,01	max. 0,25	max. 1,0	-	180-230	340-400	≥ 35	≥ 0,19
BH	max. 0,04	max. 0,5	max. 0,7	-	180-230	300-360	≥ 34	≥ 17
HSLA	max. 0,08	max. 0,04	max. 0,7	-	340-400	420-490	≥ 23	-
DP	max. 0,14	max. 0,4	max. 2,1	-	330-410	600-700	≥ 21	≥ 0,14
CP	max. 0,1	max. 0,25	max. 2,0	-	680-830	≥ 780	≥ 10	-
TRIP	max. 0,2	max. 2,0	max. 2,0	-	410-510	690-800	≥ 25	≥ 0,19
TWIP	0,54	0,12	22,9	0,04	480	1140	57,3	-
MS	max. 0,13	max. 0,3	max. 2,4	-	≥ 950	1200-1400	≥ 3	-
¹ Exponent deformačního zpevnění								

- Manganborové oceli

Tyto za tepla tvářené oceli (HF – Hot Formed nebo PHS – Press Hardened Steel) jsou určeny především na konstrukční nosné (příčné a podélné nosníky, uchycení nárazníku, součásti podvozku aj.) a bezpečnostní části karoserie (A-sloupek, B-sloupek, boční výztuhy dveří aj.), které vyžadují vysokou odolnost proti nárazu. Velmi vysoká mechanická pevnost po tváření umožňuje dosáhnout snížení hmotnosti daného dílu o 30 % až 50 % oproti konvenčním ocelím tvářeným za studena. Po tváření mají tyto oceli $R_{p0,2} = 1\ 000 - 1\ 100$ MPa, $R_m = 1\ 400 - 1\ 600$ MPa, při tažnosti A_{80} pod 6 %. Oceli jsou vhodné pro vysokoteplotní termomechanické zpracování (TMZ) při lisování. Tuto vlastnost získávají díky malému množství boru. Díky přidání boru se oceli označují jako borové nebo manganborové. Ve stavu dodání má ocel feriticko-perlitickou strukturu, která zajišťuje nižší hodnoty meze pevnosti v tahu a meze kluzu a po ohřevu a následném tváření za tepla dojde ke kalení při lisování. Výsledná struktura je martenzitická, zajistí výrazný nárůst hodnot meze pevnosti v tahu a meze kluzu. Ocel je nejčastěji dodávána s povrchovou vrstvou na bázi Al-Si, která ji chrání v průběhu ohřevu před vysokoteplotní oxidací. Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 udává Tabulka 4.2 a chemické složení Tabulka 4.3 [4] [21] [23] [24] [25] [26] [27].

Tabulka 4.2: Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 [4]

Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 v dodaném stavu (feriticko-perlitická struktura)		
$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
320 - 550	500 - 700	≥ 10
Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 po tepelném zpracování (martenzitická struktura)		
$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
1100	1500	≥ 6

Tabulka 4.3: Chemické složení 22MnB5 [4]

Prvek	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	P [%]	S [%]	Ti [%]	Al [%]	B [%]
min	0,19	0,0	1,1	0,15	0,0	0,0	0,0	0,02	0,02	0,0008
max	0,25	0,40	1,4	0,25	0,35	0,025	0,015	0,05	0,06	0,005

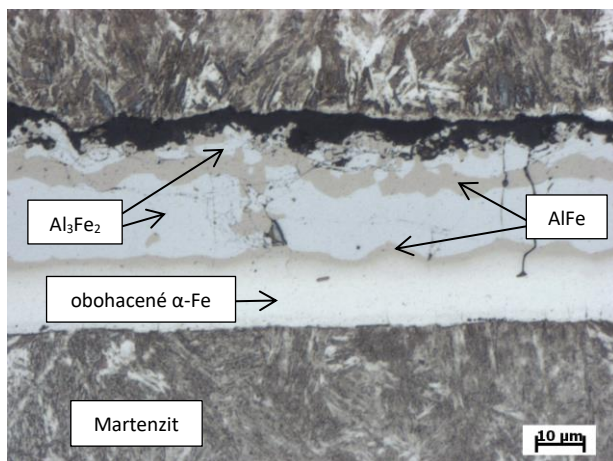
5. Návrh experimentu

Jako základní materiál byla zvolena vysokopevnostní manganborová ocel 22MnB5 s povlakem na bázi Al-Si. Tato ocel je vhodná pro tváření za tepla. Plechy byly zpracovány čtyřmi různými tepelnými režimy pro simulaci ohřevu v průběžné peci před kalením v lisovacím nástroji. Všechny vzorky byly bodově odporově svařeny stejnými svařovacími parametry na dvou svařovacích zařízeních se dvěma odlišnými způsoby řízení svařovacího procesu. Svary pak byly podrobeny destruktivním zkouškám (metalografie, mechanizovaná zkouška stříhem). Dále byly naměřeny průměry svarových čochek. Výsledky zkoušek byly porovnány pro obě svařovací zařízení a byl hodnocen vliv způsobu řízení svařovacího procesu na jeho stabilitu a kvalitu svarových spojů.

5.1. Použitý materiál

Ocel 22MnB5 je od výrobců dodávána s feriticko-perlitickou strukturou a v tomto stavu má mez kluzu $R_{p0,2}=350 - 550$ MPa, mez pevnosti $R_m=500 - 700$ MPa a tažnost A80 vyšší než 15 % (Tabulka 4.11). Chemické složení oceli je uvedeno v Tabulce 4.12. Chemické složení povlaku je 10 % Si a 90 % Al. Tloušťka plechu je 1,2 mm, tloušťka povlaku z každé strany je 40 μm .

Ocel je vhodná pro kalení lisováním díky obsahu malého množství boru, který podporuje tento způsob kalení. Ochranu před oxidací při ohřevu vykonává Al-Si vrstva, která se při tepelném zpracování mění na ochrannou vrstvu na bázi Al-Fe-Si (Obr. 5.1.1).



Obr. 5.1.1: Vrstva Al-Fe-Si po kalení v lisovacím nástroji

5.2. Popis experimentu

Vzorky (o rozměrech 50 mm x 20 mm) označené podle způsobu tepelného zpracování před lisováním jako F1, F2, F3, F4, se lišily dobou průchodu průběžnou pecí. Ohřáty byly všechny na stejnou teplotu 920 °C, viz. Tabulka 5.2.1. Vzorky byly vystaveny působení tepla po dobu 5, 7, 11 a 14 minut. Podle doby expozice se měnila barva povrchových oxidů na plechách (viz Obr. 5.2.1).

Tabulka 5.2.1: Parametry ohřevu před tvářecím procesem

Vzorek	Teplota [°C]	Doba v peci
F1	920	7
F2	920	11
F3	920	14
F4	920	5



Obr. 5.2.1: Změna barvy oxidů na povrchu

Pro každý typ tepelného zpracování byla na odporovém lisu PMS 11-4 a robotických kleštích MIDISpot VISION AV odporově svařena sada sedmi bodových svarů. Svařování probíhalo v Laboratoři odporového svařování, která je součástí Laboratoře výuky svářečských technologií na ČVUT v Praze. Na svarových spojích byla následně hodnocena kvalita spoje pomocí mechanizované zkoušky stříhem a metalografické zkoušky.

5.3. Použitá zařízení

5.3.1. Odporový lis PMS 11-4 (1 000 Hz) od firmy Dalex

(Obr. 5.3.1.1)

Pro svařování byly použity elektrodové čepičky typu 39D 1978-2 z materiálu A2/2-CuCr1Zr, jejichž složení je 99,98 % Cu, 0,9 % Cr a 0,12 % Zr. Řízení svařovacího procesu může probíhat ve dvou režimech, se zapnutou regulací a bez regulace. Při zapnuté regulaci je proces řízen na základě prvních 3 testovacích (učících) svarů, které jsou následně uloženy do databáze uvnitř řídicí jednotky. Při svařování se pak vychází z těchto uložených hodnot. Při následném svařování řídicí jednotka přepočítává aktuální hodnoty svařovacích parametrů na základě již uložených svarů. Regulované hodnoty se nemění s velikostí přechodového odporu jednotlivých vzorků. Řízení svařovacího procesu bez regulace je vypnuté a skutečné svařovací parametry se liší od nastavených hodnot v závislosti na přechodovém odporu plechů.



Obr. 5.3.1.1: svařovací lis PMS 11-4

5.3.2. Robotické kleště MIDISpot VISION AV (10 000Hz) od firmy Elmatech

(Obr. 5.3.2.1)

Stejně jako v předchozím případě byly použity elektrodové čepičky typu 39D 1978-2 z materiálu A2/2-CuCr1Zr, jejichž složení je 99,98 % Cu, 0,9 % Cr a 0,12 % Zr. Řízení svařovacího procesu probíhá měřením tloušťky plechů a přechodového odporu, podle jehož velikosti určí řídicí jednotka svařovaný materiál. Z databáze, která je součástí řídicího systému se určí optimální energie (vnesené teplo). Každých 50 μ s je z okamžitých hodnot přepočítána energie. Dokud není energie dostatečná pro spojení svařovaných plechů, prodlužuje se svařovací čas. Svařuje se tedy bez nastavování parametrů. Před svařováním si kleště provedly kalibraci čepiček pomocí dotyku obou čepiček a změřily odpor čepiček. Výhodou použitých 10 000 Hz byla právě možnost udržení téměř konstantního svařovacího proudu, a možnosti zaznamenat svařovací parametry každých 50 mikrosekund, tedy křivka usměrněného svařovacího proudu je přesnější.



Obr. 5.3.2.1: robotické kleště MIDISpot VISION AV

5.4. Experiment

První série vzorků byla svařena na odporovém lisu PMS 11-4. Ze zkušebních svarů bylo ověřeno, že optimalizované parametry z předchozího výzkumu na ÚST (tedy svařovací čas $t = 280$ ms, přítlak $P = 2,5$ kN a svařovací procento 28,5 %), jsou i po upgradu řídicí jednotky optimální. Nastavený proud potřebný pro svařování se nemění, hodnoty naměřených svařovacích proudů jsou u jednotlivých vzorků rozdílné, kvůli velikosti přechodového odporu, který se liší tepelným zpracováním povlaku (fázovým složením) u každého vzorku Tabulka 5.4.1. Tento proud byl měřen pomocí čidel umístěných přímo na čepičkách.

Tabulka 5.4.1: Naměřené svařovací proudy

Svařovací proudy jednotlivých vzorků [A]								
	1	2	3	4	5	6	7	Průměrná hodnota
F1	6 630	6 552	6 740	6 668	6 582	6 800	6 778	6 679
F2	6 550	6 190	6 608	6 464	6 494	6 734	6 470	6 501
F3	6 728	6 912	6 834	7 096	6 754	6 816	6 728	6 838
F4	6 748	7 186	7 306	7 342	7 202	7 112	6 982	7 125

Druhá série vzorků byla svařena na robotických kleštích MIDIsport VISION AV, kde řídicí jednotka parametry svařování nastavovala automaticky na základě tloušťky a typu svařovaného materiálu (jeho odporu). Svařovalo se pak s konstantním svařovacím proudem (pro vysokopevnostní ocel je to proud 7,16 kA) a potřebné množství elektrické energie se dohánělo prodlužujícím se časem. Nastaveno bylo 100 % svařovacího proudu.

Vestavěný měřicí systém monitoruje tyto parametry: čas přítlaku před svařováním [ms], čas svařování [ms], čas výdrže po svařování [ms], velikost přítlaku [kN] a vnesené teplo [kWs] viz Tabulka 5.4.2. Čas před svařením byl 800 ms a čas po svaření byl 500 ms.

Tabulka 5.4.2: Naměřené hodnoty na MIDIsport VISION AV

Vzorek	Svařování [ms]	Energie [kWs]	Přítlačná síla [kN]
F1-1	770	2,86	2,8
F1-2	820	2,86	2,8
F1-3	863	2,9	2,9
F1-4	743	2,87	2,8
F1-5	824	2,85	2,8
F1-6	791	2,9	2,9
F1-7	987	2,89	2,9
F2-1	728	2,85	2,8
F2-2	959	2,87	2,8
F2-3	786	2,9	2,9
F2-4	747	2,86	2,8
F2-5	761	2,89	2,9
F2-6	773	2,84	2,8
F2-7	768	2,89	2,9
F3-1	768	2,85	2,8
F3-2	737	2,85	2,8
F3-3	760	2,8	2,8
F3-4	806	2,8	2,8
F3-5	808	2,8	2,8
F3-6	766	2,79	2,8
F3-7	786	2,86	2,8
F4-1	750	2,81	2,8
F4-2	772	2,87	2,8
F4-3	825	2,87	2,8
F4-4	769	2,89	2,9
F4-5	782	2,89	2,9
F4-6	767	2,86	2,8
F4-7	778	2,9	2,9

5.5. Použitá metodika zkoušení

Pro zjištění kvality spoje byly použity tři zkoušky. Mechanizovaná zkouška stříhem, metalografická zkouška a měření velikosti svarové čočky. Použitím mechanizované zkoušky stříhem lze zjistit únosnost svaru na stříh. Metalografickou zkouškou se zjišťují vnitřní vady. Nejlepší parametr, který vypovídá o kvalitě spoje, je průměr svarové čočky. Měří se posuvným měřítkem na vzorcích po mechanizované zkoušce stříhem dle normy ČSN EN ISO 14273 [28].

5.5.1. Mechanizovaná zkouška stříhem

Mechanizovaná stříhová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení LabTest 5.100SP1 (Obr. 5.5.1.1) v Laboratoři Mechanických zkoušek na Ústavu strojírenské technologie ČVUT v Praze. Měření probíhalo dle podnikové normy VW 01105-1 [29] a pro úspěšné vyhodnocení této zkoušky bylo požadováno, aby střížná síla byla minimálně 3,75 kN. Postupně se vkládali jednotlivé vzorky do zařízení a po následném upnutí ve stroji, byla nastavena pomocí počítače doba zaznamenávání průběhu sil na 50 % pokles střížné síly.



Obr 5.5.1.1: LabTest 5.100SP1

Z každé série sedmi vzorků bylo vždy šest roztrženo, výsledky střížné síly byly zaznamenávány v závislosti na čase průběhu zkoušky. Ze souboru těchto hodnot byl vytvořen graf průběhu mechanizované zkoušky stříhem a na tomto grafu nalezena maximální střížná síla (viz Výsledky).

5.5.2. Metalografická zkouška

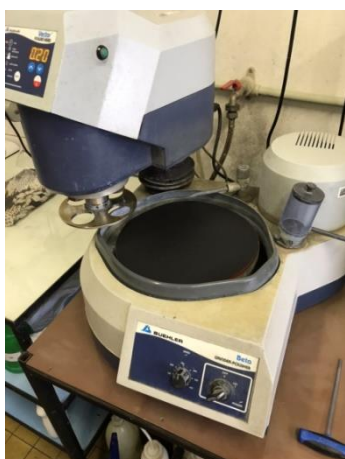
Nejdříve byl vzorek nařezán pomocí rozbrušovací pily Labotom-3 od firmy Struers (Obr. 5.5.2.1) a poté zalisován pomocí metalografického lisu CitoPress-1 od firmy Struers (Obr. 5.5.2.2) při teplotě 180 °C a tlaku 250 bar po dobu 4 minut. Následně byly vzorky broušeny a leštěny pomocí brusky/leštičky Phoenix Beta s automatickou hlavou Vector od firmy Buehler (Obr. 5.5.2.3), na brusných papírech a leštících plátnech. Nejdříve byl použit brusný papír SiC 180 (Obr. 5.5.2.4), který byl vodou chlazený, otáčky 300 ot/min, přtlak 30 N na vzorek po dobu 30 s. Následoval brusný papír SiC 1200 se stejnými parametry, pouze doba byla navýšena na 40 s. Poté byl použit brusný papír SiC 2000 se stejnými parametry. Následovalo leštění pomocí leštícího plátna MD Dur po dobu 3 minuty bez vody při 150 ot/min a přidanou diamantovou leštící suspenzí 1 µm. Na další leštění bylo použito leštící plátno MD Plus s přidáním suspenze Master Prep. Finální leštění bylo provedeno pomocí MD Nap a suspenzí OP-U (Coloidní silica) po dobu 3 minuty a 30 sekund. Poté následovalo naleptání pomocí roztoku Nital 2% (2% HNO₃ a 98% etanol) a řádné vysušení (Obr. 5.5.2.5). Následně byly jednotlivé vzorky vkládány postupně pod mikroskop AxioObserver Dm1 (Obr. 5.5.2.6), kde byly jednotlivé vzorky zkoumány na vady, které se objevují při svařování.



Obr. 5.5.2.1.: rozbrušovací pila Labotom-3



Obr. 5.5.2.2.: metalografický lis CitoPress-1



Obr 5.5.2.3.: bruska/leštička Phoenix Beta
s automatickou hlavou Vector



Obr 5.5.2.4.: brusný papír SiC 180



Obr 5.5.2.5.: sušení naleptaného vzorku



Obr 5.5.2.6.: AxioObserver Dm1 [30]

5.5.3. Měření průměru svarových čoček

Měření průměrů svarových čoček bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 14273 [28], pomocí posuvného měřítka a hodnoty byly zaznamenávány. Následně byl vypočten aritmetický průměr z naměřených rozměrů každého bodového svaru, viz Graf 6.2. Průměr čočky má být minimálně 3,8 mm dle vzorce [28]:

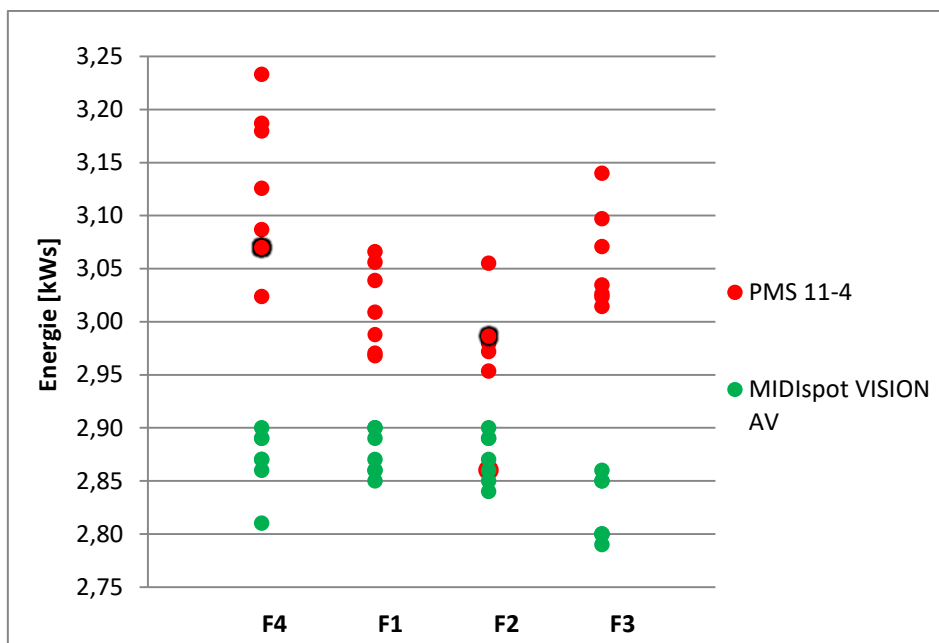
$$d_{min} = 3,5 \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

kde: d_{min} – minimální průměr [mm]

t – tloušťka plechu 1,2 mm

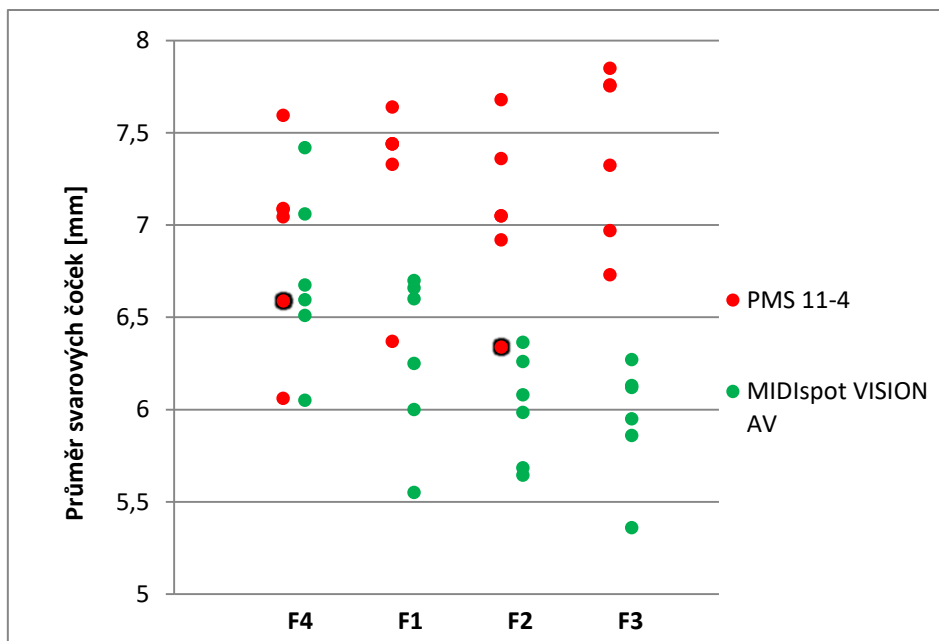
6. Výsledky a jejich diskuze

Naměřené výsledky zkoušek byly sestaveny do grafů. Velikost vneseného tepla je zobrazena na Grafu 6.1. Vnesené teplo bylo při použití svařovacích kleští MIDIsport VISION AV změřeno samotným zařízením a v případě použití odporového lisu PMS 11-4 bylo vnesené teplo z naměřených hodnot, dopočítáno pomocí Jouleova-Lenzova zákona. Při svařování robotickými kleštěmi MIDIsport VISION AV bylo množství vneseného tepla potřebného k tvorbě svaru u všech vzorků o něco málo menší než v případě PMS 11-4. Z grafu je patrný vliv způsobu řízení svařovacího procesu. Adaptivní způsob řízení umožňuje vnášet do svarů stabilní množství energie, přičemž pokles energie u poslední sady vzorků (nejdelší prodleva v peci) je pravděpodobně daný vlivem transformace většiny povlaku na fázi AlFe, tedy zvýšením přechodového odporu. Naproti tomu na řízení procesu pomocí optimalizace průběhu svařování se projevuje vliv poměru fází v povlaku poměrně výrazně. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší vnesenou energií je 300 Ws. V Grafu 6.1 jsou černým orámováním vyznačeny vzorky, u kterých došlo při mechanizované stříhové zkoušce k rozdělení ve středové rovině, tedy v ose svaru.



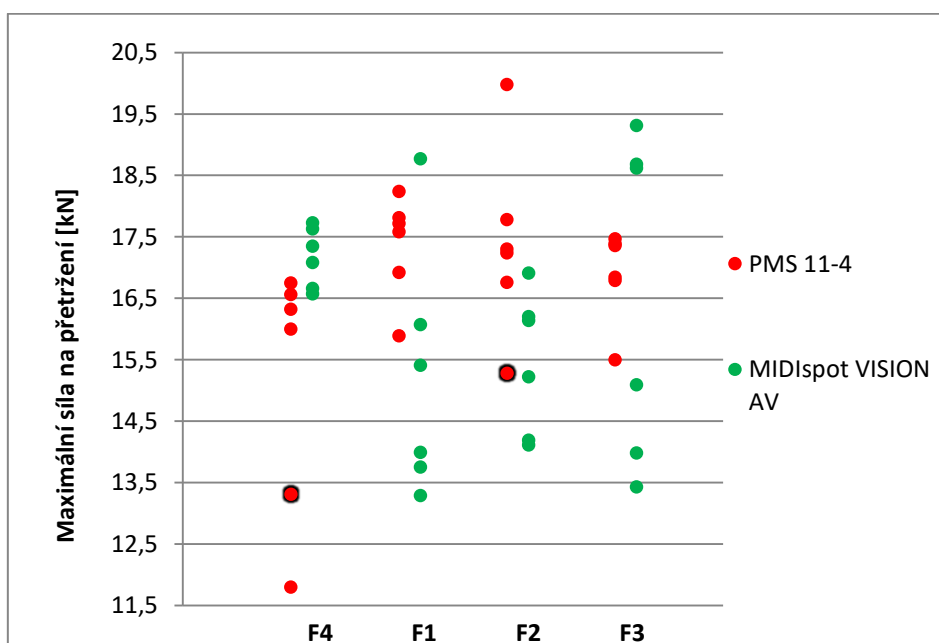
Graf 6.1.: Množství vneseného tepla

Z měření velikosti svarových čoček je vidět, že v případě nejkratší prodlevy v peci obě svařovací zařízení (oba způsoby řízení svařovacího procesu) jsou schopny dosáhnout stejných průměrů svarových čoček, a to 6 až 7,5 mm. Rozptyl hodnot je v tomto případě také téměř totožný. Průměry svarových čoček spojů vyrobených na svařovacím zdroji s regulací pomocí učicích svarů (PMS 11-4) mírně narůstají s rostoucí prodlevou v peci, přičemž rozptyl hodnot zůstává přibližně stejný. V případě svařování na zařízení s adaptivním řízením (MIDI spot) průměry svarových čoček s rostoucí prodlevou v peci poměrně rychle klesají a rozptyl hodnot se zmenšuje. Nicméně podmínka minimálního průměru svaru byla ve všech případech splněna.



Graf 6.2: Průměry svarových čoček

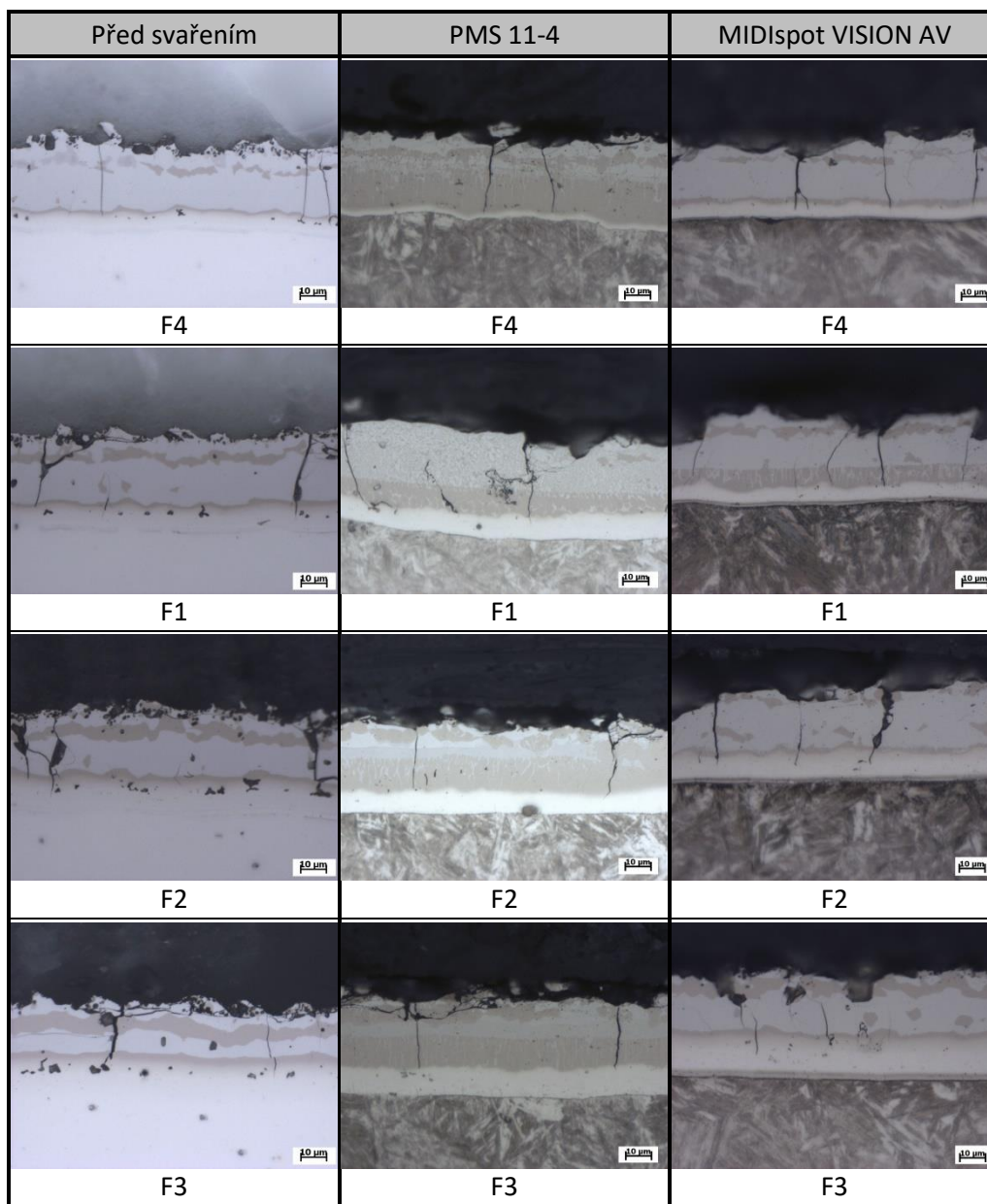
Výsledky mechanické střižové zkoušky jsou uvedeny v Grafu 6.3. Dle podnikové normy VW 01105-1 [29] měla být střižná síla minimálně 3,75 kN, aby mohl spoj být vyhodnocen jako vyhovující. Z grafu je patrné, že všechny svary u obou způsobů svařování vyhovují podmínce minimální střižné síly. F_{min} byla v průměru překročena čtyřnásobně.



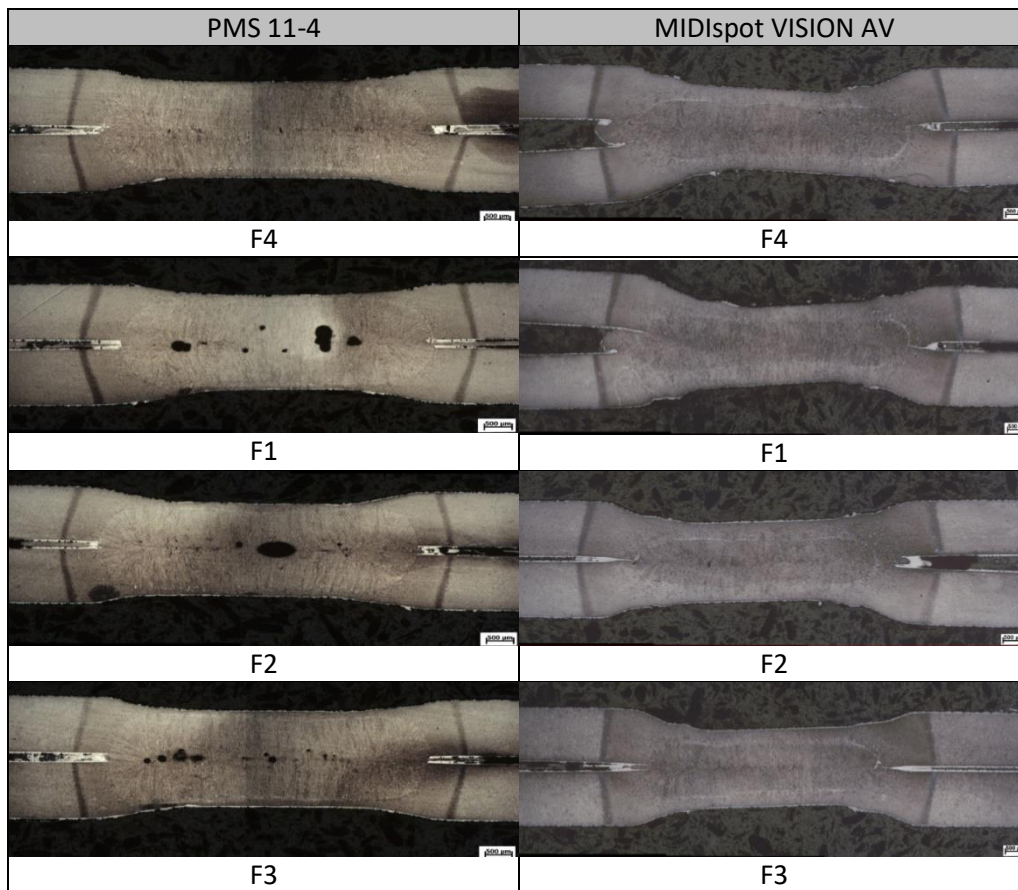
Graf 6.3: Rozptyl pevnosti svarových spojů

Z grafu 6.3 je patrné, že průměrné hodnoty maximálních sil potřebných na přestřižení vzorku u obou typů svařovacích zařízení s výraznou rezervou splňují podmínku minimální síly a s prodlužující se prodlevou v peci mírně narůstají. Rozptyl hodnot byl v případě zařízení s adaptivním řízením (MIDI spot) viditelně větší.

Ovlivnění povlaku při svařování je zobrazeno v Tabulce 6.1. Povlaky svařované na MIDIsport VISION AV vykazují výrazně menší ovlivnění teplem a nedochází v takové míře k dalším fázovým změnám.



Tabulka 6.1: Povrchová vrstva AlSi na vysokopevné oceli 22MnB5 (zvětšení 500x)



Tabulka 6.2: Výsledky metalografické zkoušky (zvětšení 25x)

Výsledky metalografické zkoušky ukazují, že kvalitnější (bez vnitřních vad) spoje vznikají za použití zařízení s adaptivním řízením MIDIsSpot VISION AV (Tabulka 6.2). Na druhou stranu všechny tyto svary vykazovaly větší hloubku vtisku elektrod. Dle normy ČSN EN ISO 14373 [31] musí být hloubka vtisku elektrody maximálně 20 % tloušťky svařovaného plechu, což v případě sledovaných plechů bylo 240 μm . Tato podmínka u spojů svařených s adaptivním řízením procesu splněna nebyla ani v jednom případě, viz Tabulka 6.3. Příčinou mohlo být použití 100 % svařovacího proudu, což je parametr, kterým se na zdroji s adaptivním řízením reguluje velikost svarové čochky.

	F4	F1	F2	F3
PMS 11-4	220 μm	239 μm	255 μm	236 μm
MIDIsSpot VISION AV	330 μm	365 μm	362 μm	370 μm

Tabulka 6.3: Hloubka vtisku elektrod

7. Závěr

Svařování na odporovém lisu PMS 11-4 při nastavení pevných parametrů svařování ukázalo, že proud použitý při vytvoření svarového spoje, kolísal v rozsahu hodnot 6 190 – 7 342 kA [32], vlivem odlišného přechodového odporu jednotlivých povlaků. Pro vytvoření svarového spoje bylo potřeba nejméně proudu u vzorků F2 s dobou ohřevu 11 minut. Naopak nejvíce proudu bylo potřeba na vytvoření svarového spoje u vzorků F4 s dobou ohřevu 5 minut. Velikost svařovacího proudu zároveň určovala velikost vneseného tepla a změny v chemickém složení povlaku. Při svařování narůstá fáze AlFe v povlaku a dochází ve svarovém spoji k tvorbě mnoha vnitřních vad. Tyto vady budou způsobeny proměnlivým svařovacím procesem. Při mechanické zkoušce stříhem, byl splněn požadavek minimální síly na přetržení 3,75 kN. Minimální síla na přetržení byla 11,8 kN [32], tedy skoro 4x větší než požadovaná. Průměr svarových čoček také splňoval požadavky. Proces svařování se ukázal jako příliš nepřesný s velkými rozdíly a výsledky jednotlivých zkoušek u stejných vzorků. U dvou prvků došlo při mechanizované zkoušce stříhem k roztržení v dělicí rovině. Při měření hloubky vtisku čepiček neprošel pouze vzorek F2.

Robotické kleště MIDIsport VISION AV mají inteligentní řídicí systém, který řídí svařovací proces pomocí prodlužování doby svařování za účelem získání stejné vnesené energie, která je předepsána v systému výrobcem pro jednotlivé druhy ocelí. Přítlačná síla a vnesená energie je jen s minimálními odchylkami. Vnesená energie je s menšími odchylkami než u PMS 11-4 a je také menší. Průměry svarových čoček jsou také menší než u PMS 11-4 a s menším rozptylem. Vzhledem k menším průměrům svarových čoček a menší vnesené energii při svařovacím procesu je síla potřebná na přetržení při mechanické zkoušce stříhem menší, ale ne výrazně. Síla u vzorků s označením F4 a dobou ohřevu 5 minut je o přibližně 1 kN větší než u svařování pomocí PMS 11-4. Povrchová vrstva vykazuje minimální změny, pouze u vzorku F2 došlo k výraznému zvýšení fáze AlFe. Při svařování bylo nastaveno použití 100 % svařovacího proudu, proto hloubka vtisku ani u jednoho ze vzorků nespĺňovala maximální hloubku vtisku 240 μm .

Použité zdroje

- [1] *Technologie bodového svařování*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Votava, Ph. D.
- [2] Svařování. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD#Historie>
- [3] Edmund Davy. *Www.edubilla.com* [online]. [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <http://www.edubilla.com/inventor/edmund-davy/>
- [4] KOLAŘÍKOVÁ, Marie. *Svařování vysokopevných manganborových ocelí elektrickým odporem a vliv povrchových úprav na jejich svařitelnost*. Praha, 2019. Habilitační práce. České Vysoké Učení Technické v Praze
- [5] Nikolaj Benardos. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: https://eo.wikipedia.org/wiki/Nikolaj_Benardos
- [6] Stanisław Olszewski. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Stanis%C5%82aw_Olszewski
- [7] Steiner, J. 2015, *Pevnost bodového spoje v měkkém a tvrdém režimu svařování*, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [8] Bodové svařování. <http://tvd.cz/> [online]. [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <http://tvd.cz/bodove-svarovani.html>
- [9] FOREJTOVÁ, Lucie, Ladislav KOLAŘÍK, Jan SUCHÁNEK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Tomáš PILVOUSEK. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, s. r. o., 2017, (3), - [cit. 2019-01-28]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>
- [10] Svařování. <http://www.komas.cz/cs/> [online]. [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <http://www.komas.cz/cs/svarovani/a-102/>
- [11] Svařovací metody. <https://www.esab.cz/cz/cz/index.cfm> [online]. [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/education/blog/bodove-svarovani.cfm>
- [12] *Rozdělení metod tlakového odporového svařování* [online]. [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/10-21.pdf>
- [13] Přehled vybraných metod a jejich číselné značení. *Přehled metod svařování a jejich číselné značení: Svařování kovů v praxi* [online]. 2011, s. 1 [cit. 2019-07-24].
- [14] Odporové svařování, bodové svařování, švové svařování. <https://www.schinkmann.cz/> [online]. [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>
- [15] Odporové svařování. <https://www.batima.cz/> [online]. [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <https://www.batima.cz/odporove-svarovani>
- [16] YU, Jiyoung. Adaptive Resistance Spot Welding Process that Reduces the Shunting Effect for Automotive High-Strength Steels. *Metals*, 2018, 8.10: 775
- [17] Odporové švové svařování. <https://www.schinkmann.cz/> [online]. [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/odporove-svove-svarovani>
- [18] Odporové výstupkové svařování. <https://www.schinkmann.cz/> [online]. [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/odporove-vystupkove-svarovani>
- [19] Elektrické odporové svařování. <https://eluc.kr-olomoucky.cz/> [online]. [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1808>
- [20] CHTOUROU, Rim, Fahmi CHAARI, Gregory HAUGOU, et al. Experimental study of the mechanical strength and the failure of multi-sheet, multi-material spot-welded assemblies under pure and combined loading conditions. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2018, **183** [cit. 2019-01-24]. DOI: 10.1051/epjconf/201818302009. ISSN 2100-014X. Dostupné z: <https://www.epj-conferences.org/10.1051/epjconf/201818302009>

- [21] CHEN, Xiaming. Effect of Al-Si Coating on Microstructure and Properties of 22MnB5 Steel Laser Welded Joint. *Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2018, **54**(6) [cit. 2019-01-24]. DOI: 10.3901/JME.2018.06.162. ISSN 0577-6686. Dostupné z: http://www.cjmenet.com.cn/Jwk_jxgxcb/CN/10.3901/JME.2018.06.162
- [22] ŠIMON, Petr. *Karosérie osobního automobilu: Interní dokument*. Praha, 2015.
- [23] BERND-ARNO, Behrens, Bonk CHRISTIAN, Hübner SVEN, Uhe JOHANNA, Klie ROMAN a Moritz JÖRN. Local Heat Treatment in Draw Bending for Profiles of Manganese Boron Steel 22MnB5. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **183**, 31-36 [cit. 2019-01-24]. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.007. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817315126>
- [24] KONG, Jong Pan, Tae Kyo HAN, Kwang Geun CHIN, Bong Gyu PARK a Chung Yun KANG. Effect of boron content and welding current on the mechanical properties of electrical resistance spot welds in complex-phase steels. *Materials & Design (1980-2015)* [online]. 2014, **54**, 598-609 [cit. 2019-01-24]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.08.098. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026130691300842X>
- [25] KASVAYEE, Keivan Amiri, Matteo CIAVATTA, Ehsan GHASSEMALI, Ingvar L. SVENSSON a Anders E.W. JARFORS. Effect of Boron and Cross-Section Thickness on Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Iron. *Materials Science Forum* [online]. 2018, **925**, 249-256 [cit. 2019-01-24]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.925.249. ISSN 1662-9752. Dostupné z: <https://www.scientific.net/MSF.925.249>
- [26] DORRIBO, D., L. GREVE, P. DÍEZ, I. ARIAS a X. LARRÁYOZ-IZCARA. Numerical estimation of the bearing capacity of resistance spot welds in martensitic boron steels using a J-integral fracture criterion. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* [online]. 2018, **96**, 497-508 [cit. 2019-01-24]. DOI: 10.1016/j.tafmec.2018.06.006. ISSN 01678442. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167844218300727>
- [27] LARA, J.A.C., C.P. COUTO, M.A. COLOSIO, J.L. ROSSI a L.M. ABBADE. *Influence of Spot Welding Parameters on Al-Si Coated 22MnB5 for Automotive Application* [online]. In: . 2017-11-07, s. - [cit. 2019-01-24]. DOI: 10.4271/2017-36-0225. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2017-36-0225/>
- [28] ČSN EN ISO 14273 (051112). *Odporové svařování - Destruktivní zkoušky svarů - Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [29] VW 01105-1. *Odporové bodové svařování, konstrukce, výpočty, zajištění procesu*. Volkswagen Aktiengesellschaft, 2010.
- [30] *AxioObserver Dm1* [online]. In: . [cit. 2019-07-26]. Dostupné z: <https://www.microshop.zeiss.com/en/us/system/axio+observer-axio+observer+5-inverted+microscopes/10302/>
- [31] ČSN EN ISO 14373 (052640). *Odporové svařování - Postup pro bodové svařování nepovlakovaných a povlakovaných nízkouhlíkových ocelí*. Praha: ČNI, 2015
- [32] BALIHAR, Ondřej, KOLAŘÍKOVÁ, Marie, ed. *Vliv způsobu řízení svařovacího procesu na kvalitu odporových svarů. Konference studentské tvůrčí činnosti* [online]. 2019, , 4 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: https://stc.fs.cvut.cz/pdf19/9513.pdf?_=1553604636