



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Vliv svařovacího cyklu na mechanické vlastnosti odporového spoje

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Martin Vrbíček
Vedoucí práce: doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Burket
Studijní program: N0715A270001 – Výrobní Inženýrství
Studijní obor: N071TVIN – bezoborový studijní program

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vrbíček** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **477792**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv svařovacího cyklu na mechanické vlastnosti odporového spoje

Název diplomové práce anglicky:

The influence of the welding cycle on the mechanical characteristics of the resistance spot weld

Pokyny pro vypracování:

- Rozbor problematiky svařovacího cyklu při odporovém svařování
- Popis jednotlivých vlivů na mechanické vlastnosti odporových spojů
- Návrh experimentu a vytvoření zkušebních vzorků svarových spojů
- Provedení analýz
- Vyhodnocení výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- GEDEON, S.A.; SORENSEN, C.D.; ULRICH, K.T. a EAGAR, T.W. Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds. Online. Welding research supplement. Dostupné z: [https://doi.org/S.A.GEDEON, C. D. SORENSEN, K. T. ULRICH AND T. W. EAGAR](https://doi.org/S.A.GEDEON,C.D.SORENSEN,K.T.ULRICHANDT.W.EAGAR).
- MIKNO, Zygmunt; PILARCZYK, Adam; KORZENIOWSKI, Marcin; KUSTROŃ, Paweł a AMBROZIAK, Andrzej. Analysis of resistance welding processes and expulsion of liquid metal from the weld nugget. Online. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018, roč. 18, č. 2, s. 522-531. ISSN 1644-9665. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.08.003>.
- další dle zaslání seznamu

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Ing. Tomáš Burket ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **05.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

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

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Marie Kolaříkové, Ph.D., IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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 poděkoval vedoucím mé závěrečné práce paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE a panu Ing. Tomáši Burketovi za jejich čas, odborné vedení, rady, připomínky a trpělivost jak při experimentu, tak při psaní samotné diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi za podnětné konzultace k materiálové části experimentu.

Anotace

- Název závěrečné práce:** Vliv svařovacího cyklu na mechanické vlastnosti odporového spoje
- Autor práce:** Martin Vrbíček
- Vedoucí práce:** doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE
- Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Burket
- Akademický rok:** 2023/2024
- Vysoká škola:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní
- Ústav:** 12133 – Ústav strojírenské technologie
- Vedoucí ústavu:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
- Rozsah práce:** 64 stránek, 11 tabulek, 35 obrázků, 2 přílohy
- Klíčová slova:** bodové odporové svařování, manganbórová ocel, svařovací cyklus, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti
- Abstrakt:** Tato diplomová práce se zabývá vlivem svařovacího cyklu na mechanické vlastnosti bodového odporového spoje oceli 22MnB5. V teoretické části je popsána manganbórová ocel, problematika svařovacího cyklu a je rozebrán vliv svařovacího cyklu na mechanické vlastnosti odporového svarového spoje. V experimentální části jsou navrženy parametry svařovacího cyklu s aplikací dohřevu, svařeny plechy a analyzovány mechanické vlastnosti svarového spoje. Data z experimentu jsou zařazena mezi data z předchozích prací vedených na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT a jsou vytvořeny souvislosti mezi vlivy různých svařovacích cyklů na mechanické vlastnosti bodového odporového spoje materiálu 22MnB5.

Annotation

Title of the final thesis: The influence of the welding cycle on the mechanical characteristics of the resistance spot weld

Author: Martin Vrbíček

Supervisor: doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE

Supervisor: Ing. Tomáš Burket

Academic year: 2023/2024

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Extent: 64 pages, 11 tables, 35 pictures, 2 attachments

Keywords: resistance spot welding, manganese-boron steel, welding cycle, heat treatment, mechanical properties

Abstract: This diploma thesis focuses on the influence of the welding cycle on the mechanical properties of resistance spot weld of the 22MnB5 steel. The theoretical part describes manganese-boron steel, the issue of the welding cycle, and analyses the influence of the welding cycle on the mechanical properties of a resistance spot weld. In the experimental part, the parameters of the welding cycle with the application of post-weld tempering process are designed, sheets are welded, and the mechanical properties of the welds are analysed. The data are included among the data from previous theses made at the Department of Manufacturing Technology Faculty of Mechanical Engineering CTU, enabling a comprehensive comparison of how different welding cycles affect the the mechanical properties of resistance spot welds of the 22MnB5 steel.

Obsah

Úvod	9
1 Teoretická část	10
1.1 Materiály používané v automobilovém průmyslu.....	10
1.1.1 Rozdělení ocelí používaných v automobilovém průmyslu.....	11
1.2 PHS oceli – manganbórové oceli	11
1.2.1 Ocel 22MnB5.....	12
1.2.2 Ocel MMS (Medium manganese steel)	15
1.3 Povrchová vrstva Al-Si	15
1.4 Svařitelnost materiálu 22MnB5	17
1.4.1 Vliv povrchové vrstvy Al-Si na svařitelnost	17
1.4.2 Vliv jednotlivých prvků na svařitelnost	18
1.5 Odporové svařování	19
1.5.1 Metalurgický proces vzniku odporového svarového spoje	19
1.5.2 Svařovací cyklus a svařovací parametry.....	21
1.6 Vliv svařovacího cyklu na mechanické vlastnosti svaru	22
1.7 Vliv svařovacích parametrů na geometrii svaru	24
1.8 Módy porušení svarového spoje	25
2 Cíle práce.....	26
3 Experimentální část	27
3.1 Materiál použitý pro experiment	29
3.2 Použitá zařízení a parametry procesů.....	30
3.2.1 Použitá zařízení, parametry a postup tepelného zpracování	30
3.2.2 Použitá zařízení a postup tahové zkoušky, metalografie a měření tvrdosti tepelně zpracovaných plechů	32
3.2.3 Použitý software a postup simulací	32
3.2.4 Použitá zařízení, postup a parametry svařování	33
3.2.5 Použitá zařízení a postup tahové zkoušky, metalografie a měření tvrdosti svařených plechů	36
3.3 Rozbor výsledků.....	37
3.3.1 Výsledky tepelného zpracování	37
3.3.2 Analýza místa porušení svarů z předchozích prací	42
3.3.3 Výsledky simulací	43

3.3.4 Výsledky svařování.....	45
3.3.5 Analýza svarů z předchozích prací a vytvoření souvislostí s touto diplomovou prací	52
4 Závěr	54
5 Literatura.....	56
6 Seznam tabulek	60
7 Seznam obrázků.....	61
8 Přílohy.....	63
8.1 Příloha 1 - Postup jednotlivých fází simulací z hlediska průběhu proudu	63
8.2 Postup jednotlivých fází simulací z hlediska nastavených parametrů	64

Úvod

Současným trendem je snižování emisí a snižování spotřeby pohonných hmot dopravních prostředků, zejména automobilů. Jedním z řešení je snížení celkové hmotnosti automobilu. Vývoj vysokopevných za tepla tvářených ocelí přispěl ke snížení hmotnosti karoserie při současném zvýšení bezpečnosti automobilu. Bezpečnostní prvky automobilu se vyrábějí z manganbórové oceli, která se vyznačuje vysokou pevností po tváření. Z důvodu ochrany proti oxidaci při tváření za tepla jsou díly z této oceli opatřeny povrchovou vrstvou Al-Si, která má ale negativní vliv na svařitelnost. Plechy jsou při výrobě karosérie svařovány metodou bodového odporového svařování. Svařovací režim používaný v průmyslu je ve většině případů tvrdý jednopulzní.

V současné době jsou manganbórové oceli v automobilovém průmyslu již běžně používány. Mechanické vlastnosti odporového spoje z tohoto materiálu teoreticky lze stále zlepšovat při použití jiného svařovacího režimu.

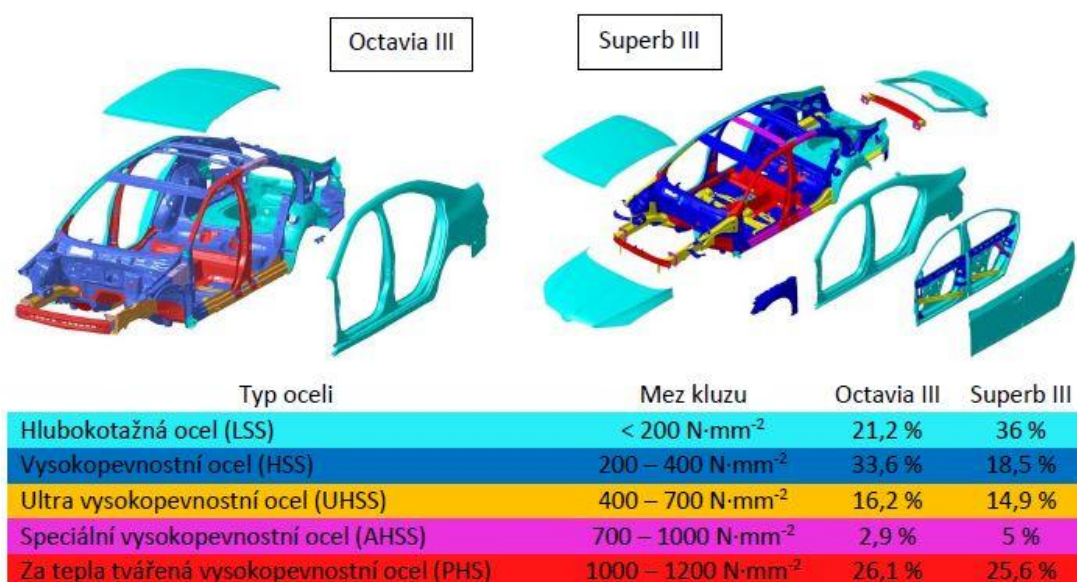
Teoretická část této diplomové práce se zabývá manganbórovou ocelí 22MnB5, její svařitelností a problematikou svařovacího cyklu, zejména dohřevu, a jeho vlivu na mechanické vlastnosti odporového spoje.

V experimentální části jsou provedeny simulace a tepelné zpracování a na základě jejich výsledků navrženy parametry svařovacího cyklu s aplikací dohřevu, svařeny plechy a zkoumán vliv svařovacího cyklu na mechanické vlastnosti svarového spoje. Data z experimentu jsou zařazena mezi data z předchozích prací vedených na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT a následně jsou vytvořeny souvislosti mezi vlivy různých svařovacích cyklů na mechanické vlastnosti bodového odporového spoje materiálu 22MnB5.

1 Teoretická část

1.1 Materiály používané v automobilovém průmyslu

Celosvětový trend směrem k udržitelnosti a minimalizaci dopadu na životní prostředí má za následek snahu o snížení využití fosilních paliv. Dopravní sektor má jeden z největších příspěvků k celosvětové produkci CO₂. Dle studie [1] je v Evropě zodpovědný za 28% celkových emisí CO₂ v roce 1998. Je tedy vyvíjen velký tlak na snižování nákladů na výrobu a provoz a zároveň na redukci emisí skleníkových plynů. Snížením hmotnosti automobilu omezíme nejen emise, ale i spotřebu pohonných hmot [1]. Z hlediska výroby je tedy snaha o minimalizaci hmotnosti automobilu při zvyšování bezpečnosti a kvality. Nejčastější využití při výrobě automobilu nachází ocelové plechy, pozinkované ocelové plechy, hliníkové plechy a plasty. Díky neustálému vývoji je dostupná řada možností, jak snížit hmotnost automobilu. Kompozitní materiály a plasty hrají také svou roli. Největší roli z hlediska bezpečnosti a hmotnosti karoserie hraje ocel (viz Obrázek 1). Díky použití vysokopevnostních ocelí lze ušetřit značnou hmotnost při zachování bezpečnosti automobilu [1] [2].



Obrázek 1 Materiálový koncept karoserie modelu Škoda Octavia III a Škoda Superb III [3], [2]

1.1.1 Rozdělení ocelí používaných v automobilovém průmyslu

Pro rozdělení ocelí se nejčastěji používá klasifikace dle metalurgie.

Nízkopevnostní oceli (LSS – low strength steel) jsou měkké hlubokotažné oceli s řízenou mezí kluzu. Do této kategorie spadají IF (interstitial free) oceli a mild oceli [2] [4].

Vysokopevnostní oceli (HSS – high strength steel) – do této kategorie nejpoužívanějších konvenčních ocelí spadají IF-HS (interstitial free – high strength) oceli, BH (bake hardenable) oceli, HSLA (high strength low alloy) oceli a CMn (carbon manganese) oceli [2] [4].

Pokročilé vysokopevnostní oceli (AHSS – advanced high strength steel) se pro svou pevnost používají pro výrobu bezpečnostních a nosných prvků automobilu. Sem spadají DP (dual phase) oceli, CP (complex phase) oceli, TRIP (transformation induced plasticity) oceli, TWIP (twinning induced plasticity) oceli a MS (martensitic steel) oceli [2] [4].

Vysokopevnostní za tepla tvářené oceli (PHS – press hardening steel nebo HF – hot formed), kam spadají manganbórové oceli, je kategorie s vysokou pevností a odolností proti nárazu. Kvůli vysoké odolnosti proti dynamickému namáhání jsou používané pro výrobu bezpečnostních prvků karoserie [2] [4].

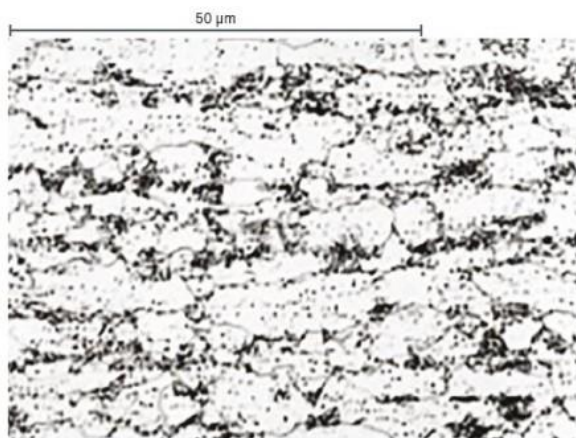
Vzhledem k zaměření práce bude další text věnován již výhradně PHS ocelím.

1.2 PHS oceli – manganbórové oceli

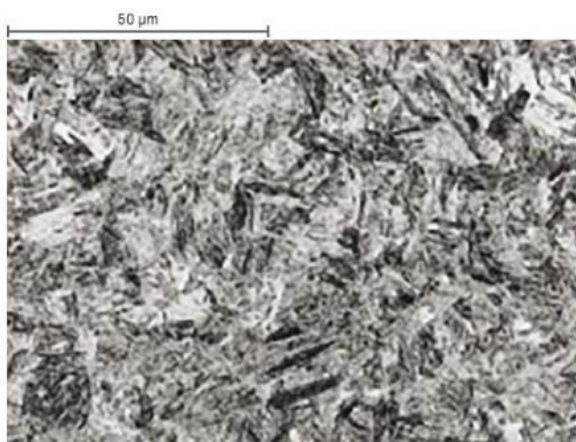
Tato skupina ocelí je vhodná pro vysokoteplotní termomechanické zpracování. V porovnání s konvenčními ocelmi tvářenými za studena vykazují manganbórové oceli mnohem vyšší mechanickou pevnost po tváření. Díky tomu lze vyrábět plechy výrazně menších tloušťek se zajištěním dostatečné pevnosti, a tak snížit hmotnost daného dílu až o 50 % [2] [5].

1.2.1 Ocel 22MnB5

Nejznámějším zástupcem skupiny manganbórových ocelí je ocel s označením 22MnB5. Různí výrobci používají různá označení, obecně jde však v základu o stejný materiál. Ocel 22MnB5 je vhodná pro kalení přímo v lisovacím nástroji. Při tváření za tepla se mění původně feriticko-perlitická struktura na strukturu martenzitickou, což doprovází výrazný nárůst hodnot meze pevnosti v tahu a meze kluzu. Změna mechanických vlastností je porovnána v tabulkách od výrobce Thyssenkrupp, viz Tabulka 1, Tabulka 2. V průběhu ohřevu je materiál náchylný na vysokoteplotní oxidaci, a proto je dodáván z hutí s ochrannou povrchovou vrstvou (nejčastěji Al-Si). Materiál 22MnB5 je řazen do tzv. první generace vysokopevnostních ocelí pro automobilový průmysl [2] [3] [5] [6].



Obrázek 2 Struktura 22MnB5 před tvářením – Feriticko-perlitická (Ferit – bílý, Perlit - černý) [6]



Obrázek 3 Struktura 22MnB5 po tváření – Martenzitická [6]

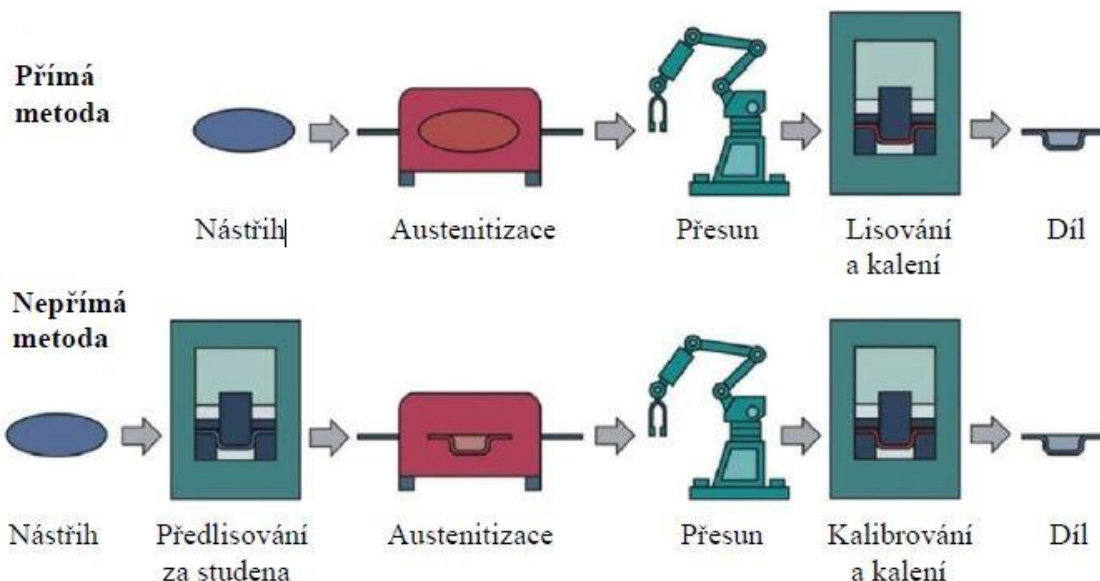
Tabulka 1 Typické mechanické vlastnosti 22MnB5 při dodání [7]

Označení	Povrchová vrstva	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]
MBW-W1500	-	320	500	10
MBW500	Al-Si	300–520	400–600	16
MBW600	Al-Si	340–580	520–720	12
MBW1500	Al-Si	350–550	500–700	12
MBW-K1500	-	250–400	450–600	18
MBW-K1900	-	300–500	450–650	16

Tabulka 2 Typické mechanické vlastnosti 22MnB5 po tepelném zpracování [7]

Označení	Povrchová vrstva	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]
MBW-W1500	-	1000	1500	5
MBW500	Al-Si	400	550	17
MBW600	Al-Si	450	650	16
MBW1500	Al-Si	1000	1500	5
MBW-K1500	-	1000	1500	5
MBW-K1900	-	1200	1900	4

Výroba oceli 22MnB5 se provádí ve dvou variantách (viz Obrázek 4): přímá a nepřímá metoda lisování. Nepřímá metoda se liší v předlisování plechu za studena, což umožňuje zpracování žárově pozinkovaných plechů. Přímá metoda je vhodná pro plechy s povrchovou vrstvou Al-Si [5] [6].



Obrázek 4 Diagramy procesu výroby 22MnB5 [8]

Proces tváření za tepla lze shrnout do několika kroků. Nejprve probíhá ohřev v indukční peci, při kterém je plech držen 4–8 minut nad teplotou A_{c3} (850–950 °C). Tím se docílí přeměna feriticko-perlitické struktury na strukturu austenitickou [5] [6].

Poté následuje lisování plechu. Při zahájení lisování je nutné zajistit, aby měl plech austenitizační teplotu. V závislosti na tloušťce plechu a na době přesunu plechu je tedy nutné kompenzovat teplotní ztrátu. Kompenzace je zajištěna ohřevem plechu cca o 100 °C nad teplotu austenitizace při prvním kroku [5] [6].

Nakonec je plech vylisován do finálního tvaru a současně zakalen v chlazeném nástroji. Pro zachování plastické tvarovatelnosti materiálu je třeba co nejmenších uzavíracích časů tvářecího lisu. K získání požadované martenzitické struktury je třeba co nejrychlejší tepelná výměna (alespoň $27\text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$) mezi lisovacím nástrojem a plechem. Martenzitická transformace při ochlazování je u oceli 22MnB5 ohraničena teplotami M_s 425 °C a M_f 280 °C [2] [5] [6].

1.2.2 Ocel MMS (Medium manganese steel)

Další pokrok z hlediska zvýšení pevnosti a redukce hmotnosti by mohl zajistit materiál MMS (medium manganese steel). MMS se řadí do tzv. třetí generace vysokopevnostních ocelí pro automobilový průmysl. Výzkum ukazuje, že v porovnání s 22MnB5 má MMS lepší tvařitelnost a vyšší hodnotu mechanických vlastností. Nevýhodou jsou problémy při zpracování a vysoká cena zapříčiněná vysokým obsahem manganu (cca 20 %) [9] [10] [11].

Výzkumná práce [12] ukazuje, že vlastnosti MMS mohou být pozitivně ovlivněny přidáním bóru. Lze předpokládat, že v budoucnu vzniknou další generace manganbórových ocelí. Vliv jednotlivých prvků na vlastnosti oceli MMS je sledován a popsán ve studii [13].

1.3 Povrchová vrstva Al-Si

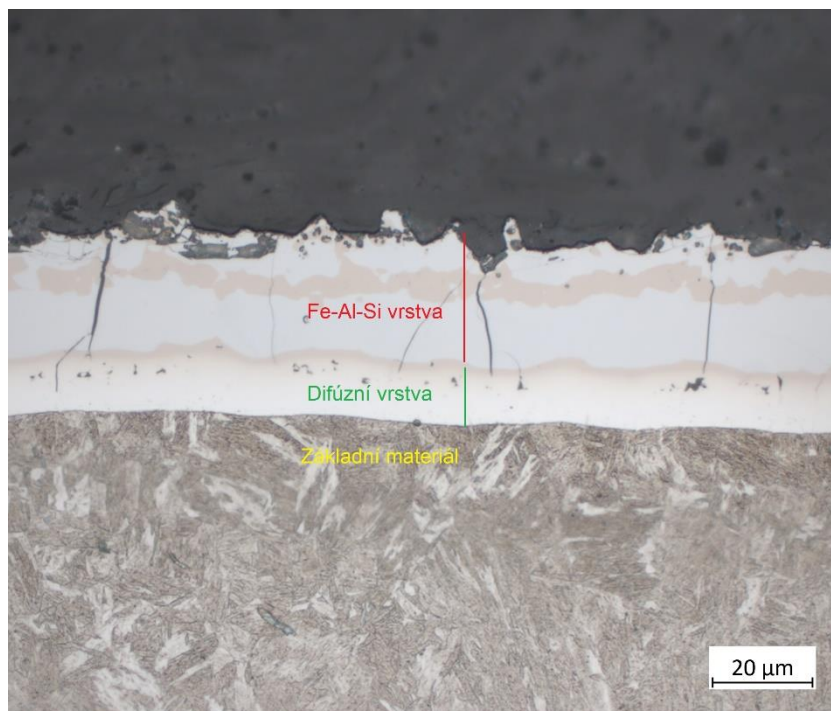
Povlaky Al-Si sloužící jako ochrana proti oxidaci mají tloušťku mezi 30–40 μm . Výzkumná práce [14] ukazuje, že rozdíly v technologických podmínkách při výrobě plechů, zejména při tepelném zpracování, mají vliv na difúzní procesy, které vedou ke změně vnitřní struktury povlaku. Povlak nemá v celém průřezu homogenní chemické složení a skládá se z několika vrstev. Jejich typ a tloušťka závisí na teplotě a době ohřevu při austenitizaci.

Základní vrstvy mohou být popsány následovně. Se základním materiálem sousedí difúzní vrstva, na tu navazuje mezivrstva a následně tenká vrstva povlaku, která je ve styku s atmosférou. Dále může dojít k tvorbě dalších oblastí v závislosti na několika faktorech [14] [15] [16].

V objemu povlaku se vyskytují heterogenní oblasti, které jsou buď nahodile roztroušeny jako izolované útvary nebo se spojí a vytvoří zcela novou vrstvu. Typ výskytu heterogenních oblastí je závislý na teplotě a době ohřevu při austenitizaci a je provázaný s tloušťkou difúzní vrstvy (při delší době výdrže na teplotě je pozorována tlustší difúzní vrstva a dochází ke spojení heterogenit a vytvoření nové

vrstvy). Intermetalická mezivrstva povlaku má různý poměr Al/Si v závislosti na její tloušťce. Rozdíly v tepelném zpracování plechů, zejména rozdíly v teplotě a době ohřevu při austenitizaci, vedou ke změnám koncentrací jednotlivých prvků a k tvorbě subvrstvy [14] [15] [16].

S prodlužující dobou austenitizace roste tloušťka intermetalické vrstvy a dochází k tvorbě výše zmíněné subvrstvy, která má nepříznivý vliv na svařitelnost. Podrobněji se problematice věnují práce [14] [15] [16].

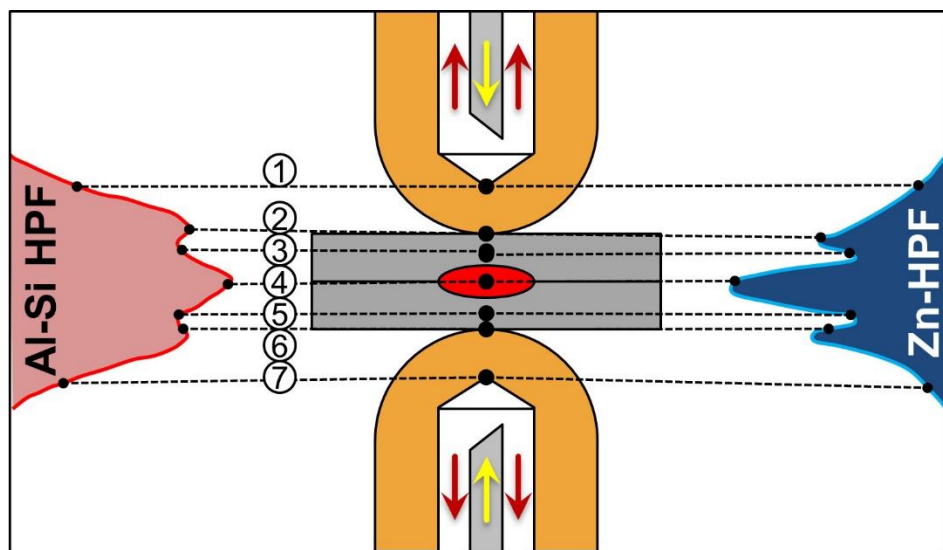


Obrázek 5 Průřez povlakem Al-Si

1.4 Svařitelnost materiálu 22MnB5

V automobilovém průmyslu, pro který byl tento materiál v podstatě vyvinut, se při spojování manganbórových ocelí nejčastěji uplatňuje metoda bodového odporového svařování. Svařitelnost této oceli bez ochranné vrstvy lze přirovnat k jiným uhlíkovým ocelím podobného složení [5] [6].

Ochranná vrstva Al-Si zásadně ovlivňuje svařovací proces. Na životnost elektrod má pozitivní vliv. Naopak na svařitelnost má vliv negativní. Svařovací proces vykazuje nestabilitu kvůli rozdílu v přechodových odporech povrchové vrstvy a základního materiálu. Na základě práce [17] se zdá, že povrchová vrstva Al-Si zapříčiňuje vyšší vnesené teplo při svařování, a tudíž větší svarovou čočku při porovnání s díly s povrchovou vrstvou na bázi zinku (viz Obrázek 6). U povrchové vrstvy na bázi zinku je vnesené teplo soustředěné do menšího objemu, a tudíž je výsledná svarová čočka menší [5] [17].



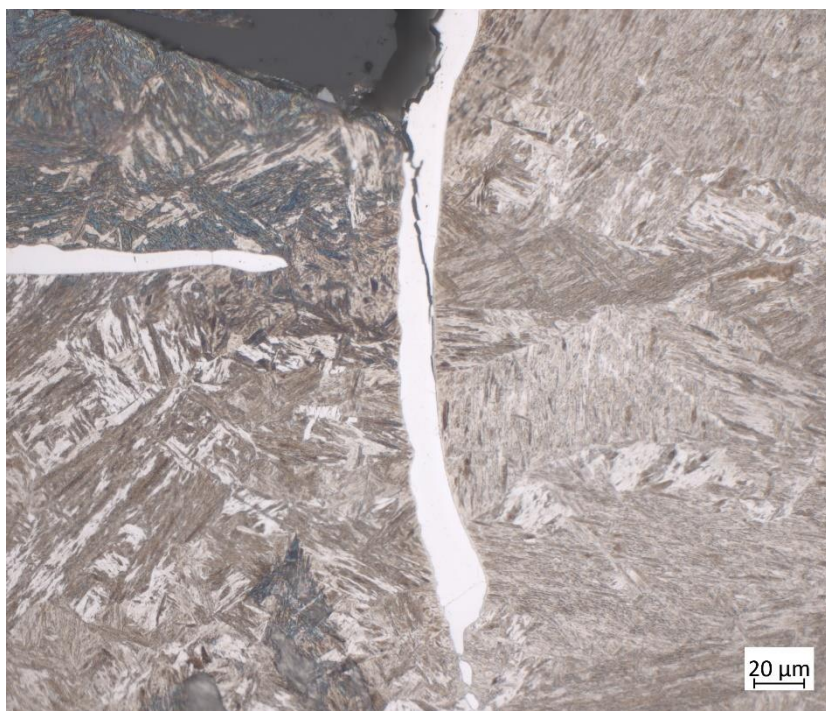
Obrázek 6 Rozložení teploty u bodového odporového svařování materiálu s různou povrchovou vrstvou (Al-Si x Zn) [17]

1.4.1 Vliv povrchové vrstvy Al-Si na svařitelnost

Teplotní cyklus při svařování způsobuje u martenzitu lokální měknutí. Mechanické vlastnosti, zejména pevnost, jsou u svařených dílů závislé na velikosti tepelně ovlivněné oblasti, respektive na vhodných svařovacích parametrech. Hliník a

křemík z povrchové vrstvy je během svařování rozpuštěn v oceli, což při ochlazení svaru vede ke vzniku křehkých intermetalických fází na bázi Al-Fe na hranici svarové čochy (viz Obrázek 7). Vyloučení této fáze přispívá k tvorbě křehkého módu porušení [16] [18].

Při odporovém svařování plechů s povrchovou vrstvou Al-Si je častým problémem nestabilita svařovacího procesu. Ta je způsobena nestejným složením povlaku, což vede ke změnám toku svařovacího proudu.



Obrázek 7 Místo iniciace trhliny na hranici svarové čochy v místě vměstku tvořeného částí povlaku Al-Si

1.4.2 Vliv jednotlivých prvků na svařitelnost

Vliv hlavních prvků obsažených v oceli 22MnB5, jak je popsán v práci [15] je následující:

S obsahem **uhlíku** roste pevnost v tahu a prokalitelnost, ale klesá tažnost a vrubová houževnatost, zhoršuje se svařitelnost a zvyšuje se elektrický odpor.

Mangan nemá žádný legující vliv do obsahu 0,8 %. Se zvyšujícím se obsahem manganu roste pevnost v tahu a mez kluzu, ale klesá poměrné prodloužení, roste

tvářitelnost za tepla. Svařitelnost nezhoršuje do obsahu cca 1 %. Snižuje negativní účinky síry a zlepšuje hloubku prokalitelnosti. Ve svaru s příliš nízkým obsahem manganu je síra vázána ve formě sulfidu železnatého, který se v jemných zrnech vylučuje do krystalické sítě a způsobuje křehkost svaru za tepla. Při obsahu manganu 10–14 %, kterému odpovídá obsah uhlíku cca 1–1,3 %, je získán svar s austenitickou strukturou vysoké pevnosti a houževnatosti. Mangan zvyšuje sklon zrna k hrubnutí při překrystalizaci. Snižuje elektrickou a tepelnou vodivost.

Bór u podeutektoidních ocelí zvyšuje prokalitelnost, zvyšuje náchylnost ke křehkému lomu. U austenitických ocelí má příznivý vliv na pevnost při vyšších teplotách.

Hliník zhoršuje svařitelnost. Kvůli své velké afinitě ke kyslíku rychle tvoří oxid hlinitý, který má vysokou teplotu tavení.

Vyšší obsah **křemíku** má zvyšuje pevnost v tahu, mez kluzu, elektrický odpor a odolnost proti vzniku okují. Při obsahu cca nad 1 % narůstá náchylnost k praskání za tepla, a proto zhoršuje svařitelnost. Zvyšuje odolnost vůči oxidaci a žáruvzdornost [15] [19].

1.5 Odporové svařování

Odporové svařování, konkrétně pak bodové odporové svařování je nejpoužívanější způsob spojování ocelových materiálů v automobilovém průmyslu. Tato metoda je rychlá, dobře automatizovatelná, produktivní a finančně výhodná [20].

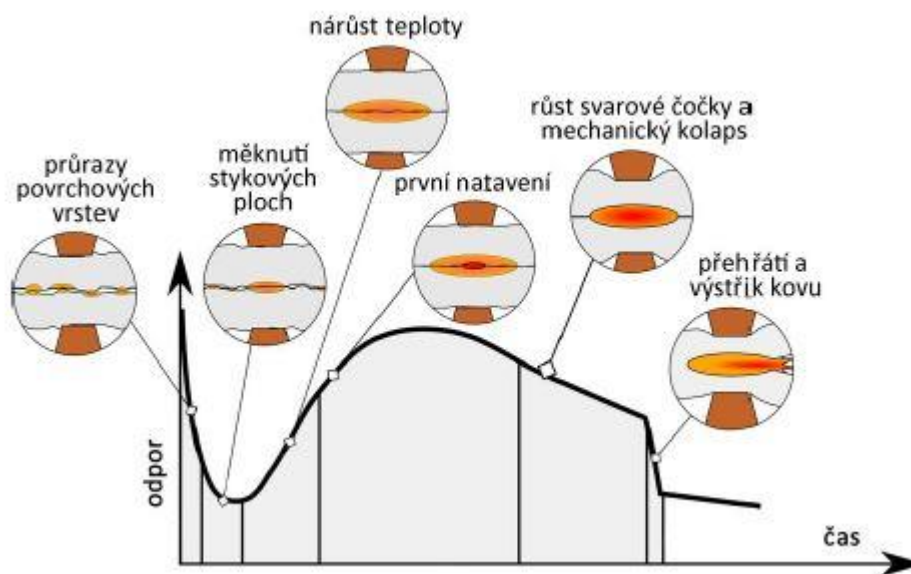
1.5.1 Metalurgický proces vzniku odporového svarového spoje

Pro každý svar vytvořený technologií bodového odporového svařování je typický intenzivní ohřev na teplotu tavení následovaný prudkým ochlazením. Současně jsou díly přitlačovány k sobě po celou dobu procesu. Ohřev způsobený

průchodem elektrického proudu základním materiálem a elektrickým odporem zapříčiňuje generování tepla přímo na rozhraní dílů [15] [19].

Přiměřeného objemu svarového kovu je dosaženo tehdy, pokud teplota tavení nepronikne na povrch svařovaných dílů a je soustředěna pouze ve středu budoucího svaru, v tzv. svarové čočce. Při správném nastavení svařovacích parametrů nastane proces tavení na rozhraní dílů a pokračuje do jejich středu. Útvar z nataveného materiálu pak připomíná tvar čočky. Norma ČSN EN ISO 14 373 uvádí, že průměr čočky má být symetrický a v rozmezí cca $3,5$ až $5 \cdot t^{1/2}$, kde t je tloušťka svařovaného materiálu a průměr svaru d (svarová čočka + tepelně ovlivněná oblast) je přibližně 1,15 krát větší než průměr čočky [15] [19] [21].

Grafické znázornění jednotlivých fází utváření svarové čočky při bodovém odporovém svařování v závislosti na průběhu elektrického odporu a času viz Obrázek 8.

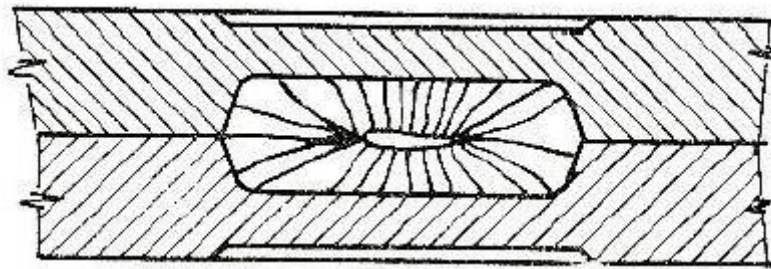


Obrázek 8 Schéma metalurgického procesu vzniku odporového bodového svarového spoje [22]

Do procesu zasahují chlazené měděné elektrody, které přivádějí elektrický proud a přitlačují svařované díly k sobě, čímž zabraňují výstřiku roztaveného kovu a plynů ven ze svaru. Zároveň podporují odvod tepla z materiálu, čímž brání jeho úplnému přetavení. Charakter utváření svaru lze považovat jako „uzavřený v tuhé,

kovové nádobě s omezeným přístupem vzduchu“. Charakter následného ochlazování lze pak přirovnat k ochlazování „oceli v kokile“. Původní struktura základního materiálu je však porušena roztavením kovu. Místo charakteristické struktury základního materiálu se objeví nové krystalografické útvary – dendrity [15] [19].

Orientace dendritů je identická se směrem odvodu tepla z povrchu svařovaných dílů. V místě, kde se ve svaru nejdéle udržel roztavený kov (ve středu svaru), se vytvoří dutinka mikroskopických rozměrů. Vytvoření dutinky je charakteristické pro každý bodový svar a nesmí se zaměnit s vadou či jinou nehomogenitou svaru [15] [19].



Obrázek 9 Schéma staženiny ve středu bodového svaru [19]



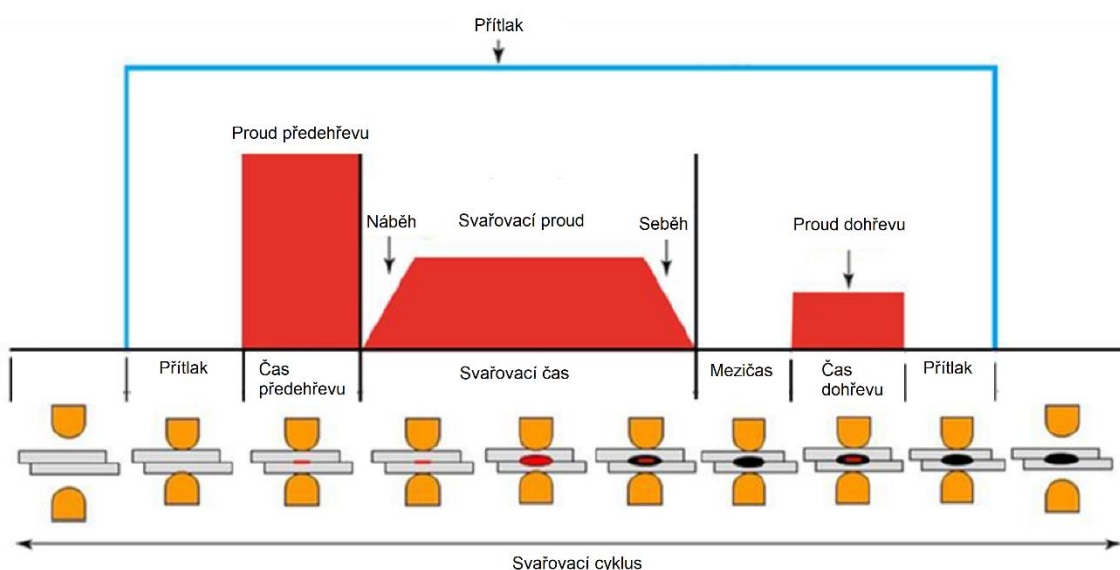
Obrázek 10 Mikrostruktura po bodovém odporovém svařování se staženinou uprostřed oceli 22MnB5

1.5.2 Svařovací cyklus a svařovací parametry

Výslednou kvalitu odporového svaru ovlivňuje celá řada parametrů. Základními svařovacími parametry bodového odporového svařování jsou: svařovací proud I_s [kA], svařovací čas t_s [ms], přítláčná síla P_s [kN]. Svařovací čas je také udáván v tzv. cyklech. Cyklus neboli perioda se vztahuje k jmenovité frekvenci elektrické sítě

(50 Hz pro Evropu, 60 Hz pro USA). Jedním cyklem je tedy myšlen svařovací čas 20 ms pro evropské země, případně 1/60 ms pro USA či Kanadu.

Svařovací cyklus (viz Obrázek 11) je soubor průběhů parametrů ve svařovacím cyklu. Svařovací cyklus se skládá z předehřevu, svařování a dohřevu. Velikost, náběh a seběh či pulzaci svařovacího proudu jednotlivých úseků svařovacího cyklu lze upravovat. Jednotlivé části lze také oddělit mezičasem. Úpravou svařovacího cyklu lze kromě optimalizace svařovacího procesu pro konkrétní materiál také docílit zvýšení mechanických vlastností svaru.



Obrázek 11 Svařovací cyklus [23]

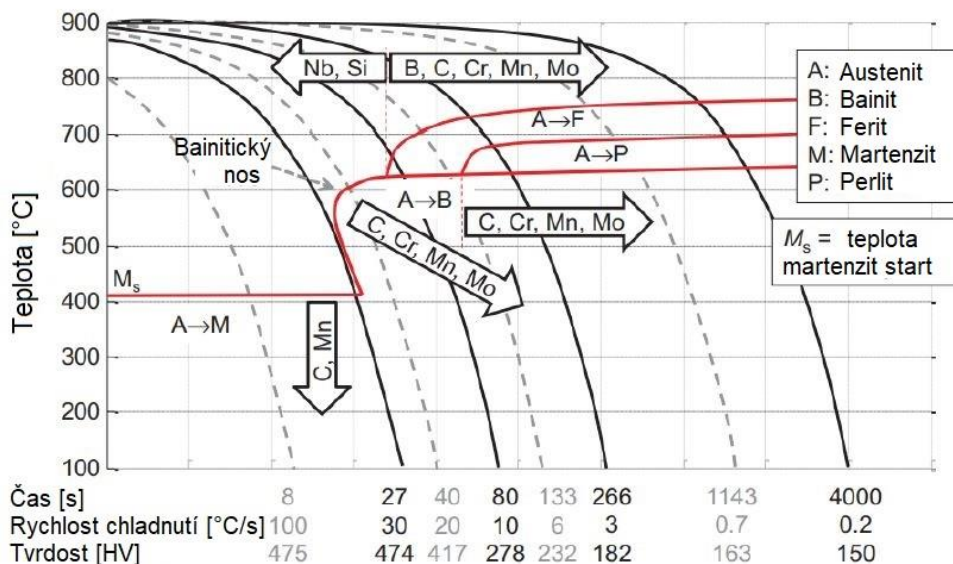
1.6 Vliv svařovacího cyklu na mechanické vlastnosti svaru

Po svařování bez zařazení předehřevu a dohřevu je mikrostruktura svaru u materiálu 22MnB5 obvykle martenzitická. Martenzitická struktura má za následek křehkost, a tak je snaha redukovat podíl martenzitické struktury v celkové mikrostruktuře [24].

Začleněním krátkého předehřevu s vysokým proudem lze docílit rozpuštění povrchové vrstvy, a tím docílení stabilnějšího svařovacího cyklu [25].

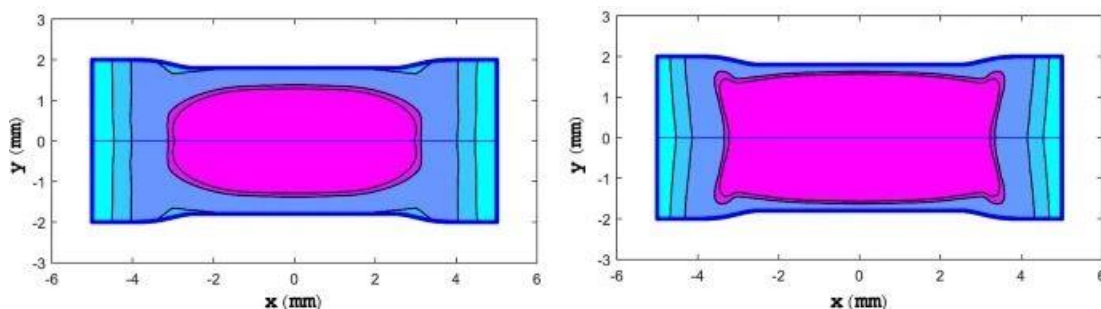
Zařazením dohřevu do svařovacího cyklu je snaha o změnu v mikrostruktuře v tepelně ovlivněné oblasti a tím dosažení příznivějších hodnot výsledných

mechanických vlastností svarového spoje. Pro pochopení strukturálních změn ve svaru a okolí je nutná znalost ARA diagramu (viz Obrázek 12).



Obrázek 12 ARA diagram oceli 22MnB5 s ochlazovacími křivkami a vlivem legur na posuv strukturální oblasti [26]

Výzkum [24] ukazuje zásadní vliv dohřevu na geometrii svarové čochky a její strukturu, a tedy na mechanické vlastnosti svarového spoje. Geometrie svarové čochky byla dohřevem pozitivně ovlivněna. Srovnání geometrie svarové čochky bez předehřevu a s předehřevem ukazuje Obrázek 13, na kterém je snímek ze simulace, jejíž výsledky byly následně potvrzeny metalografií skutečného vzorku. Dále je v práci uvedeno srovnání mikrostruktury svarového spoje bez předehřevu a s předehřevem. Svarový spoj bez předehřevu je z 97 % složen z martenzitu a pouze ze 3 % z bainitu. Zatímco svarový spoj po zařazení dohřevu vykazuje růst bainitické (až 7 %) i feritické struktury (až 4 %) [24].



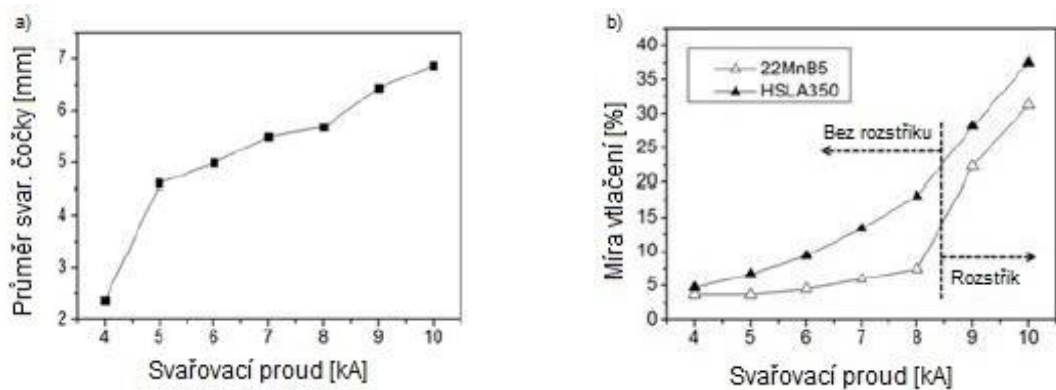
Obrázek 13 Srovnání geometrie svarové čochky bez dohřevu (vlevo) a s dohřevem (vpravo) [24]

1.7 Vliv svařovacích parametrů na geometrii svaru

Mechanické vlastnosti a módy porušení jsou závislé zejména na geometrii svarové čochky. Hlavními ukazateli kvality svaru jsou: průměr svarové čochky a míra vtisku svařovacích čepiček [27]. S rostoucím proudem roste množství dodaného tepla, a tak roste průměr svarové čochky (viz Obrázek 14a). Společně s ním však roste také míra vtisku čepiček a při překročení určité hodnoty dochází k rozstříku (viz Obrázek 14b). Míra vtisku svařovacích čepiček by u vyhovujícího svaru neměla přesáhnout 20 % tloušťky plechu. Obdobný vliv jako svařovací proud má také svařovací čas. S rostoucím časem roste množství dodaného tepla, a tudíž roste průměr svarové čochky a míra vtlačení svařovacích elektrod [27] [28].

Mírou vtisku je myšlena hloubka vtisku vztažená na tloušťku svařovaného materiálu.

Vliv má také složení materiálu a druh, případně absence, povrchové vrstvy [28].



Obrázek 14 Závislosti velikosti svarové čochky a míry vtisku (hloubky vtisku vztažené na tloušťku svařovaného materiálu) svařovacích čepiček na svařovacím proudu [27]

Výzkum [29] uvádí vztah pro ideální průměr svarové čochky: $d = 4,5 \cdot t^{1/2}$, kde d je průměr čochky a t je tloušťka svařovaného plechu v mm. Výzkum [30] ukazuje, že s rostoucí svarovou čochkou a tloušťkou plechu roste mez pevnosti bez ohledu na mód porušení. Za předpokladu, že nedošlo k defektu z důvodu rozstříku.

1.8 Módy porušení svarového spoje

Při destruktivních zkouškách se objevují různé typy porušení svarového spoje. Zdá se, že typ porušení má významný vliv na průběh křivky při tahové zkoušce. Plocha pod tahovou křivkou odpovídá energii potřebné k porušení svarového spoje [31] [32].

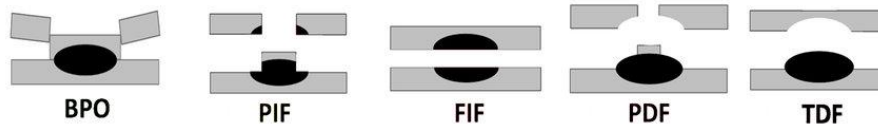
Výzkumy [31], [32] uvádí 5 módů porušení svarového spoje (viz Obrázek 15).

BPO (button pullout) – k porušení dochází v tepelně ovlivněné oblasti jednoho z plechů a svarová čochka zůstává neporušená.

PIF (partial interfacial failure) – dochází k částečnému porušení svarové čochky na styku plechů.

FIF (full interfacial failure) – k porušení dochází uprostřed čochky, tedy v místě styku plechů a dochází k destrukci svarové čochky.

PDF, TDF (partial dome failure, total dome failure) – porušení vede po hranici svarové čochky a tepelně ovlivněné oblasti.



Obrázek 15 Schéma módů porušení odporového svarového spoje [32]

Z hlediska nárazové bezpečnosti je kromě vysoké pevnosti kladen na materiál požadavek na co největší množství absorbované energie. Jeden z hlavních faktorů ovlivňující dynamické chování svarového spoje je tedy mód porušení. U manganbórových ocelí je nejčastěji pozorovaným módem porušení mód FIF. Z hlediska mechanických vlastností je mód FIF nejméně příznivý [31] [32].

2 Cíle práce

Mechanické vlastnosti svarových spojů manganbórových ocelí, v současné době již běžně používaných v automobilovém průmyslu, teoreticky lze stále zlepšovat. Z předchozích kapitol vyplývá, že svařovací cyklus má zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti svarového spoje.

Cílem této diplomové práce je analyzovat vliv parametrů na mikrostrukturu svaru a tepelně ovlivněné oblasti. Docílit mikrostruktury s nejvyšší pevností při zachování dostatečné houževnatosti. Navrhnout svařovací cyklus tak, aby došlo ke zlepšení mechanických vlastností svarového spoje. A nakonec analyzovat data z předchozích diplomových a bakalářských prací a dát do souvislostí vliv jednotlivých parametrů na mechanické vlastnosti svarového spoje. Všechna data byla získána z prací vytvořených na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT.

3 Experimentální část

Experimentální část byla zaměřena na návrh parametrů svařovacích cyklu se začleněním dohřevu za účelem zvýšení mechanických vlastností bodového odporového spoje materiálu 22MnB5. Pro hlubší pochopení problematiky byla analyzována data z přechozích prací zaměřených na stejný materiál, svařený různými svařovacími cykly a byly vytvořeny souvislosti mezi jednotlivými parametry svařovacího cyklu a jejich vlivy na mechanické vlastnosti svarového spoje materiálu 22MnB5.

Tepelné zpracování: Nejprve bylo nutné najít nejvhodnější mikrostrukturu, které bychom chtěli dosáhnout v tepelně ovlivněné oblasti. Za tímto účelem bylo provedeno tepelné zpracování (austenitizace + popouštění) základního materiálu. Tepelné zpracování mělo simulovat teplotní cyklus materiálu při samotném svařování, zejména při dohřevu. Na základě ARA diagramu pro ocel 22MnB5 byl zvolen průběh teploty při tepelném zpracování, podle kterého se teoreticky dosáhne požadované mikrostruktury. Pro tepelné zpracování byly zvoleny 3 teploty a 5 časů výdrže na teplotě.

Analýza tepelně zpracovaných plechů: Následně byla provedena tahová zkouška tepelně zpracovaných plechů, při které byl měřen průběh síly a deformace. Z tahových zkoušek byla vyhodnocena mez pevnosti, průběh napětí a deformace, tažnost a také plocha pod křivkou tahového diagramu. Dále byla provedena metalografie roztrhaných vzorků, vyhodnocena mikrostruktura a změřena tvrdost. Výsledky byly porovnány a byla vybrána teplota a doba výdrže s optimálními mechanickými vlastnostmi a vhodnou mikrostrukturou pro výsledný svarový spoj, respektive jeho tepelně ovlivněnou oblast.

Analýza svarů z předchozích prací: Z předchozích prací byly vybrány vzorky svařené obdobnými parametry a bylo analyzováno místo a způsob porušení svarových spojů. Na základě této analýzy byla určena přibližná vzdálenost od hranice svarové čočky, ve které chceme docílit výše zmíněné mikrostruktury.

Simulace: Byly provedeny simulace v softwaru Simufact Welding, aby byla zjištěna citlivost typu mikrostruktury na změnu určitého parametru a tím došlo ke snížení počtu variant parametrů ve finálním experimentu. Dále bylo nutné nasimulovat svařovací cyklus tak, aby výsledkem byla zmíněná mikrostruktura. Tedy svázat teplotní průběh zjištěný při tepelném zpracování s parametry reálného svařovacího cyklu, zejména s průběhem proudu.

Zhotovení reálných svarů: Na základě simulací byly navrženy parametry pro reálný experiment.

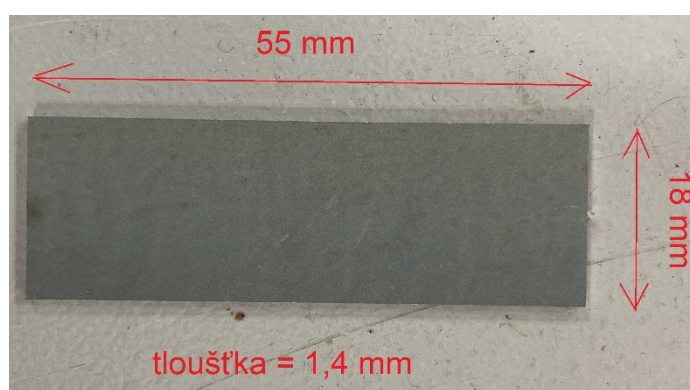
Analýza reálných svarů: Výsledné svary byly podrobeny tahové zkoušce, měření tvrdosti a dále metalografii. Výsledky byly analyzovány a byl stanoven vliv dohřevu na mechanické vlastnosti svarového spoje materiálu 22MnB5.

Analýza dat z přechozích prací: Pro získání souvislostí a hlubší pochopení problematiky bodového odporového svařování materiálu 22MnB5 byly analyzovány data z prací vytvořených na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT. V rámci těchto prací byly zhotoveny svary ze stejného materiálu. Byly porovnány mechanické vlastnosti svarových spojů zhotovených různými svařovacími cykly, ale taky režimy a parametry.

Nakonec byly vytvořeny souvislosti mezi jednotlivými parametry svařovacího cyklu a jejich vlivy na mechanické vlastnosti bodového odporového spoje materiálu 22MnB5.

3.1 Materiál použitý pro experiment

Jako materiál byla zvolena vysokopevná manganbórová ocel 22MnB5, konkrétně ocel s označením MBW1500 od výrobce Thyssenkrupp. Plechy (viz Obrázek 16) s tloušťkou 1,4 mm byly dodány s povlakem Al-Si (výrobce značeno AS). Materiál poskytla společnost Škoda Auto a.s. Tabulka 3, Tabulka 4, Tabulka 5 obsahují chemické složení, mechanické vlastnosti před tepelným zpracováním a mechanické vlastnosti po tepelném zpracování. Tyto hodnoty jsou uvedeny výrobcem a jejich ověření nebylo předmětem této práce.



Obrázek 16 Použitý plech oceli MBW1500

Tabulka 3 Chemické složení oceli MBW1500 dle výrobce [7]

prvek	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr+Mo	Ti	B
hm. %	0,25	0,40	1,40	0,025	0,010	> 0,015	0,50	0,05	0,005

Tabulka 4 Mechanické vlastnosti oceli MBW1500 v dodávaném stavu dle výrobce [7]

Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]
350–500	500–700	12

Tabulka 5 Mechanické vlastnosti oceli MBW1500 ve stavu po procesu tváření za tepla dle výrobce [7]

Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]
1000	1500	5

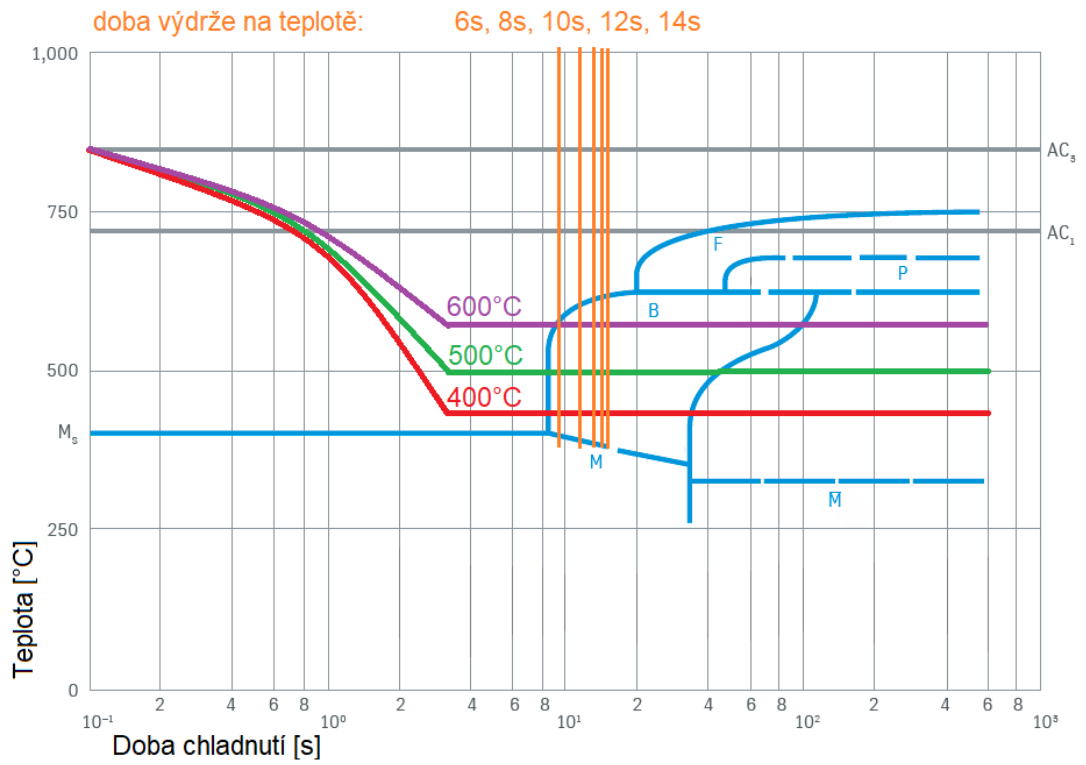
3.2 Použitá zařízení a parametry procesů

3.2.1 Použitá zařízení, parametry a postup tepelného zpracování

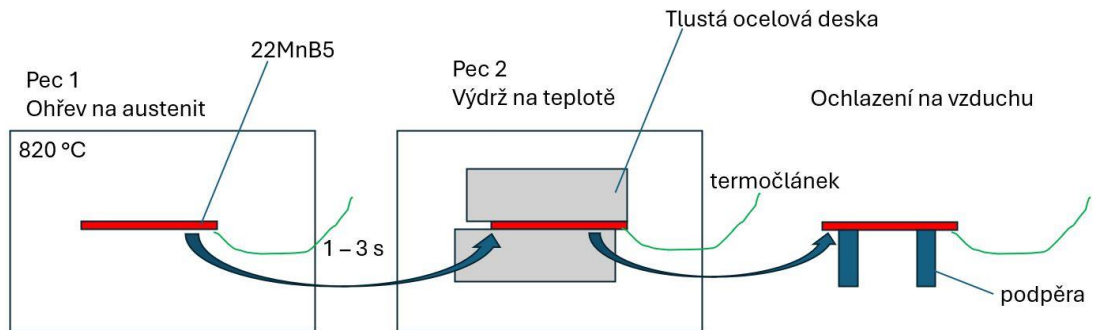
Na základě ARA diagramu (viz Obrázek 17) pro ocel 22MnB5 byl navržen postup (viz Obrázek 18) pro tepelné zpracování. Varianty tepelného zpracování jsou shrnuty v tabulce, viz Tabulka 6. Pro každou variantu byly tepelně zpracovány dva vzorky z důvodu ověření výsledků. Na vzorky byly připevněny termočlánky, pomocí kterých byla snímána teplota plechů v reálném čase. Vzorky byly postupně vkládány do pece, kde dosáhly teploty nad teplotu AC_3 , následně byly vzorky ochlazeny na požadovanou teplotu dohřevu (400, 500 a 600 °C) a vloženy do druhé pece, kde byly na této teplotě udržovány zvolenou dobu (6, 8, 10, 12 a 14 s). Poté byly vzorky vyjmuty z druhé pece a chlazeny na vzduchu. Postup byl zvolen jako simulace podmínek dohřevu při samotném svařování a za účelem zjištění vhodných teplot dohřevu pro docílení požadované mikrostruktury v tepelně ovlivněné oblasti.

Tabulka 6 Varianty tepelného zpracování a jejich značení

Značení vzorků	Doba výdrže na teplotě [s]				
Teplota [°C]	6	8	10	12	14
400	4_6_1	4_8_1	4_10_1	4_12_1	4_14_1
	4_6_2	4_8_2	4_10_2	4_12_2	4_14_2
500	5_6_1	5_8_1	5_10_1	5_12_1	5_14_1
	5_6_2	5_8_2	5_10_2	5_12_2	5_14_2
600	6_6_1	6_8_1	6_10_1	6_12_1	6_14_1
	6_6_2	6_8_2	6_10_2	6_12_2	6_14_2



Obrázek 17 Schéma průběhu teploty plechu při tepelném zpracování



Obrázek 18 Schéma tepelného zpracování

3.2.2 Použitá zařízení a postup tahové zkoušky, metalografie a měření tvrdosti tepelně zpracovaných plechů

Mechanické vlastnosti tepelně zpracovaných vzorků byly zjištěny tahovou zkouškou a měřením tvrdosti. Mikrostruktura byla zjištěna metalografií.

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji LaborTech typ LabTest 5.100SP1. Deformace byly měřeny pomocí bezkontaktního optického systému GOM ARAMIS 4M. Z tahové zkoušky byly zjištěny závislosti síly na deformaci vzorku a následně byly vyhodnoceny tažnosti, maximální napětí a maximální síly potřebných na přetržení vzorků a plochy pod křivkou diagramu napětí-deformace.

Byly analyzovány módy porušení přetržených plechů. Dále byly provedeny výbrusy, které byly následně naleptány pro analýzu mikrostruktury tepelně zpracovaných vzorků.

Nakonec byla na vzorcích měřena tvrdost podle Vickerse HV1 na tvrdoměru BUEHLER Indentemet 1104, Vickers.

Výsledky tahové zkoušky, měření tvrdosti a mikrostruktura jednotlivých vzorků byly mezi sebou porovnány a následně byl vybrán vzorek s nejhodnějšími vlastnostmi.

3.2.3 Použitý software a postup simulací

Na základě výsledků z tepelného zpracování byl vybrán vzorek s nejhodnějšími mechanickými vlastnostmi a vhodnou mikrostrukturou.

Jedním z cílů simulací bylo zjistit citlivost typu mikrostruktury na změnu určitého parametru pro snížení počtu variant parametrů při svařování.

Dále bylo třeba nasimulovat svařovací cyklus tak, aby výsledkem byl průběh teploty, který se co nejvíce přiblíží průběhu teploty při tepelném zpracování zvoleného vzorku.

Z toho důvodu bylo nutné nejprve provést simulace pro vytvoření souvislostí mezi průběhem svařovacího proudu a průběhem teploty v konkrétním místě plechu. Simulace byly provedeny v softwaru Simufact Welding.

Nejprve byl získán soubor parametrů pro co nejbližší přiblížení teplotnímu cyklu při tepelném zpracování. Následně byly brány v potaz omezení v nastavitelných parametrech použitého svařovacího stroje. Výsledkem simulací byl soubor svařovacích parametrů, které byly poté použity pro samotné svařování.

3.2.4 Použitá zařízení, postup a parametry svařování

Samotné svařování proběhlo na pneumaticky poháněném odporovém lisu DALEX PMS 11-4. Svařovací zdroj je MFDC středofrekvenční 1000 Hz invertor. Lis má řídicí jednotku MEGA 1 MF 13Z64P QSF/S se softwarem SER MEGA 2 a chladicí zařízení PL 80/100 Cool-3 o výkonu 2,7 kW s uzavřeným oběhem.

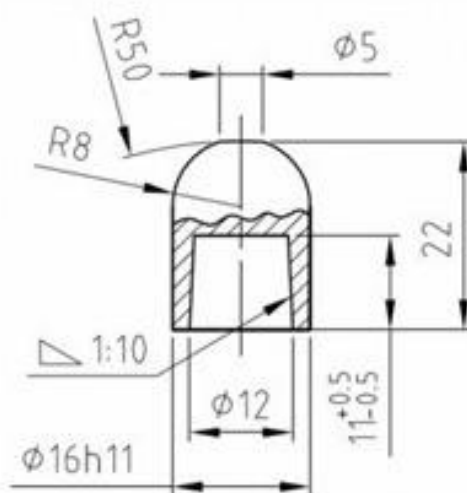
Tabulka 7 Štítek stroje DALEX PMS 11-4

Typ	SM 677 66 1
Sériové číslo	AZM/N-33887
Jmenovitý výkon	180 kW
Jmenovité primární napětí	400 V
Svařovací výkon	246 kW
Napětí naprázdno	0–9 V
Zkratový proud	42,2 kA
Maximální svařovací proud	33,8 kA
Průtok chladicí vody	12 l/min
Přítlačná síla elektrod	0,2 - 6 kN
Hmotnost	615 kg
Délka výložníku ramen	550 mm
Vzdálenost mezi rameny	115–415 mm
Poloha svařování	Vertikální
Pohon svařovací hlavy	Pneumatický



Obrázek 19 Svařovací lis DALEX PMS 11-4

Vyměnitelné elektrodové čepičky použité pro experiment mají označení Typ 39 D 1978-2 podle interního předpisu WV. Tyto čepičky jsou určeny pro automobilový průmysl a jsou z materiálu CuCr1Z s chemickým složením 98,98 % Cu, 0,9 % Cr, 0,12 % Zr. Označení materiálu čepiček dle normy je ČSN EN ISO 5182–A 2/2. Geometrie elektrodových čepiček viz Obrázek 20.



Obrázek 20 Geometrie elektrodové čepičky 39 D 1978-2

Pro hlavní část svařovacího cyklu byly použity optimalizované parametry. Proces optimalizace svařovacího cyklu pro použitý svařovaný materiál byl proveden v rámci předchozích prací na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT.

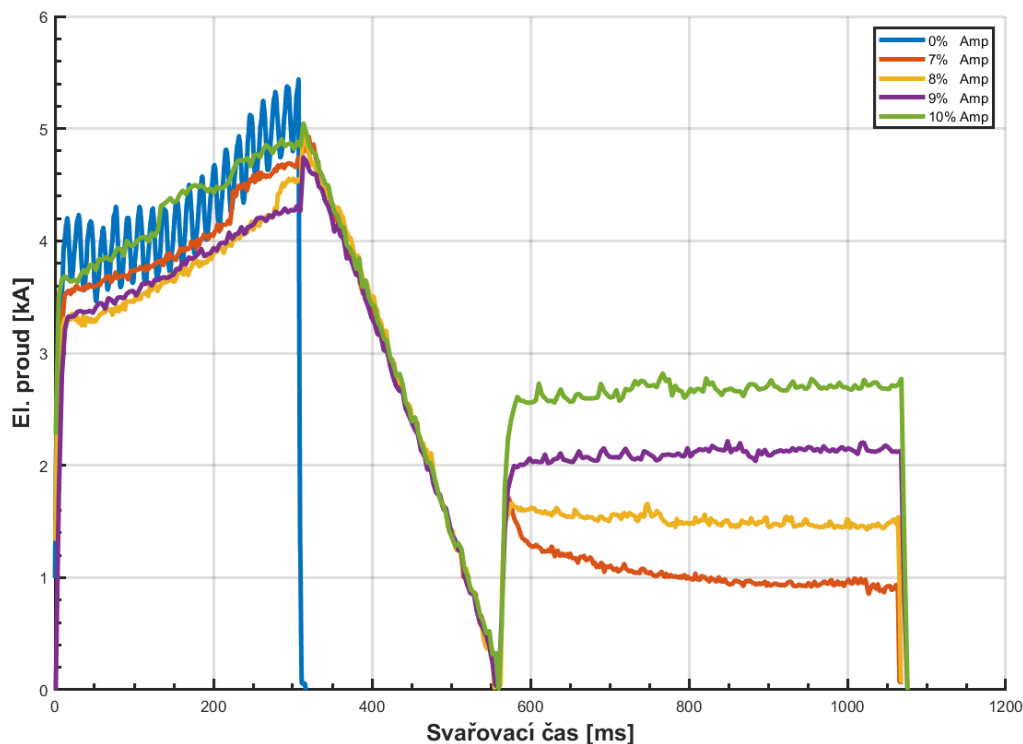
Upravené simulace ukázaly, že pokud jsou parametry nastaveny v limitech stroje, zásadní vliv na teplotní průběh má pouze proud dohřevu. Zbytek parametrů byl tedy nastaven pro všechny varianty stejný dle výsledků simulací. Následně byly, na základě simulací a možností nastavení stroje, zvoleny konkrétní parametry pro dohřev. Parametry celého svařovacího cyklu jsou shrnuty do tabulky, viz Tabulka 8.

Nejprve byly vzorky svařeny parametry optimalizovanými v předchozích pracích bez zařazení dohřevu (Tabulka 8, vzorek E), (Obrázek 21, modrý průběh) za účelem pozdějšího porovnání. Poté byly svařeny vzorky s variantami proudu dohřevu (Tabulka 8, vzorky A, B, C, D), (Obrázek 21, fialový, zelený, žlutý a červený průběh).

Tabulka 8 Parametry svařování

	Značení	A	B	C	D	E
Hlavní část svařovacího cyklu	SU _s [ms]	strojový	strojový	strojový	strojový	strojový
	t _s [ms]	310	310	310	310	310
	I _s [%]	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
	SD _s [ms]	250	250	250	250	strojový
	Mezičas [ms]	0	0	0	0	0
Dohřev	SU _d [ms]	strojový	strojový	strojový	strojový	0
	t _d [ms]	5000	5000	5000	5000	0
	I _d [%]	10	9	8	7	0
	SD _d [ms]	strojový	strojový	strojový	strojový	0
	F [kN]	3	3	3	3	3

Pozn.: strojový – nejkratší prodleva umožněná strojem, SU – náběh (slope up), SD – seběh (slope down)



Obrázek 21 Průběh svařovacího proudu

V tabulce, viz Tabulka 8, jsou uvedeny hodnoty proudu v % z maximálního výkonu stroje, jelikož jsou v těchto jednotkách nastavovány na stroji. Reálný průběh měřených hodnot je vidět na obrázku, viz Obrázek 21. Reálné hodnoty byly měřeny analyzátozem svařovacích parametrů TECNA 1700.

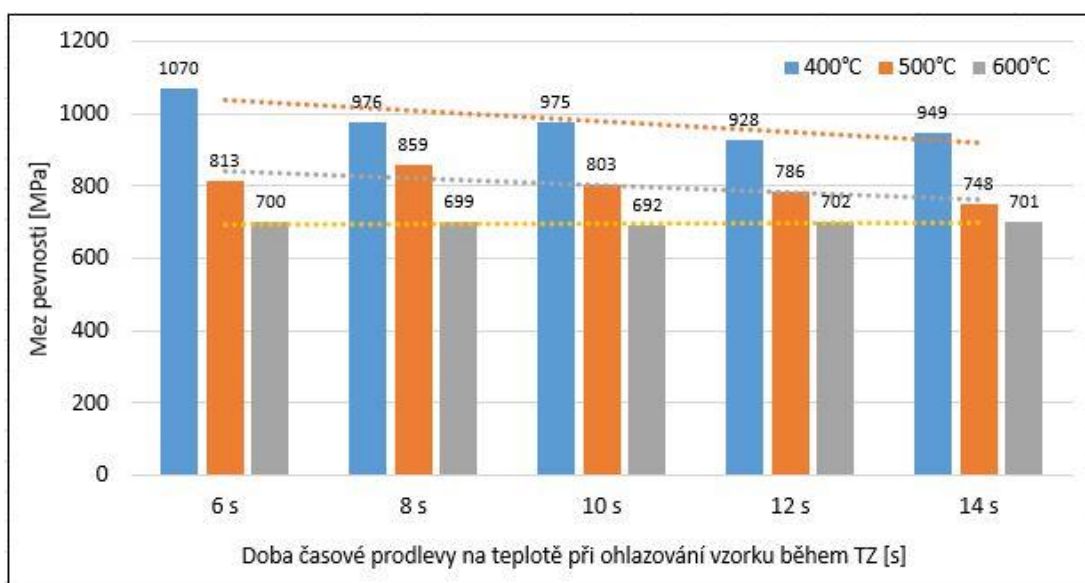
3.2.5 Použitá zařízení a postup tahové zkoušky, metalografie a měření tvrdosti svařených plechů

Svařené vzorky byly podrobeny tahové zkoušce a měření tvrdosti a byla provedena metalografie. Pro zmíněné zkoušky byly použity stejné stroje a obdobné postupy jako pro tepelně zpracované plechy. Z tahové zkoušky byla získána závislost síly a deformace. Dále byly změřeny průměry svarových čoček jednotlivých vzorků dle normy ČSN EN ISO 14 270. Ze sil změřených při tahové zkoušce a změřených průměrů byla získána závislost napětí a deformace plechů. Pomocí metalografie byla analyzována mikrostruktura svarové čochky a tepelně ovlivněné oblasti a dále analyzován způsob a místo iniciace trhliny. Nakonec byla změřena tvrdost svařených vzorků. Výsledky testů jednotlivých vzorků byly porovnány mezi sebou.

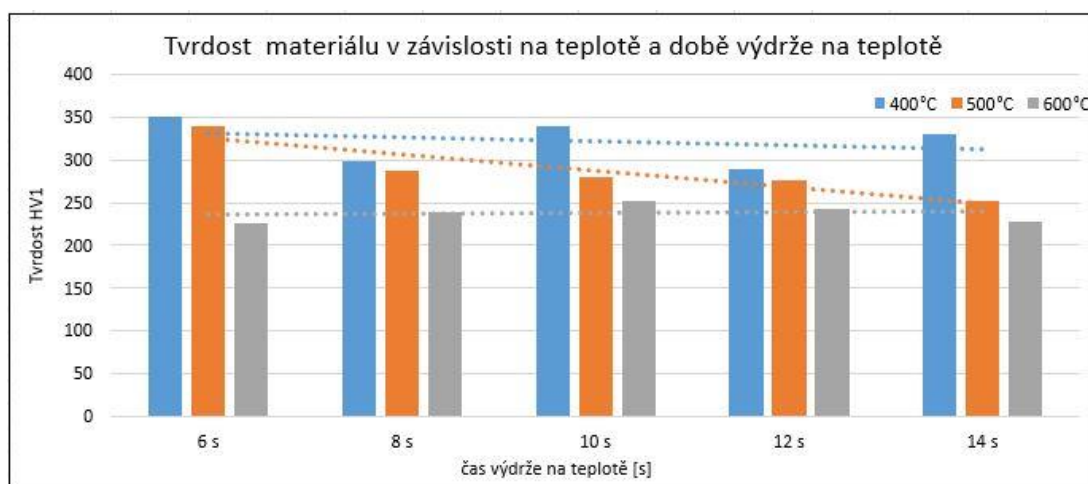
3.3 Rozbor výsledků

3.3.1 Výsledky tepelného zpracování

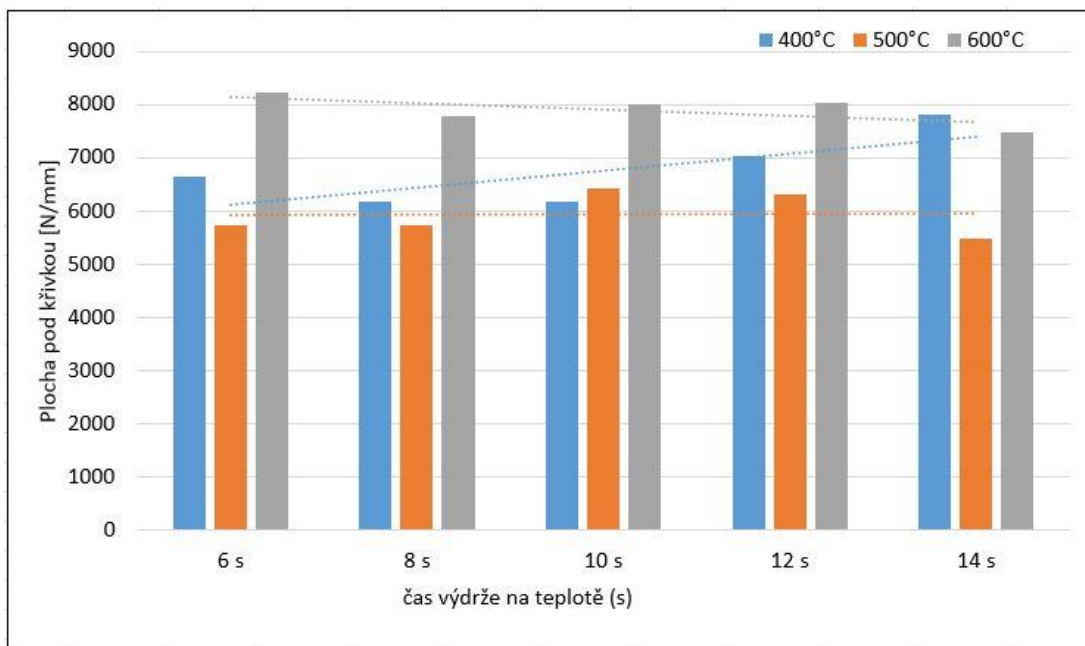
Nejprve byla vyhodnocena mikrostruktura, viz Tabulka 9 a následně byly porovnány mechanické vlastnosti, viz Obrázek 22, Obrázek 23, Obrázek 24, Obrázek 25. Na základě porovnání mechanických vlastností byla zvolena nejvhodnější mikrostruktura.



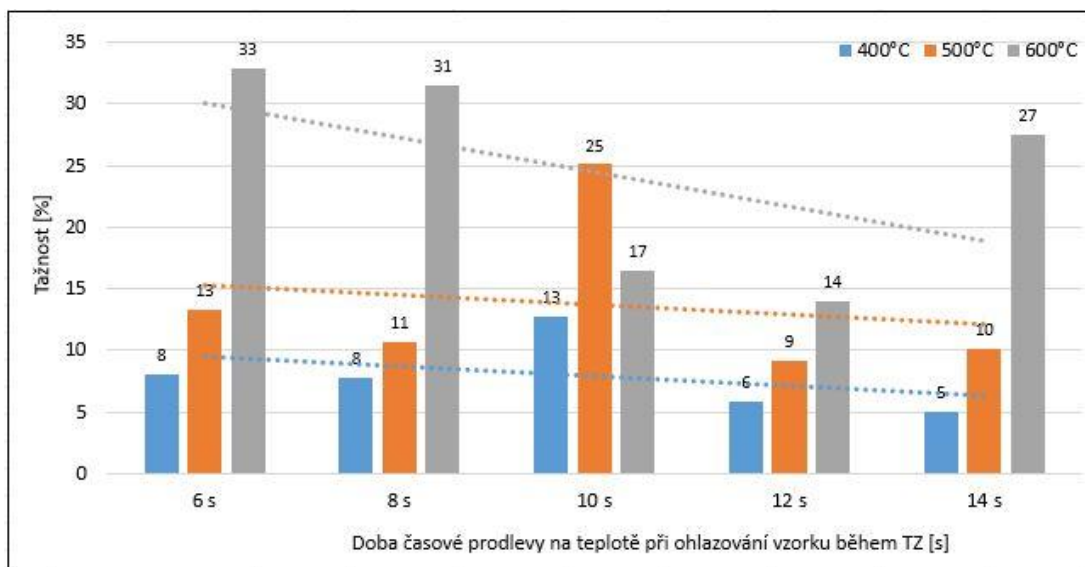
Obrázek 22 Srovnání meze pevnosti plechů jednotlivých variant tepelného zpracování



Obrázek 23 Srovnání tvrdosti plechů jednotlivých variant tepelného zpracování

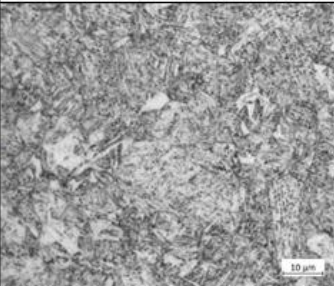
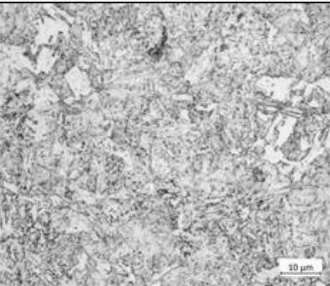
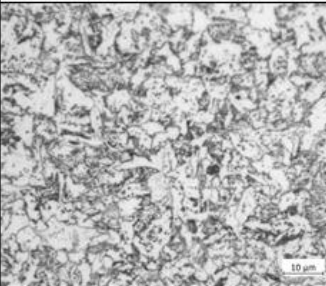
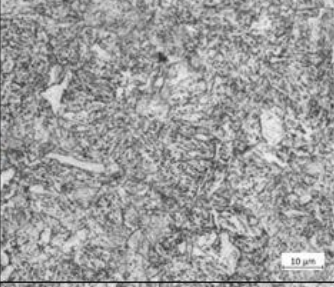
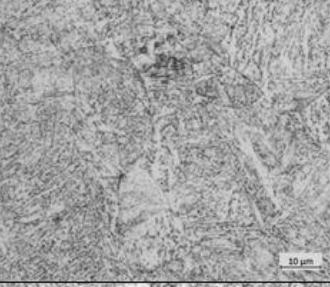
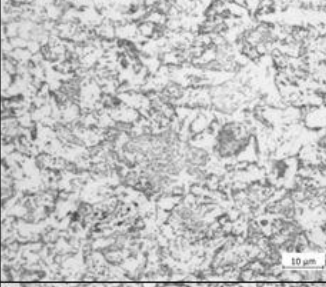
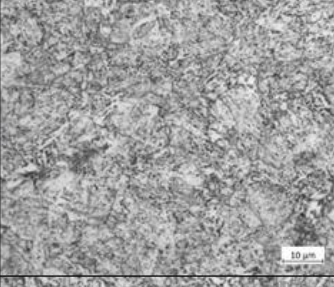
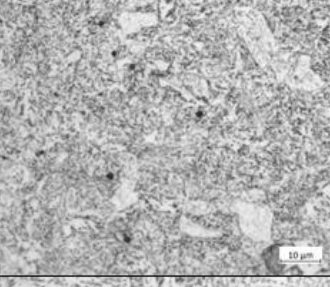
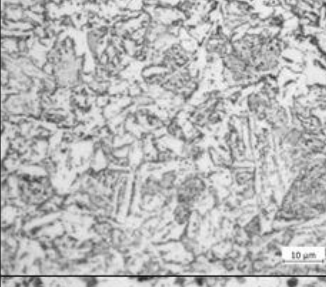
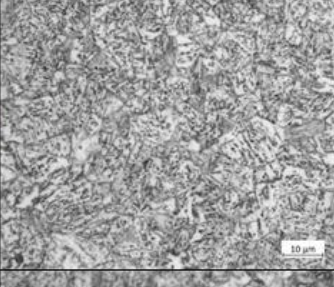

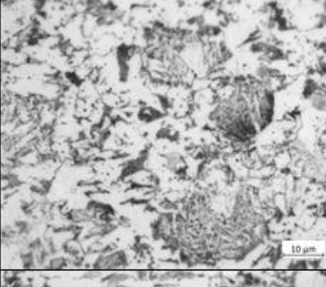
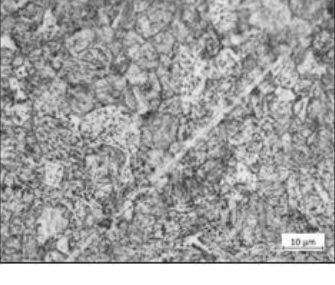
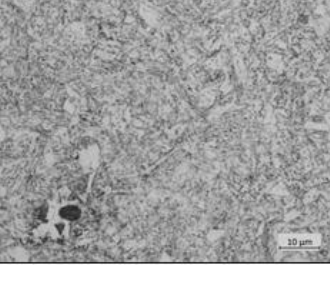
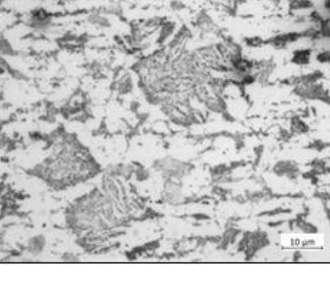


Obrázek 24 Srovnání ploch pod křivkou napětí-deformace plechů jednotlivých variant tepelného zpracování



Obrázek 25 Srovnání tažnosti plechů jednotlivých variant tepelného zpracování

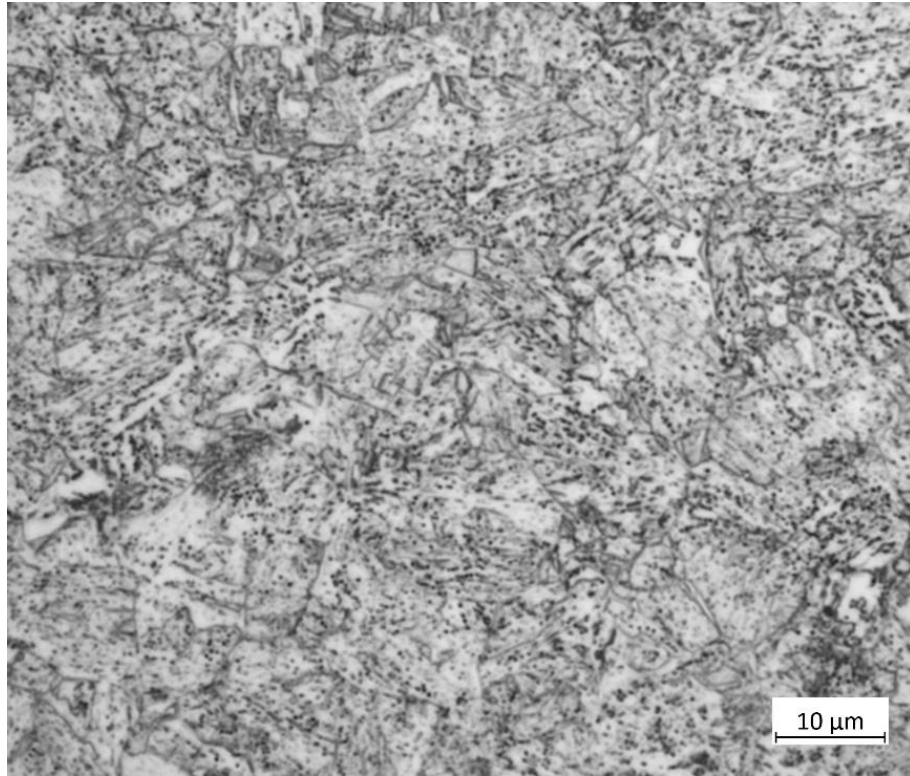
Tabulka 9 Mikrostruktura plechů jednotlivých variant tepelného zpracování

		Mikrostruktura		
		Teplota [°C]		
		400	500	600
Výdrž na teplotě [s]	6			
	8			
	10			
	12			
	14			

Mikrostruktura plechu varianty 400 °C/6s je pravděpodobně nízkouhlíkový martenzit, čemuž odpovídá i nižší tvrdost. Struktura obsahuje zbytkový austenit (drobné šedé útvary), individuální feritická zrna a drobné globule karbidů nebo boridů. S narůstajícím časem výdrže na teplotě se struktura příliš nemění, avšak dochází ke hrubnutí zrna a tvorbě zmíněných karbidů či boridů. S rostoucí teplotou narůstá množství feritu ve struktuře. Až při teplotě 600 °C a dobou výdrže na teplotě 14 sekund je struktura v podstatě feritická s obsahem globulárního perlitu a velkého množství větších karbidů či boridů. Základní materiál bez tepelného zpracování je velmi jemnozrný martenzit se zbytky feritu.

Požadavkem na mechanické vlastnosti je mít ve zvoleném místě materiál s vyšší pevností a dostatečnou houževnatostí, aby proces porušení spotřeboval co nejvíce energie. Varianty tepelného zpracování na teplotě 600 °C mají příliš vysokou houževnatost, čemuž odpovídá vysoká tažnost i vyhodnocení plochy pod křivkou napětí-deformace těchto vzorků. Velké množství houževnatosti vykazují i lomové plochy těchto vzorků. Mezi vzorky tepelně zpracovaných na teplotě 400 °C a 500 °C není z hlediska houževnatosti zásadní rozdíl. Tvrdost vzorků tepelně zpracovaných na teplotě 400 °C dosahuje nejvyšších hodnot a je u všech dob výdrže přibližně stejná (s nárůstem doby výdrže nepatrně klesá vlivem hrubnutí zrna). U vzorků zpracovaných na teplotě 500 °C je tvrdost nižší a má výrazný klesající trend s narůstajícím časem výdrže. U vzorků zpracovaných na teplotě 600 °C jsou hodnoty tvrdosti nejnižší a u všech dob výdrže v podstatě stejné. To koresponduje i s hodnotami meze pevnosti.

Z těchto důvodů byla jako nejvhodnější mikrostruktura v místě porušování vzorků zvolena mikrostruktura vzorku s tepelným zpracováním na teplotě 400 °C a době výdrže 10 s (viz Obrázek 26). Mez pevnosti je stále vysoká, ale houževnatost příliš nenarostla.

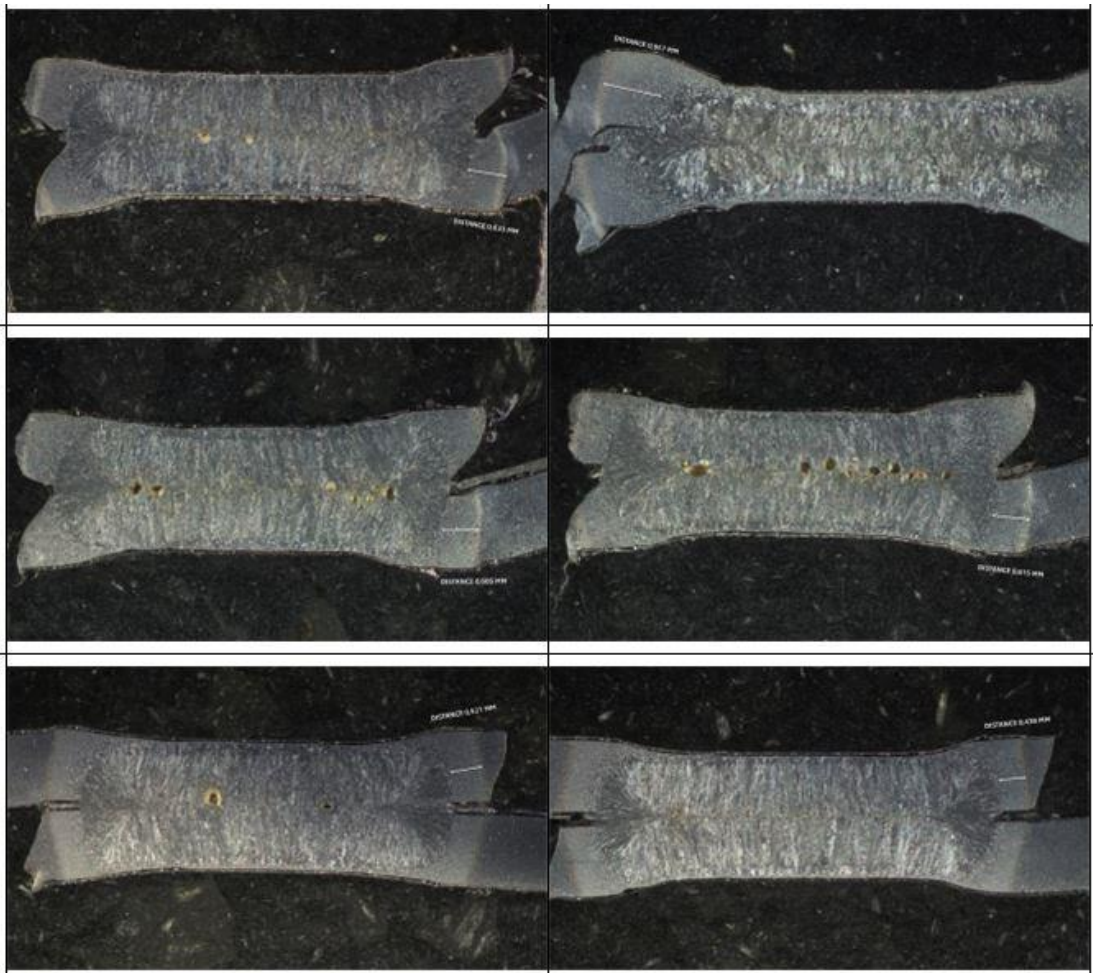


Obrázek 26 Zvolená mikrostruktura (teplota 400 °C, výdrž 10 s)

3.3.2 Analýza místa porušení svarů z předchozích prací

Byly použity vzorky z předchozích prací vedených na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT a nově na nich byla provedena metalografie [31] [33] [34].

Z analýzy místa porušení plechů (viz Obrázek 27) ze stejné oceli svařených obdobnými parametry v předchozích pracích na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT vyplynulo, že místo iniciace lomu se většinou nacházelo na hranici tepelně ovlivněné oblasti. Bylo změřeno, že místo iniciace trhliny (hranice tepelně ovlivněné oblasti) se nacházelo mezi 0,4–1 mm od okraje svarové čochky. Tato oblast je tedy ta, ve které chceme docílit výše zmíněné mikrostruktury za účelem zvýšení mechanických vlastností.



Obrázek 27 Některé vzorky vybrané z předchozích prací pro analýzu místa porušení

3.3.3 Výsledky simulací

Po analýze výsledků zkoušek tepelně zpracovaných vzorků byl znám konkrétní průběh teploty, kterého chceme docílit v průběhu svařování. Cílem simulací bylo zjistit, které svařovací parametry nejvíce ovlivňují teplotní průběh a následně zjistit přibližné hodnoty pro co nejbližší imitaci konkrétního teplotního průběhu.

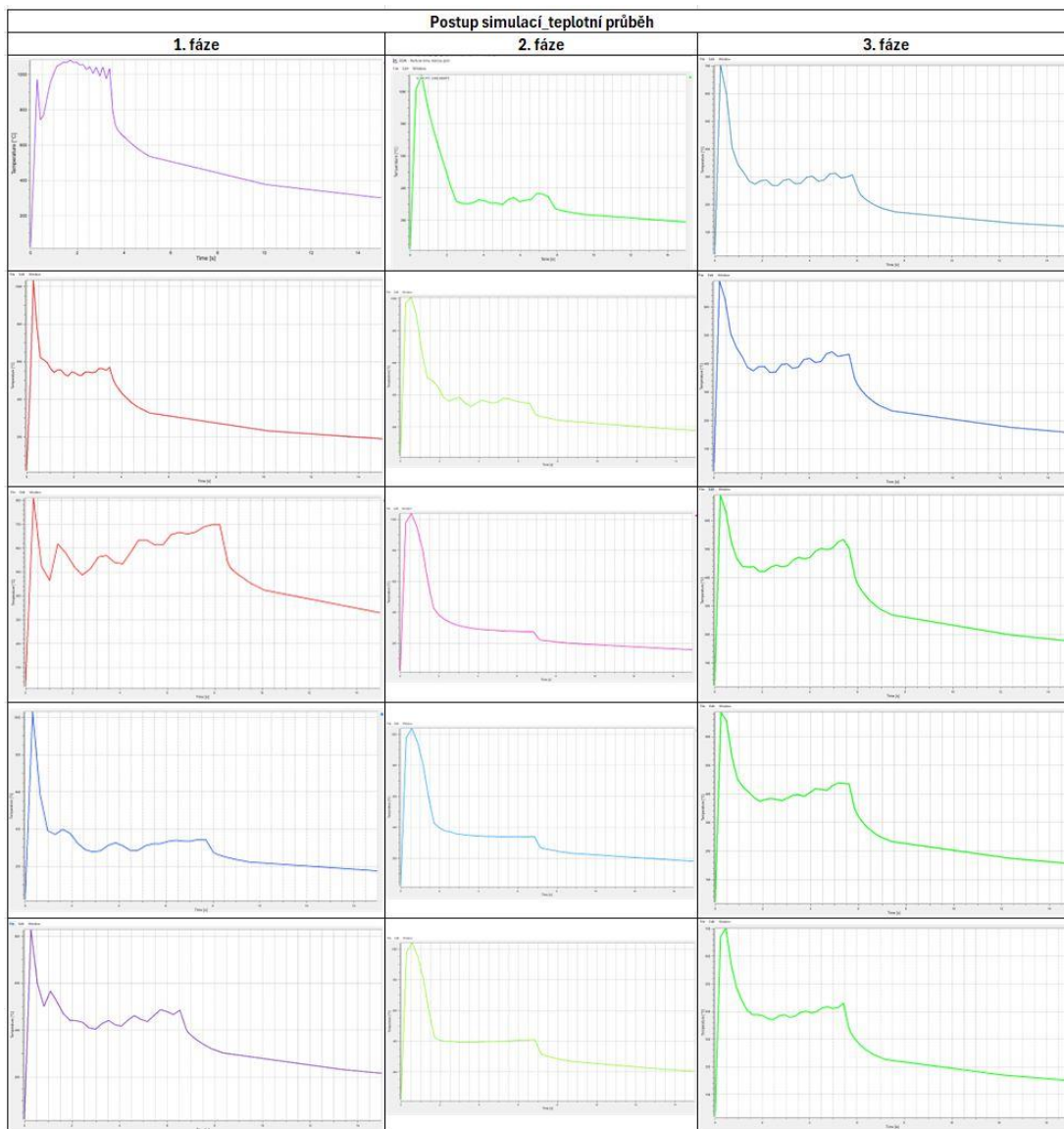
Hlavní svařovací cyklus byl známý a optimalizovaný v předchozích pracích na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT. Tato diplomová práce se tedy zabývala svařovacím cyklem bez alternace hlavní části svařovacího cyklu. Parametry, které byly v simulacích měněny byly: seběh hlavní části svařovacího cyklu, mezičas mezi hlavní částí a dohřevem a náběh, seběh a velikost proudu dohřevu a čas dohřevu (viz Obrázek 11).

Simulace byly rozděleny do třech fází. V první fázi bylo zjištěno, které parametry nejvíce ovlivňují teplotní průběh při svařování, aby byl snížen počet variant při finálním svařování.

V druhé fázi byly zjištěny parametry svařovacího procesu, které teoreticky docílí konkrétního teplotního průběhu.

V poslední fázi byly pak nalezeny parametry, které docílí teplotní průběh co nejvíce se blížící požadovanému, avšak spadající do intervalu limitních parametrů stroje.

Tabulka 10 Postup jednotlivých fází simulací – teplotní průběh



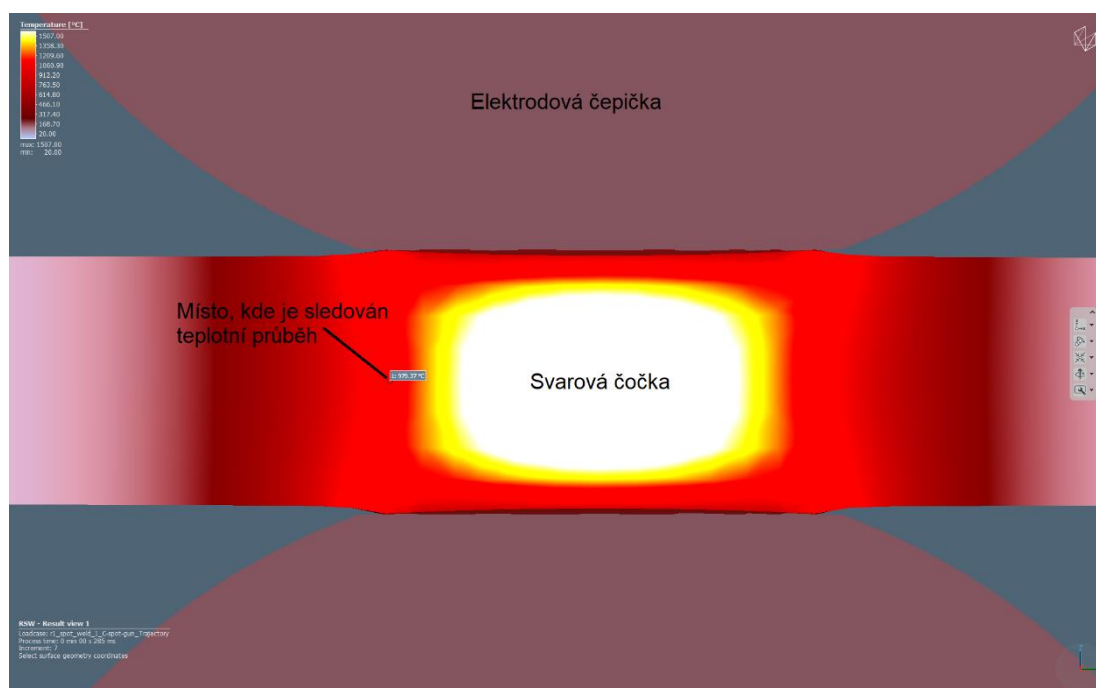
Na základě výsledků první fáze simulací bylo zřejmé, že největší vliv na teplotní cyklus má velikost proudu dohřevu a jeho čas trvání. Dalšími důležitými parametry byly také seběh hlavního svařovacího proudu, mezičas a dále také náběh a seběh dohřevové části svařovacího proudu.

V druhé fázi bylo v podstatě dosaženo požadovaného teplotního průběhu.

Ve třetí fázi byla simulace nastavena dle rozmezí parametrů nastavitelných na reálném svařovacím stroji (zejména časové prodlevy jednotlivých částí svařovacího cyklu byly příliš dlouhé). Při simulování svařovacího procesu, kde byly parametry

nastaveny dle omezujících podmínek stroje bylo zjištěno, že zásadní vliv na průběh teploty má v daných rozsazích pouze proud dohřevu.

Dalšími simulacemi byly optimalizovány všechny parametry (kromě proudu dohřevu) na hodnoty, které se při samotném svařování neměnily mezi variantami. Jedinou proměnnou tak zůstal proud dohřevu, jehož vliv byl analyzován na základě reálného svařování.



Obrázek 28 Simulovaný svařovací cyklus s vyznačeným místem, kde byl sledován teplotní průběh

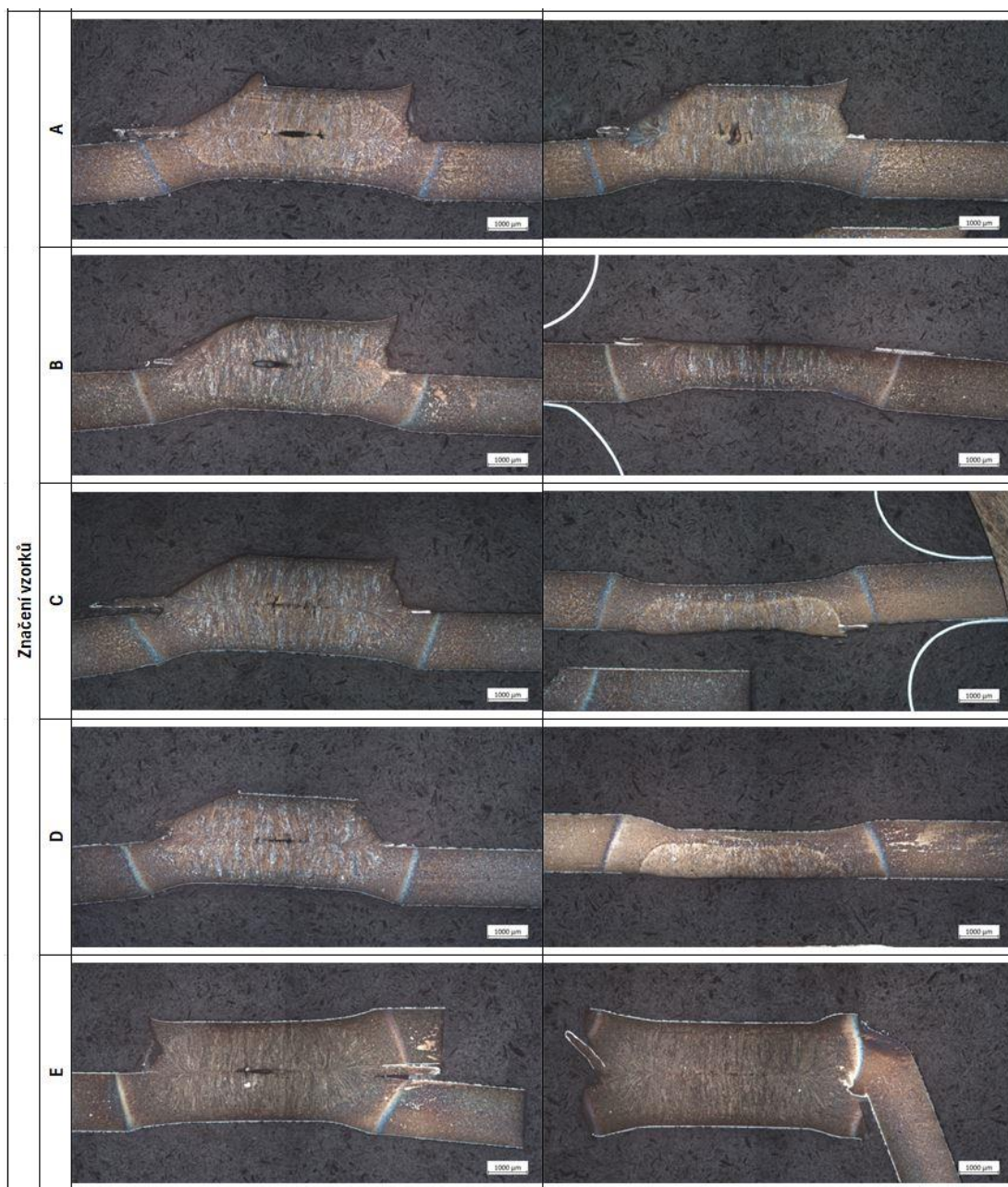
Pozn.: Místo bylo zvoleno na základě analýzy místa porušení, viz kapitola 3.3.2 a je to místo, ve kterém je cílem dosáhnout zmíněné mikrostruktury.

Postup jednotlivých fází simulací z hlediska teplotního cyklu je shrnut v tabulce, viz Tabulka 10. Postup jednotlivých fází simulací z hlediska průběhu proudu a nastavených parametrů jsou v přílohách, viz příloha 8.1 a 8.2.

3.3.4 Výsledky svařování

Na základě simulací byly vzorky svařeny parametry, viz Tabulka 8, kde jedinou proměnnou byl proud dohřevu. Proud dohřevu byl měněn v rozsahu cca 1-2,6 kA. Vzorky byly testovány tahovou zkouškou, zkouškou tvrdosti a byla provedena

metalografie. Byly změřeny průměry svarových čoček dle normy ČSN EN ISO 14 270. Ze zkoušek vyšly závislosti, které jsou shrnuty na obrázcích, viz Obrázek 31, Obrázek 32, Obrázek 33, Obrázek 34. Mikrostruktury jednotlivých variant svařených plechů jsou zobrazeny v tabulce, viz Tabulka 11.



Obrázek 29 Příklady svarů pro každou sadu parametrů pro analýzu místa porušení

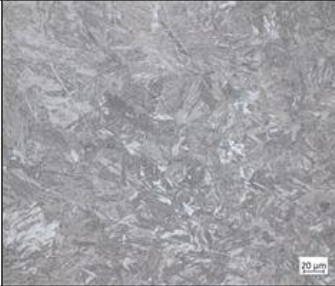
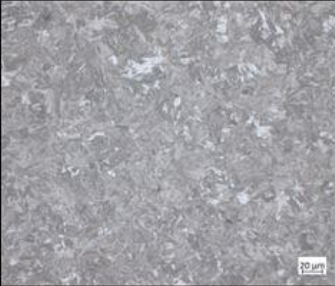





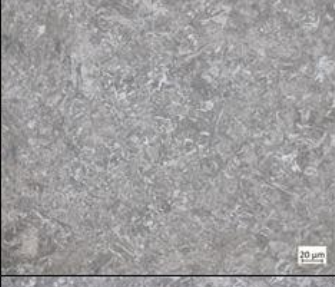

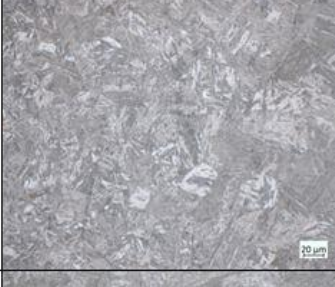
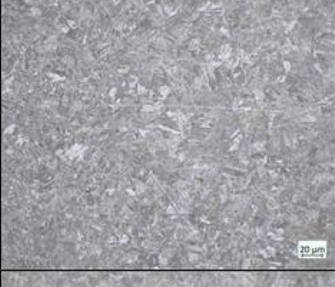


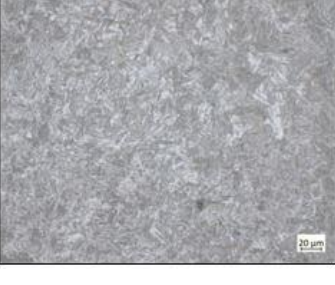

Při analýze místa porušení svařených vzorků (viz Obrázek 29 vzorky A, B, C, D) bylo pozorováno, že došlo ke změně místa iniciace trhliny oproti vzorkům svařených bez dohřevu (viz Obrázek 29 vzorek E, Obrázek 27). U vzorků svařených bez dohřevu se místo iniciace trhliny nachází v tepelně ovlivněné oblasti. Zatímco u vzorků svařených v rámci této diplomové práce s aplikací dohřevu se vzorky porušily na rozhraní svarové čochky a tepelně ovlivněné oblasti, případně došlo k porušení v dělicí rovině svarové čochky. Dělicí rovina svarové čochky se může zdát jako nepříznivé místo pro iniciaci trhliny, ale analýza mechanických vlastností, viz Obrázek 33, ukazuje, že tomu tak být nemusí.



Obrázek 30 Legenda k tabulce mikrostruktur

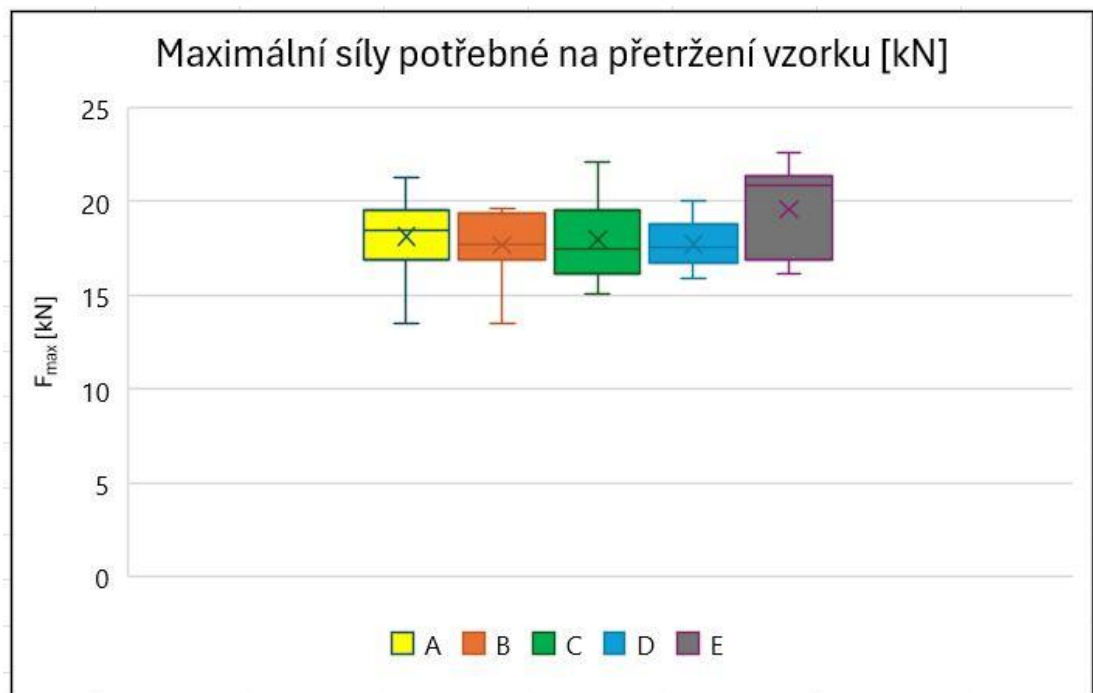
Mikrostruktura byla sledována ve třech místech: na rozhraní svarové čochky a tepelně ovlivněné oblasti, na rozhraní tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu a na hranici tepelně ovlivněné oblasti, která je pod mikroskopem viditelná jako modrá čára. Jednotlivé oblasti jsou zobrazeny na schématickém obrázku, viz Obrázek 30.

Tabulka 11 Mikrostruktura jednotlivých variant svařených plechů focená ve třech místech (viz Obrázek 30)

		Mikrostruktura		
		Místo, ve kterém se mikrostruktura nachází		
		1	2	3
Značení vzorků	A			
	B			
	C			
	D			
	E			

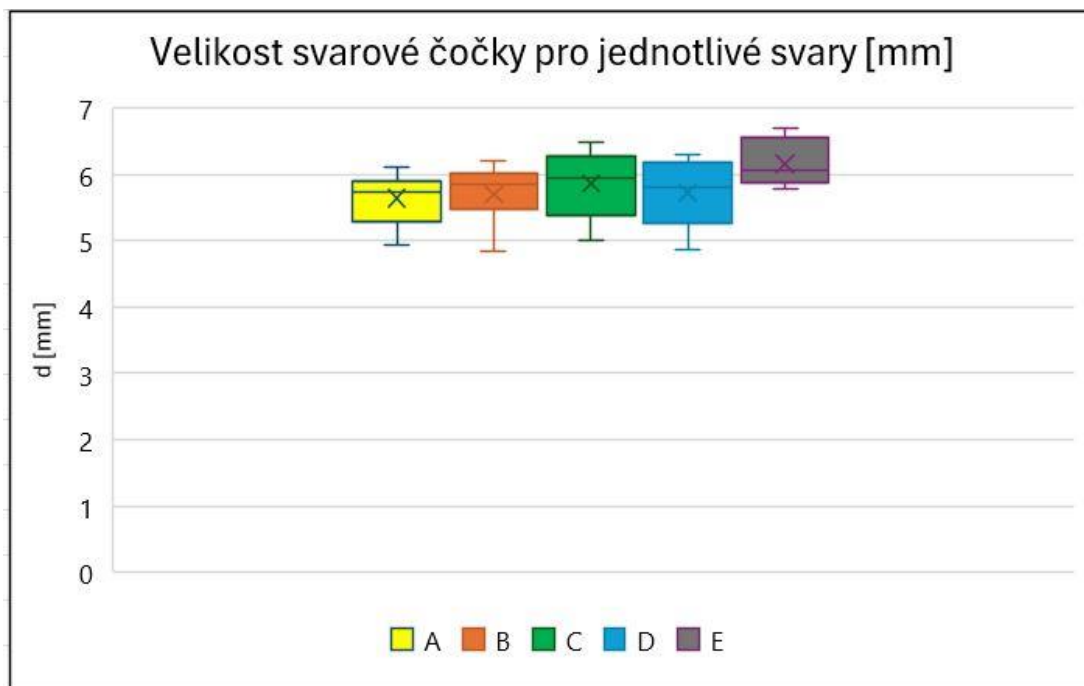
Analýza mikrostruktur jednotlivých variant svařených vzorků, viz Tabulka 11, ukázala, že na základě tepelného zpracování zvolená mikrostruktura (viz Obrázek 26) nebyla dosažena v žádném vzorku. Byly jsme omezeni limitními parametry stroje, a tudíž nebyl docílen ani zvolený teplotní průběh. Lze však pozorovat, že mikrostruktura ve zvoleném místě byla po aplikaci dohřevu přesto modifikována.

Tato modifikace mohla způsobit, že u vzorků svařených s aplikací dohřevu se trhlinka iniciovala v místě, které je blíže svarové čočce. Domněnku, že modifikace mikrostruktury způsobila vyšší houževnatost materiálu v tepelně ovlivněné oblasti, podporuje Obrázek 33. Na obrázku je vidět, že ačkoliv se změnilo místo iniciace trhliny, tak mez pevnosti celého spoje zůstala přibližně stejná.

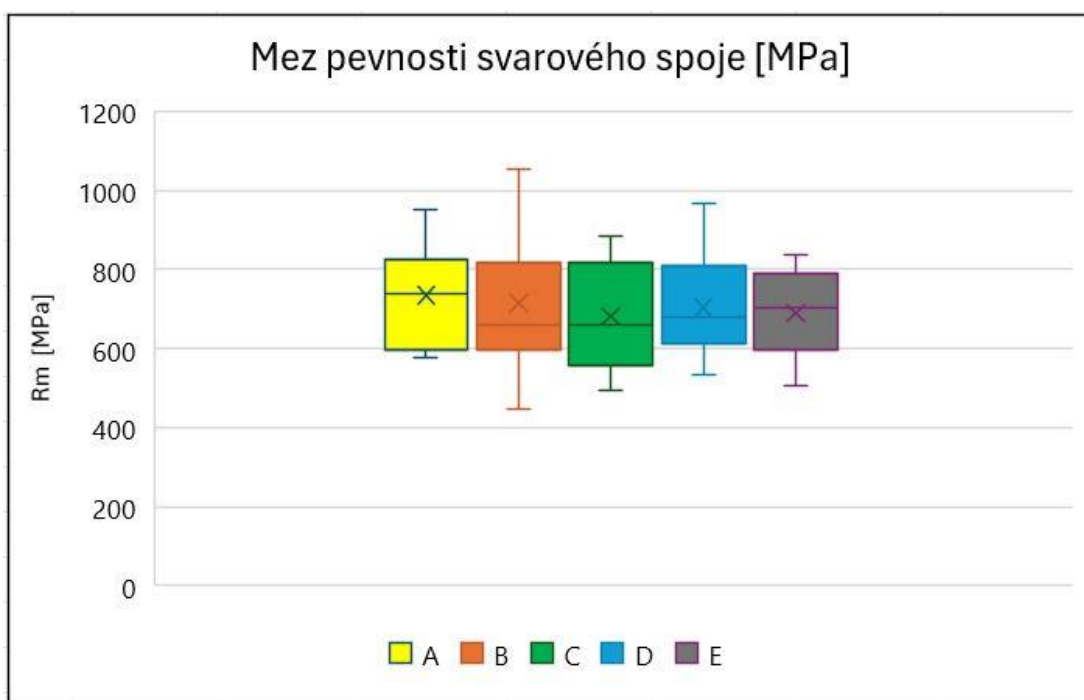


Obrázek 31 Srovnání maximálních sil potřebných na přetržení jednotlivých variant svařených plechů

Dle obrázku (Obrázek 31) je patrné, že dohřevem nebylo docíleno vyšší hodnoty maximální síly potřebné na přetržení vzorku. Avšak se zdá, že dohřev způsobil nižší odchylky od průměrné hodnoty.

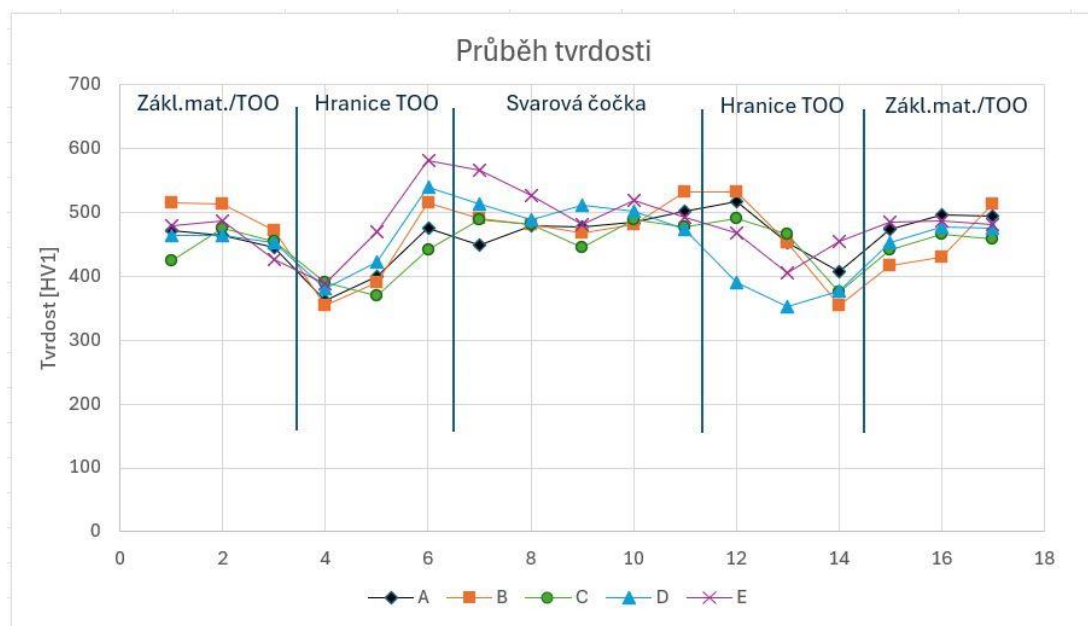


Obrázek 32 Srovnání velikostí svarových čouček jednotlivých variant svařených plechů



Obrázek 33 Srovnání hodnot meze pevnosti svarového spoje jednotlivých variant svařených plechů

Mez pevnosti plechů svařených s aplikací dohřevu je srovnatelná s mezí pevnosti plechů svařených bez dohřevu.



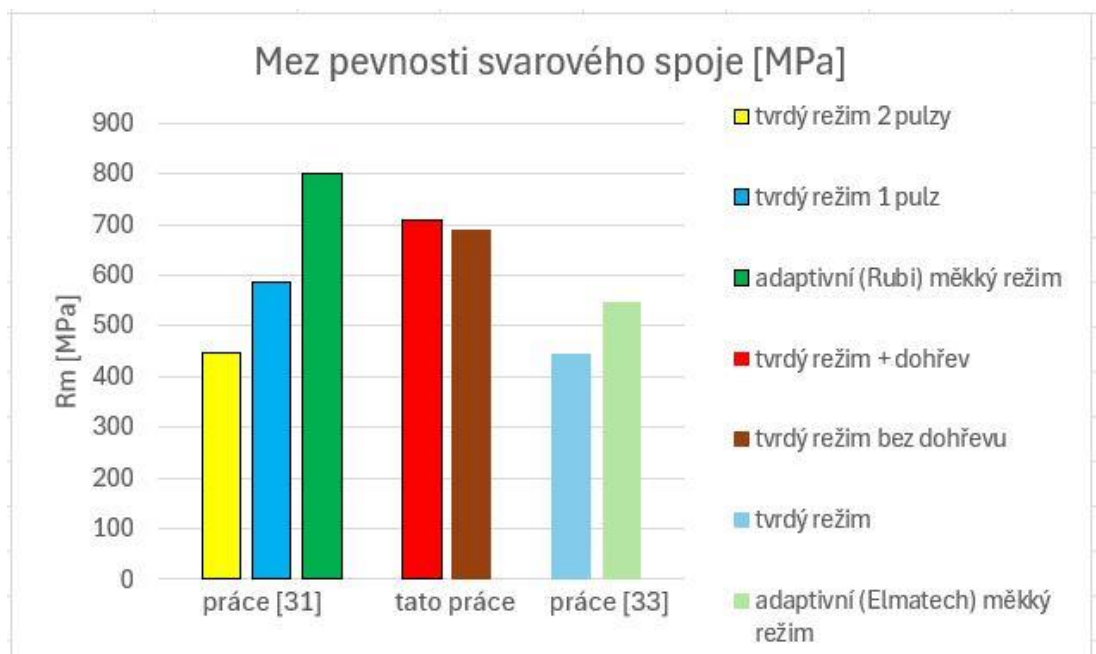
Obrázek 34 Průběh tvrdosti svarového spoje jednotlivých variant svařených plechů

Měření tvrdosti neukazuje výrazné rozdíly mezi jednotlivými variantami vzorků. V tepelně ovlivněné oblasti je hodnota tvrdosti menší a materiál je zde houževnatější. Tvrdost základního materiálu je srovnatelná s tvrdostí v oblasti svarové čočky.

3.3.5 Analýza svarů z předchozích prací a vytvoření souvislosti s touto diplomovou prací

Pro hlubší pochopení problematiky vlivu svařovacího cyklu na mechanické vlastnosti odporového spoje materiálu 22MnB5 byla nově zpracována data získaná v rámci řešení předchozích diplomových a bakalářských prací vedených na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT [31] [33] [34].

Data byla vybrána ze souborů výsledků pro vzorky ze stejného materiálu se stejnými parametry tváření za tepla.



Obrázek 35 Srovnání hodnot mezí pevnosti plechů z oceli 22MnB5 svařených různými typy svařovacího cyklu

Byla porovnána data z předchozích prací, zejména vliv svařovacího cyklu na mez pevnosti svarového spoje materiálu 22MnB5 se stejnými podmínkami při tváření za tepla. Ačkoliv byla data porovnáována mezi více pracemi a byly použity různé režimy svařování ovlivněné různými vnějšími podmínkami, lze pozorovat určité trendy.

Při srovnání výsledků mezi jednotlivými pracemi se zdá, že dvoupulzní tvrdý režim dosahuje nejnižších hodnot mezí pevnosti. Při použití jednopulzního

svařovacího režimu jsou výsledky konzistentnější a svary dosahují vyšších pevností než u režimu dvoupulzního.

Hodnoty meze pevnosti při použití měkkého režimu jsou výrazně vyšší než při použití tvrdého režimu.

Při použití tvrdého režimu s aplikací dohřevu dosahují hodnoty meze pevnosti obdobných hodnot jako u tvrdého režimu. Nutné je však dodat, že trvání dohřevu bylo omezeno limitními parametry použitého svařovacího stroje.

Svařování s aplikací dohřevu lze považovat za určitou formu změkčení režimu. Jsou použity výrazně delší časy v kombinaci s nižšími proudy. Jde ale také o určitou formu dvoupulzního režimu, kdy druhý pulz má výrazně nižší hodnoty proudu.

Zdá se, že teplotního průběhu, který docílí vyšších pevností svarového spoje lze lépe docílit při použití měkkého režimu. Tedy použití nižších proudů hlavní části svařovacího cyklu a delších časů.

4 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vlivu svařovacího cyklu na mechanické vlastnosti odporového spoje vysokopevnostních za tepla tvářených ocelí, konkrétně manganbórové oceli 22MnB5. Manganbórové oceli byly vytvořeny speciálně pro použití v automobilovém průmyslu. Výhodami těchto ocelí je jejich nízká hmotnost při zachování vysoké pevnosti. Využití nachází zejména jako bezpečnostní prvky karoserie. Jako ochrana plechu před oxidací při tváření za tepla jsou tyto materiály opatřeny povrchovou vrstvou Al-Si. Procesní parametry, hlavně teplota austenitizace a výdrž na teplotě, mají velký vliv na tloušťku difúzní vrstvy a na rozložení chemických prvků v celé tloušťce povlaku. Různorodost povlaku má vliv na výslednou svařitelnost materiálu. V automobilovém průmyslu se ve většině případů používá jednopulzní svařovací cyklus bez přehřevu a dohřevu.

Tato diplomová práce se zabývá vlivem svařovacího cyklu, zejména vlivem zařazení dohřevu, na výsledné mechanické vlastnosti svarového spoje. Dalším zájmem této diplomové práce je porovnat vlivy různých svařovacích cyklů na mechanické vlastnosti odporového spoje materiálu 22MnB5. Pro zmíněné porovnání jsou použita data z předchozích prací vedených na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT.

Z diskuze výsledků, uvedené v kapitole 3.3 Rozbor výsledků vyplývají následující poznatky:

1. Největší vliv na teplotní průběh svařovaného plechu má proud a čas dohřevu.
2. Svařovací cyklus se zařazením dohřevu ovlivňuje mód porušení svarového spoje. Mez pevnosti celého spoje zůstala prakticky stejná.
3. Dohřev má vliv na mikrostrukturu svarového spoje, zejména v tepelně ovlivněné oblasti.
4. Dvoupulzní tvrdý svařovací režim dosahuje nejnižších hodnot mezí pevnosti v porovnání s ostatními svařovacími režimy.

5. Tvrdý svařovací režim se zařazením dohřevu, nastaveným podle limitu použitého stroje, dosahuje obdobných hodnot meze pevnosti jako tvrdý svařovací režim bez zařazení dohřevu.
6. Pro docílení nejvyšších hodnot meze pevnosti je nejvýhodnější použít měkký svařovací režim.

Tato diplomová práce prokazuje vlivy tvrdého svařovacího režimu se zařazením dohřevu na mechanické vlastnosti odporového svarového spoje materiálu 22MnB5. Porovnává vlivy různých svařovacích režimů na mechanické vlastnosti odporového svarového spoje materiálu 22MnB5.

Práce může dále sloužit jako podklad pro další výzkum svařovacího režimu se zařazením dohřevu. Může být také podnětem pro testování svařovacího režimu s dohřevem dle odsimulovaných parametrů na stroji bez omezujících parametrů.

Potenciál svařovacího režimu s dohřevem by se mohl ukázat při testování dynamických mechanických vlastností svarového spoje.

5 Literatura

- [1] ZERVAS, Efthimios a Christos LAZAROU. Influence of European passenger cars weight to exhaust CO2 emissions. *Energy Policy* [online]. 2008, **36**(1), 248–257. ISSN 0301-4215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2007.09.009
- [2] Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie | MM Průmyslové spektrum. *www.mmspektrum.com* [online]. [vid. 2024-03-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie>
- [3] PILVOUSEK, Tomáš. *Technologie ve výrobě karoserie*. B.m.: interní dokument ŠKODA AUTO a.s. 2015
- [4] HICKEY, Kate. Defining Steels. *World Auto Steel AHSS Guidelines* [online]. 25. srpen 2021 [vid. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://ahssinsights.org/metallurgy/defining-steels/>
- [5] *Usibor® and Ductibor®* [online]. [vid. 2024-03-25]. Dostupné z: https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/usibor_ductibor
- [6] MBW® – manganese-boron steel for hot forming | thyssenkrupp Steel. *thyssenkrupp* [online]. [vid. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/products/sheet-coated-products/manganese-boron-steel-for-hot-forming/mbw-manganese-boron-steel-for-hot-forming/>
- [7] MBW-W1500 - MBW-K1900. *Materials Processing Europe* [online]. [vid. 2024-03-30]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials-processing-europe.com/en/c-steel/manganese-boron-steel/mbw-w1500-mbw-k1900>
- [8] KARBASIAN, H. a A. E. TEKKAYA. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2010, **210**(15), 2103–2118. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019
- [9] ZHENG, Guojun, Xiaodong LI, Ying CHANG, Cunyu WANG a Han DONG. A Comparative Study on Formability of the Third-Generation Automotive Medium-Mn Steel and 22MnB5 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2018, **27**(2), 530–540. ISSN 1544-1024. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-018-3183-3
- [10] LI, Shuo-shuo a Hai-wen LUO. Medium-Mn steels for hot forming application in the automotive industry. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* [online]. 2021, **28**(5), 741–753. ISSN 1869-103X. Dostupné z: doi:10.1007/s12613-020-2179-9

- [11] KUMAR SINGH, Manish, Anil KUMAR VERMA a Ashok KUMAR. Microstructure and Mechanical properties of Medium Manganese Steels. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, **56**, International Conference on Materials, Machines and Information Technology-2022, 356–367. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2022.01.195
- [12] ZABIHI-GARGARI, Mohammad, Mohammad EMAMI, Hamid Reza SHAHVERDI a Mohsen ASKARI-PAYKANI. Influence of boron addition on microstructure and mechanical properties of medium-Mn advanced high-strength steel. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2024, **29**, 5317–5329. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2024.03.021
- [13] GRAMLICH, A., C. VAN DER LINDE, M. ACKERMANN a W. BLECK. Effect of molybdenum, aluminium and boron on the phase transformation in 4 wt.-% manganese steels. *Results in Materials* [online]. 2020, **8**, 100147. ISSN 2590-048X. Dostupné z: doi:10.1016/j.rinma.2020.100147
- [14] SCHMIDOVÁ, Eva a Petr HANUS. Weldability of Al-Si Coated High Strength Martensitic Steel. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* [online]. 2013, **41**(2), 127–132. ISSN 1587-3811. Dostupné z: doi:10.3311/PPtr.7113
- [15] KOLAŘÍKOVÁ, Marie. *Svařování vysokopevných manganborových ocelí elektrickým odporem a vliv povrchových úprav na jejich svařitelnost* [online]. Praha, 2019. Habilitační práce. ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/106956>
- [16] SOINI, Jaroslav, Petr. *Vliv metalurgických faktorů na kvalitu svarového spoje u vysokopevných ocelových plechů s povlakem na bázi Al-Si*. [online]. Praha, 2022. Disertační práce. ČVUT, Fakulta Strojní. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/100814/F2-D-2022-Petr-Soini-Jaroslav-Petr-Soini_prace_U12132.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [17] SAHA, D. C., C. W. JI a Y. D. PARK. Coating behaviour and nugget formation during resistance welding of hot forming steels. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. 2015, **20**(8), 708–720. ISSN 1362-1718. Dostupné z: doi:10.1179/1362171815Y.0000000054
- [18] KANG, Minjung, Young-Min KIM a Cheolhee KIM. Effect of heating parameters on laser welded tailored blanks of hot press forming steel. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2016, **228**, Hot Stamping, 137–144. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.06.028
- [19] HOLÁSEK, Jan. *Odporové zvráanie*. 1968. vyd. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, nedatováno.

- [20] MODI, Shashank a Abhay VADHAVKAR. *Technology Roadmap: Materials and Manufacturing* [online]. B.m.: Center for Automotive research, Ann Arbor. 2019. Dostupné z: https://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2019/10/Technology-Roadmap_Materials-and-Manufacturing.pdf
- [21] ČSN EN ISO 14373 (052640). [online]. 2015. vyd. Praha: ČNI, nedatováno. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-14373-052640-164363.html>
- [22] ADAMS, David W., Cameron D. E. SUMMERVILLE, Brendan M. VOSS, Jack JESWIET a Matthew C. DOOLAN. Correlating Variations in the Dynamic Resistance Signature to Weld Strength in Resistance Spot Welding Using Principal Component Analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2016, **139**(044502) [vid. 2024-06-26]. ISSN 1087-1357. Dostupné z: doi:10.1115/1.4034887
- [23] RIBEIRO, Robson, Estevão Luiz ROMÃO, Eduardo LUZ, José Henrique GOMES a Sebastião COSTA. Optimization of the Resistance Spot Welding Process of 22MnB5-Galvannealed Steel Using Response Surface Methodology and Global Criterion Method Based on Principal Components Analysis. *Metals* [online]. 2020, **10**(10), 1338. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met10101338
- [24] FEUJOFACK KEMDA, B. V., N. BARKA, M. JAHAZI a D. OSMANI. Modeling of Phase Transformation Kinetics in Resistance Spot Welding and Investigation of Effect of Post Weld Heat Treatment on Weld Microstructure. *Metals and Materials International* [online]. 2021, **27**(5), 1205–1223. ISSN 2005-4149. Dostupné z: doi:10.1007/s12540-019-00486-x
- [25] HOU, Jeff Shao-Chun. *Resistance Spot Welding and In-Process Heat Treatment of Hot Stamped Boron Steel* [online]. B.m., 2016 [vid. 2024-02-17]. Master Thesis. University of Waterloo. Dostupné z: <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/10321>
- [26] BILLUR, E. Hot formed steels*, **. In: Radhakanta RANA a Shiv Brat SINGH, ed. *Automotive Steels* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2017 [vid. 2024-07-10], s. 387–411. ISBN 978-0-08-100638-2. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100638-2.00012-2
- [27] LIANG, Xuebo, Xinjian YUAN, Haodong WANG, Xiuyang LI, Ci LI a Xueyu PAN. Microstructure, mechanical properties and failure mechanisms of resistance spot welding joints between ultra high strength steel 22MnB5 and galvanized steel HSLA350. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. 2016, **17**(12), 1659–1664. ISSN 2005-4602. Dostupné z: doi:10.1007/s12541-016-0192-8

- [28] SEVIM, IBRAHIM, FATIH HAYAT a MUSTAFA KEMAL KULEKCI. Nucleus geometry and mechanical properties of resistance spot welded coated–uncoated DP automotive steels. *Bulletin of Materials Science* [online]. 2013, **36**(6), 1049–1055. ISSN 0973-7669. Dostupné z: doi:10.1007/s12034-013-0559-8
- [29] POURANVARI, M a S P H MARASHI. Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. 2013, **18**(5), 361–403. ISSN 1362-1718. Dostupné z: doi:10.1179/1362171813Y.0000000120
- [30] HUIN, Thibaut, Sylvain DANCETTE, Damien FABRÈGUE a Thomas DUPUY. Investigation of the Failure of Advanced High Strength Steels Heterogeneous Spot Welds. *Metals* [online]. 2016, **6**, 111. Dostupné z: doi:10.3390/met6050111
- [31] VOTAVA, Pavel. *Odporové svařování martenzitických ocelí s variantním tepelným zpracováním* [online]. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/63565>
- [32] DANCETTE, Sylvain, Thibaut HUIN, Thomas DUPUY a Damien FABRÈGUE. Finite element modeling of deformation and fracture of advanced high strength steels dissimilar spot welds. *Engineering Fracture Mechanics* [online]. 2021, **258**. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfracmech.2021.108092
- [33] BALIHAR, Ondřej. *Vliv způsobu řízení svařovacího procesu na kvalitu odporových svarů* [online]. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84822>
- [34] HAALA, Vojtěch. *Vliv povrchové vrstvy AlSi na průběh svařovacího procesu* [online]. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84797>

6 Seznam tabulek

Tabulka 1 Typické mechanické vlastnosti 22MnB5 při dodání [7].....	13
Tabulka 2 Typické mechanické vlastnosti 22MnB5 po tepelném zpracování [7]	13
Tabulka 3 Chemické složení oceli MBW1500 dle výrobce [7].....	29
Tabulka 4 Mechanické vlastnosti oceli MBW1500 v dodávaném stavu dle výrobce [7]	29
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti oceli MBW1500 ve stavu po procesu tváření za tepla dle výrobce [7].....	29
Tabulka 6 Varianty tepelného zpracování a jejich značení	30
Tabulka 7 Štítek stroje DALEX PMS 11-4	33
Tabulka 8 Parametry svařování	35
Tabulka 9 Mikrostruktura plechů jednotlivých variant tepelného zpracování	39
Tabulka 10 Postup jednotlivých fází simulací – teplotní průběh	44
Tabulka 11 Mikrostruktura jednotlivých variant svařených plechů focená ve třech místech (viz Obrázek 30)	48

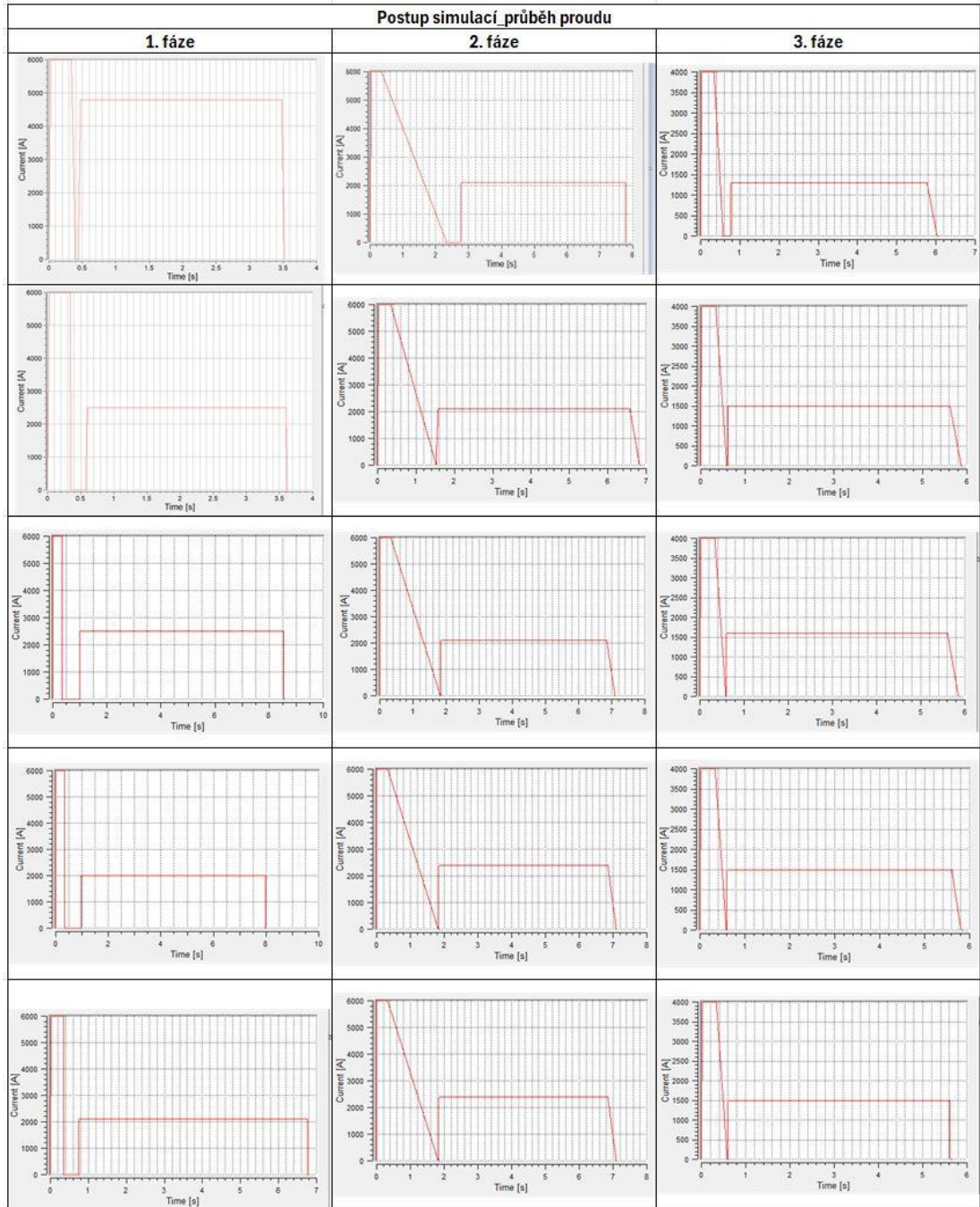
7 Seznam obrázků

Obrázek 1 Materiálový koncept karoserie modelu Škoda Octavia III a Škoda Superb III [3], [2]	10
Obrázek 2 Struktura 22MnB5 před tvářením – Feriticko-perlitická (Ferit – bílý, Perlit - černý) [6]	12
Obrázek 3 Struktura 22MnB5 po tvářením – Martenzitická [6].....	12
Obrázek 4 Diagramy procesu výroby 22MnB5 [8]	14
Obrázek 5 Průřez povlakem Al-Si	16
Obrázek 6 Rozložení teploty u bodového odporového svařování materiálu s různou povrchovou vrstvou (Al-Si x Zn) [17]	17
Obrázek 7 Místo iniciace trhliny na hranici svarové čočky v místě vměstku tvořeného částí povlaku Al-Si.....	18
Obrázek 8 Schéma metalurgického procesu vzniku odporového bodového svarového spoje [22]	20
Obrázek 9 Schéma staženiny ve středu bodového svaru [19]	21
Obrázek 10 Mikrostruktura po bodovém odporovém svařování se staženinou uprostřed oceli 22MnB5.....	21
Obrázek 11 Svařovací cyklus [23]	22
Obrázek 12 ARA diagram oceli 22MnB5 s ochlazovacími křivkami a vlivem legur na posuv strukturní oblasti [26]	23
Obrázek 13 Srovnání geometrie svarové čočky bez dohřevu (vlevo) a s dohřevem (vpravo) [24].....	23
Obrázek 14 Závislosti velikosti svarové čočky a míry vtisku (hloubky vtisku vztažené na tloušťku svařovaného materiálu) svařovacích čepiček na svařovacím proudu [27]	24
Obrázek 15 Schéma módů porušení odporového svarového spoje [32].....	25
Obrázek 16 Použitý plech oceli MBW1500	29
Obrázek 17 Schéma průběhu teploty plechu při tepelném zpracování.....	31
Obrázek 18 Schéma tepelného zpracování.....	31

Obrázek 19 Svařovací lis DALEX PMS 11-4	34
Obrázek 20 Geometrie elektrodové čepičky 39 D 1978-2	34
Obrázek 21 Průběh svařovacího proudu	36
Obrázek 22 Srovnání meze pevnosti plechů jednotlivých variant tepelného zpracování	37
Obrázek 23 Srovnání tvrdosti plechů jednotlivých variant tepelného zpracování	37
Obrázek 24 Srovnání ploch pod křivkou napětí-deformace plechů jednotlivých variant tepelného zpracování.....	38
Obrázek 25 Srovnání tažnosti plechů jednotlivých variant tepelného zpracování	38
Obrázek 26 Zvolená mikrostruktura (teplota 400 °C, výdrž 10 s)	41
Obrázek 27 Některé vzorky vybrané z předchozích prací pro analýzu místa porušení	42
Obrázek 28 Simulovaný svařovací cyklus s vyznačeným místem, kde byl sledován teplotní průběh	45
Obrázek 29 Příklady svarů pro každou sadu parametrů pro analýzu místa porušení	46
Obrázek 30 Legenda k tabulce mikrostruktur	47
Obrázek 31 Srovnání maximálních sil potřebných na přetržení jednotlivých variant svařených plechů.....	49
Obrázek 32 Srovnání velikostí svarových čoček jednotlivých variant svařených plechů.....	50
Obrázek 33 Srovnání hodnot meze pevnosti svarového spoje jednotlivých variant svařených plechů.....	50
Obrázek 34 Průběh tvrdosti svarového spoje jednotlivých variant svařených plechů	51
Obrázek 35 Srovnání hodnot mezí pevnosti plechů z oceli 22MnB5 svařených různými typy svařovacího cyklu	52

8 Přílohy

8.1 Příloha 1 - Postup jednotlivých fází simulací z hlediska průběhu proudu



8.2 Postup jednotlivých fází simulací z hlediska nastavených parametrů

Postup simulací_nastavené parametry					
1. fáze		2. fáze		3. fáze	
Time (X)	Current (Y)	Time (X)	Current (Y)	Time (X)	Current (Y)
s	A	s	A	s	A
0	0	0	0	0	0
0.03	6000	0.03	6000	0.03	4000
0.34	6000	0.34	6000	0.34	4000
0.4	0	2.34	0	0.59	0
0.44	0	2.75	0	0.76	0
0.48	4800	2.79	2100	0.78	1300
3.48	4800	7.79	2100	5.78	1300
3.52	0	7.81	0	6.03	0
		7.83	0	6.05	0
Time (X)	Current (Y)	Time (X)	Current (Y)	Time (X)	Current (Y)
s	A	s	A	s	A
0	0	0	0	0	0
0.03	6000	0.03	6000	0.03	4000
0.34	6000	0.34	6000	0.34	4000
0.36	0	1.54	0	0.59	0
0.58	0	1.58	2100	0.61	0
0.6	2500	6.58	2100	0.63	1500
3.6	2500	6.83	0	5.63	1500
3.62	0	6.85	0	5.88	0
3.64	0			5.9	0
Time (X)	Current (Y)	Time (X)	Current (Y)	Time (X)	Current (Y)
s	A	s	A	s	A
0	0	0	0	0	0
0.03	6000	0.03	6000	0.03	4000
0.34	6000	0.34	6000	0.34	4000
0.36	0	1.84	0	0.59	0
1	0	1.86	2100	0.61	1600
1.02	2500	6.86	2100	5.61	1600
8.52	2500	7.11	0	5.86	0
8.54	0	7.13	0	5.88	0
8.56	0				
Time (X)	Current (Y)	Time (X)	Current (Y)	Time (X)	Current (Y)
s	A	s	A	s	A
0	0	0	0	0	0
0.03	6000	0.03	6000	0.03	4000
0.34	6000	0.34	6000	0.34	4000
0.36	0	1.84	0	0.59	0
0.96	0	1.86	2400	0.61	1500
0.98	2000	6.86	2400	5.61	1500
7.98	2000	7.11	0	5.82	0
8	0	7.13	0	5.84	0
8.02	0				
Time (X)	Current (Y)	Time (X)	Current (Y)	Time (X)	Current (Y)
s	A	s	A	s	A
0	0	0	0	0	0
0.03	6000	0.03	6000	0.03	4000
0.34	6000	0.34	6000	0.34	4000
0.36	0	1.84	0	0.59	0
0.74	0	1.86	2650	0.61	1500
0.76	2100	6.86	2650	5.61	1500
6.76	2100	7.11	0	5.63	0
6.78	0	7.13	0	5.65	0
6.8	0				