

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

**ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ MARTENZITICKÝCH OCELÍ  
S VARIANTNÍM TEPELNÝM ZPRACOVÁNÍM**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Autor:** Bc. Pavel Votava

**Studijní obor:** Výrobní a materiálové inženýrství

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

**Praha 2015**

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti použití 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

Rád bych poděkoval mé vedoucí diplomové práce paní **Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE**, že mě uvedla do problematiky, poskytla vhodné materiály pro vypracování této práce a také pomohla při řešení a vyhodnocení experimentální části.

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá problematikou odporového bodového svařování povlakovaných martenzitických ocelí v automobilovém průmyslu. Teoretická část práce popisuje metodu odporového bodového svařování a také materiály a jejich povrchové úpravy, které jsou v dnešní době používány v automobilovém průmyslu na výrobu karoserie. Experimentální část práce zkoumá vliv povrchové vrstvy Al-Si na svařitelnost martenzitické, za tepla tvářené oceli 22MnB5 s variantním tepelným zpracováním. Vzorky byly svařeny v měkkém i tvrdém režimu svařování a následné hodnocení svarů bylo provedeno pomocí destruktivních a nedestruktivních zkoušek svarových spojů.

### **Klíčová slova:**

odporové bodové svařování; vysokopevnostní ocel; 22MnB5; povlak Al-Si; automobilový průmysl

## **Annotation**

This thesis deals with the resistance spot welding of coated martensitic steels in the automotive industry. The theoretical part of this thesis describes the method of resistance spot welding and materials with surface treatments as well that are used for the production of the bodywork in the automotive industry nowadays. The experimental part of this thesis examines the weldability of coated (Al-Si) martensitic hot-formed steel 22MnB5 with variant heat treatment. The samples were welded in soft and hard mode of welding and subsequent evaluation of welds was performed by using destructive and non-destructive testing of welding joints.

### **Keywords:**

resistance spot welding; high strength steel; 22MnB5; coating Al-Si; automotive industry

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Rozbor problematiky odporového svařování.....	11
2.1	Odporové svařování v automobilovém průmyslu.....	12
2.2	Odporové bodové svařování.....	13
2.2.1	Princip odporového bodového svařování.....	14
2.2.2	Přechodové a materiálové odpory.....	15
2.2.3	Odporový ohřev.....	15
2.2.4	Metalurgický proces.....	18
2.2.5	Mechanický proces.....	20
2.2.6	Svařovací parametry.....	21
2.2.7	Druhy svařovacích režimů.....	22
3	Materiály používané v automobilovém průmyslu.....	25
3.1	Kategorie nejčastěji používaných (ocelových) materiálů.....	25
3.1.1	Konkrétní typy používaných ocelí.....	27
3.2	LSS (Low Strength Steel) oceli.....	28
3.2.1	IF (Interstitial Free) oceli.....	28
3.2.2	Mild oceli.....	28
3.3	HSS (High Strength Steel) oceli.....	29
3.3.1	IF-HS (Interstitial Free – High Strength) oceli.....	29
3.3.2	BH (Bake Hardenable) oceli.....	30
3.3.3	HSLA (High Strength Low Alloy) oceli.....	31
3.4	AHSS (Advanced High Strength Steel) oceli.....	31
3.4.1	DP (Dual Phase) oceli.....	31
3.4.2	CP (Complex Phase) oceli.....	32
3.4.3	TRIP (TRansformation Induced Plasticity) oceli.....	33
3.4.4	TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli.....	34
3.4.5	MS (Martensitic Steel) oceli.....	35
3.5	Za tepla tvářená ocel 22MnB5.....	36
3.5.1	Vlastnosti oceli 22MnB5.....	38
3.5.2	Výroba za tepla tvářených dílů z oceli 22MnB5.....	40
3.5.3	Odporová svařitelnost oceli 22MnB5.....	42
4	Ochranné povlaky plechů používaných na výrobu karoserie.....	44
4.1	Povlaky za studena tvářených plechů na bázi zinku.....	45
4.1.1	Elektrolytické zinkování.....	45

4.1.2	Žárové zinkování .....	46
4.2	Povlak za tepla tvářených plechů na bázi siluminu (Al-Si).....	47
4.2.1	Vlastnosti povlaku Al-Si před tvářením za tepla (nevytvrzený stav).....	47
4.2.2	Vlastnosti povlaku Al-Si po tvářením za tepla (vytvrzený stav).....	48
4.2.3	Vliv povlaku Al-Si na svařitelnost .....	49
5	Praktický experiment.....	50
5.1	Cíle diplomové práce .....	50
5.2	Rozbor svařovaného materiálu .....	50
5.2.1	Mikrotvrdość a metalografie základního materiálu 22MnB5 .....	51
5.2.2	Chemická analýza povrchové vrstvy Al-Si .....	53
5.3	Příprava a svaření vzorků pro jednotlivé zkoušky.....	57
5.3.1	Svařovací parametry .....	58
5.3.2	Vzorky pro zkoušku ultrazvukem a metalografií .....	60
5.3.3	Vzorky pro statickou zkoušku stříhem .....	61
5.3.4	Vzorky pro dynamickou zkoušku stříhem.....	62
5.3.5	Značení jednotlivých svarů.....	63
5.4	Vyhodnocení měkkého svařovacího režimu.....	63
5.4.1	Zkouška ultrazvukem a metalografické výbrusy.....	64
5.4.2	Statická zkouška stříhem .....	66
5.5	Vyhodnocení tvrdého svařovacího režimu (1. sada – jeden pulz).....	66
5.5.1	Zkouška ultrazvukem a metalografické výbrusy.....	66
5.5.2	Statická zkouška stříhem .....	69
5.5.3	Dynamická zkouška stříhem.....	71
5.6	Vyhodnocení tvrdého svařovacího režimu (2. sada – dva pulzy).....	73
5.6.1	Zkouška ultrazvukem a metalografické výbrusy.....	73
5.6.2	Statická zkouška stříhem .....	74
5.6.3	Dynamická zkouška stříhem.....	77
6	Závěr.....	78
	Použitá literatura.....	80
	Seznam obrázků.....	83
	Seznam tabulek.....	85
	Seznam grafů .....	86

## Seznam použitých veličin a jednotek

<b>R</b> [ $\Omega$ ]	elektrický odpor [ohm]
<b>I</b> [A]	elektrický proud [ampér]
<b>t</b> [s]	čas [sekunda]
<b>Q</b> [J]	teplo [joule]
<b>q<sub>v</sub></b> [ $\Omega \cdot A^2 \cdot m^{-3}$ ]	intenzita objemového zdroje tepla [ohm ampér čtvereční na metr krychlový]
<b><math>\rho</math></b> [ $\Omega \cdot m$ ; $\mu\Omega \cdot m$ ]	měrný elektrický odpor [ohm metr; mikroohm metr]
<b>J</b> [ $A \cdot m^{-2}$ ]	proudová hustota [ampér na metr čtvereční]
<b><math>\sigma</math></b> [ $S \cdot m^{-1}$ ]	měrná elektrická vodivost [siemens na metr]
<b>T</b> [ $^{\circ}C$ ]	teplota [stupeň Celsia]
<b>P<sub>s</sub></b> [kN]	svařovací (přítlačná) síla [kilonewton]
<b>I<sub>s</sub></b> [kA]	svařovací proud [kiloampér]
<b>t<sub>s</sub></b> [ms]	svařovací čas [milisekunda]
<b>R<sub>p0,2</sub></b> [MPa]	mez kluzu [megapascal]
<b>R<sub>m</sub></b> [MPa]	mez pevnosti
<b>A<sub>80</sub></b> [%]	tažnost [procento]
<b>n</b> [-]	exponent deformačního zpevnění [bezrozměrný]
<b>t</b> [mm]	tloušťka plechu [milimetr]
<b>d<sub>min</sub></b> [mm]	minimální průměr svaru
<b>F<sub>ss</sub></b> [kN]	maximální síla potřebná pro ustřižení (statická zkouška)
<b>F<sub>sd</sub></b> [kN]	maximální síla potřebná pro ustřižení (dynamická zkouška)
<b>HV</b>	tvrdost dle Vickerse
[ $^{\circ}C \cdot s^{-1}$ ]	ochlazovací rychlost [stupeň Celsia za sekundu]
[ $\mu m$ ]	tloušťka povlaku [mikrometr]
[ $g \cdot m^{-2}$ ]	hmotnost povlaku na $m^2$ [gram na metr čtvereční]
[ $g \cdot cm^{-3}$ ]	hustota povlaku [gram na centimetr krychlový]
[MHz]	frekvence [megahertz]

## Seznam použitých zkratk

<b>AHSS</b>	Advanced High Strength Steel (pokročilá vysokopevnostní ocel)
<b>BH</b>	Bake Hardenable (ocel zpevněná vypékáním)
<b>CP</b>	Complex Phase (vícefázová ocel)
<b>CS</b>	Commercial Steel (komerční ocel)
<b>DP</b>	Dual Phase (dvoufázová ocel)
<b>DS</b>	Drawing Steel (tažná ocel)
<b>EDDS</b>	Extra Deep Drawing Steel (mimořádně hlubokotažná ocel)
<b>EDS</b>	Elektronově Disperzní Spektrometr
<b>EG</b>	Electro Galvanized (metoda elektrolytického nanášení povlaku)
<b>FS</b>	Forming Steel (nízkopevnostní tvářecí ocel)
<b>HDG</b>	Hot Dip Galvanized (metoda žárového nanášení povlaku)
<b>HF</b>	Hot Formed (za tepla tvářená ocel)
<b>HSLA</b>	High Strength Low Alloy (vysokopevnostní ocel s nízkým obsahem legur)
<b>HSS</b>	High Strength Steel (vysokopevnostní ocel)
<b>IF</b>	Interstitial Free (ocel bez intersticií)
<b>IF-HS</b>	Interstitial Free – High Strength (vysokopevnostní ocel bez intersticií)
<b>LSS</b>	Low Strength Steel (nízkopevnostní ocel)
<b>MAG</b>	Metal Active Gas (metoda tavného svařování)
<b>MS</b>	Martensitic Steel (martenzitická ocel)
<b>PHS</b>	Press Hardened Steel (za tepla tvářená ocel)
<b>TIG</b>	Tungsten Inert Gas (metoda tavného svařování)
<b>TOO</b>	Tepelně Ovlivněná Oblast
<b>TRIP</b>	TRansformation Induced Plasticity (ocel s transformačně indukovanou plasticitou)
<b>TWIP</b>	TWinning Induced Plasticity (ocel s indukovanou plasticitou dvojčatěním)
<b>UHSS</b>	Ultra High Strength Steel (pokročilá vysokopevnostní ocel)
<b>ÚMI</b>	Ústav Materiálového Inženýrství
<b>ÚST</b>	Ústav Strojírenské Technologie



## 1 Úvod

V automobilovém průmyslu je kladen velký důraz na snížení celkové hmotnosti vozu. Velkou část hmotnosti automobilu tvoří karoserie, která musí být co nejllehčí, při zachování vysoké bezpečnosti. Z tohoto důvodu se v automobilovém průmyslu stále více používá vysokopevnostních plechů, které i při své menší tloušťce vykazují velkou pevnost. To zaručí snížení hmotnosti samonosné karoserie při zachování vysoké bezpečnosti.

V poslední době se v automobilovém průmyslu na výrobu karoserie stále více využívají vysokopevnostní oceli tvářené za tepla, které získají po tváření martenzitickou strukturu, což zaručuje velmi vysokou pevnost. Proto se tyto materiály používají na výrobu bezpečnostních prvků karoserie, kdy díky své vysoké pevnosti vykazují minimální deformaci při případném nárazu automobilu. Co největší možné zachování tvaru karoserie při nárazu je velmi důležitým faktorem pro pasivní bezpečnost, tzn. pro ochranu posádky.

Nejpoužívanější metodou svařování v automobilovém průmyslu je metoda odporového bodového svařování. Tímto způsobem jsou spojovány i výše zmíněné vysokopevnostní plechy tvářené za tepla. Tyto materiály jsou již z huti opatřeny povrchovou úpravou (většinou na bázi Al-Si), zabráňující vysokoteplotní oxidaci plechu při procesu tváření za tepla. Tento povlak má však nežádoucí účinky na proces svařování, který je díky němu velmi nestabilní. Nestabilitu udává mnoho různých faktorů (např. mnohem větší elektrický odpor povlaku než základního materiálu), týkajících se zmíněné povrchové vrstvy, které jsou předmětem mnoha zkoušek a výzkumů prováděných na FS, ČVUT v Praze. Zkoumání vlivu Al-Si povlaku (zejména tloušťky difuzní vrstvy mezi povlakem a ocelovým plechem) na svařitelnost těchto vysokopevnostních martenzitických ocelí tvářených za tepla při různých tepelných zpracováních je předmětem experimentální části této diplomové práce.

Teoretická část této práce popisuje metodu odporového bodového svařování, tzn. její princip; elektrický, metalurgický a mechanický proces; vliv materiálových a přechodových odporů a vliv svařovacích parametrů na svařovací proces; druhy svařovacích režimů apod. Součástí této rešeršní části je i výčet používaných materiálů na výrobu karoserie (včetně jejich svařitelnosti) a v neposlední řadě i používané povrchové úpravy ocelových plechů.

Praktická část se zabývá zkoumáním vlivu povrchové vrstvy Al-Si na svařitelnost za tepla tvářených ocelí typu 22MnB5. Dále porovnáním měkkého a tvrdého režimu svařování, s využitím destruktivních i nedestruktivních zkoušek svarových spojů, jakými jsou např. zkouška ultrazvukem, metalografická zkouška, statická a dynamická zkouška stříhem.

## 2 Rozbor problematiky odporového svařování

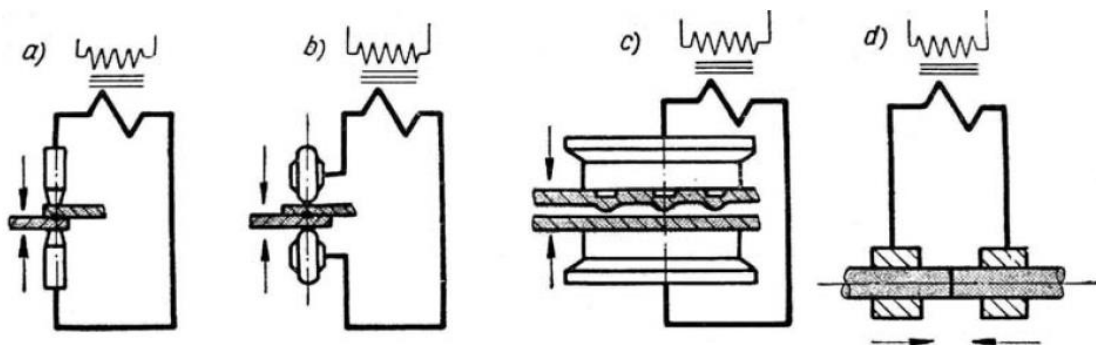
Odporové svařování je jedním z nejstarších svařovacích procesů, který se používá v průmyslu dodnes. Definujeme ho jako tlakový způsob svařování, při kterém se vytváří svar bez přídavného materiálu, krátkodobým přechodem proudu o vysoké intenzitě přes místo svaru při současném působení tlaku. Svařovací proces je charakterizován tím, že pro dosažení svařovací teploty spojovaných dílů se využívá Jouleovo teplo vyvinuté svařovacím proudem při spolupůsobení odporů vyskytujících se v oblasti svaru. [1, 2]

Při vzniku každého odporového svaru společně působí tři procesy: [2]

- elektrický proces,
- metalurgický proces,
- mechanický proces.

Podle konstrukčního uspořádání elektrod a pracovního postupu rozdělujeme odporové svařování na čtyři hlavní druhy (**Obr. 1**): [3]

- Bodové svařování** – vytvoří se spoj v podobě svarové čočky mezi přeplátovanými dílci.
- Švové svařování** – spoj se vytváří pomocí kotoučových elektrod ve tvaru souvislého svaru mezi přeplátovanými dílci.
- Výstupkové svařování** – ke spoji dochází v místech styku přirozených nebo záměrně vytvořených výstupků.
- Odtavovací stykové svařování** – spojované dílce jsou k sobě přitlačovány ve styčných plochách a průchodem svařovacího proudu jsou v těchto styčných plochách svařeny.



*Obr. 1 Základní druhy odporového svařování [3]*

Pro metody odporového svařování je charakteristické, že se většinou nepoužívají přídavné materiály a s výjimkou švového svařování je svařovací proces jednorázový děj. Obecně mají metody odporového svařování vysokou produktivitu práce, používají se ve velkosériové a hromadné výrobě (např. automobilový průmysl, výroba zřízení pro chemický a potravinářský průmysl, stavebnictví, elektronické součástky, letadla, apod.). Na svarové spoje se kladou vysoké nároky a základním požadavkem je zabezpečení rovnoměrné a vysoké jakosti. [4]

## 2.1 Odporové svařování v automobilovém průmyslu

V automobilovém průmyslu je odporové svařování hojně využíváno. Největším zástupcem odporové metody svařování je tzv. bodové svařování. Na výrobu jedné karoserie je použito kolem 4500 svarových bodů, konkrétní počet je určen typem a velikostí dané karoserie. Metoda odporového bodového svařování je v automobilovém průmyslu nejrozšířenější díky tomu, že dokáže eliminovat nepřesnosti svařovaných výlisků, např. když svařované plochy na sebe úplně nedoléhají. Tento problém vyřeší přítlačná síla daného svařovacího zařízení. Další výhodou této metody je, že ji lze velmi dobře automatizovat (**Obr. 2**) a svařování je velmi rychlé (desetiny sekundy). Tyto aspekty výrazně přispívají ke zvýšení produktivity práce a snížení nákladů.

Některé díly karoserií a podvozků je nutné spojovat rozebíratelně. Konstrukce karoserií i podvozkových skupin zajišťuje možnost použití šroubových spojů tak, že na příslušných místech jsou již v předchozích operacích připraveny matice. Přivaření matic se provádí opět pomocí odporové metody svařování, kde je potřeba výkonného svařovacího zdroje s výkonem nad 10 kA. [5]

Dalším využitím odporové metody v automobilové oblasti svařování je odporové přivařování svorníků.



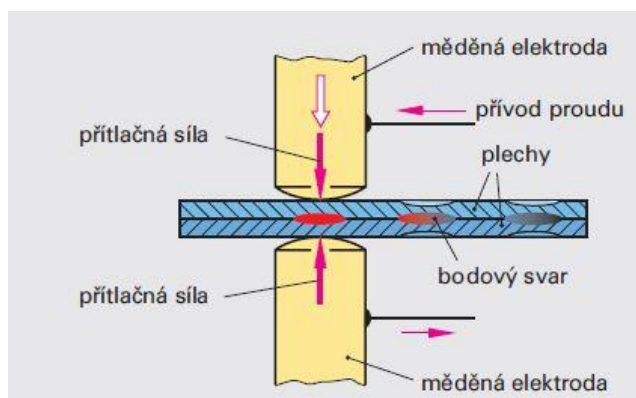
*Obr. 2 Ukázka robotizovaného pracoviště ve svařovně ŠKODA AUTO*

## 2.2 Odporové bodové svařování

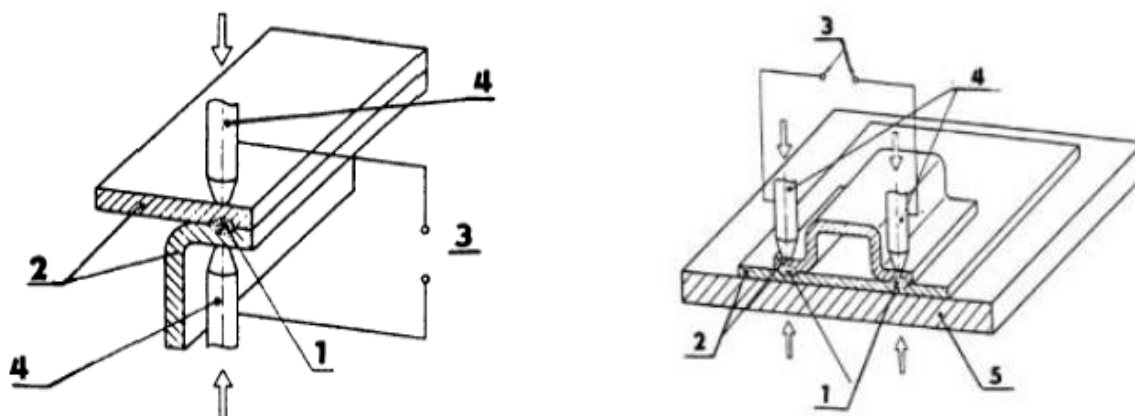
Dle normy ČSN EN ISO 4063 je tato metoda odporového svařování označena číslem 21.

Bodové svařování (**Obr. 3**) je nejvíce používaný způsob odporového svařování plechů jednotlivých tlouštěk přibližně od 0,4 do 10 mm (lze však svařovat i větší tloušťky). Podle uspořádání svařovacích elektrod se dělí na dvě hlavní skupiny: [4]

- **přímé bodové svařování** – svary se vytvářejí mezi elektrodami umístěnými souose na protilehlých stranách svařovaných dílů (**Obr. 4 vlevo**),
- **nepřímé bodové svařování** – svary se vytvářejí tak, že elektrody jsou umístěny v různých osách pouze z jedné strany svařovaných dílů a druhá strana dílů se opírá o podložku (**Obr. 4 vpravo**).



*Obr. 3 Schéma odporového bodového svařování [6]*



1 – bodový svar, 2 – svařovaný materiál,  
3 – zdroj proudu, 4 – tyčové elektrody.

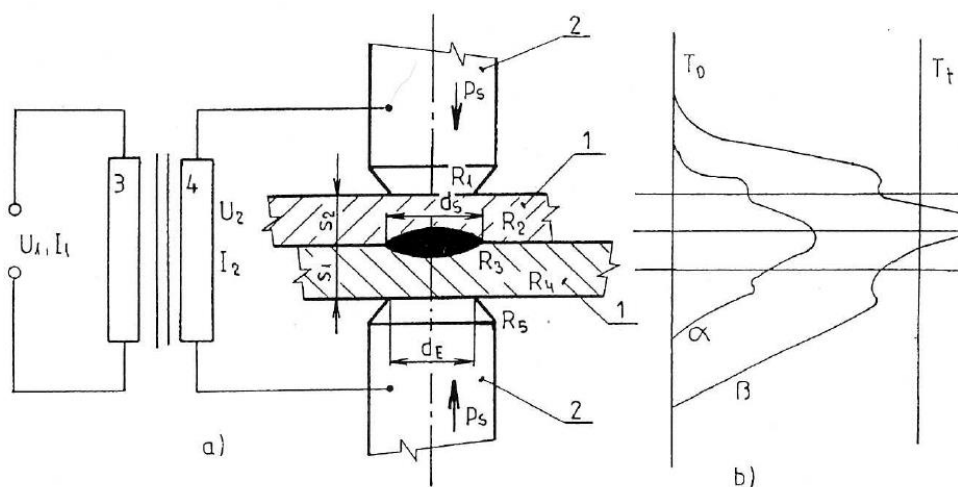
1 – bodové svary, 2 – svařovaný materiál,  
3 – zdroj proudu, 4 – tyčové elektrody,  
5 – vodivá deska.

**Obr. 4** Přímé bodové svařování (vlevo) a nepřímé bodové svařování (vpravo) [7]

### 2.2.1 Princip odporového bodového svařování

Svařované díly jsou sevřeny a stlačeny mezi elektrodami, tím se sepne obvod svařovacího proudu. Procházející proud společně s přechodovým odporem vyvolá teplo, které ohřívá místo spoje a to přibližně ve sloupci o stejném průměru jako má svařovací elektroda. Jakmile se dosáhne teploty tavení, dojde k vytvoření tekutého jádra spoje a proběhne svaření. Poté je svařovací proud přerušen, přítlak dále trvá a svar i jeho plastické okolí rychle ztuhne. [7]

Nejvyšší teplota je během procesu svařování v místě největšího elektrického odporu, tzn. mezi svařovanými díly (**Obr. 5**). V tomto místě se přesáhne teplota tavení svařovaných součástí.



a) schéma upořádání b) průběh teplot (a – po době 0,02 s,  $\beta$  – po době 0,1 s)  
1 – svařované materiály, 2 – svařovací elektrody, 3 – primární vinutí transformátoru,  
4 – sekundární vinutí transformátoru.

**Obr. 5** Princip odporového bodového svařování [8]

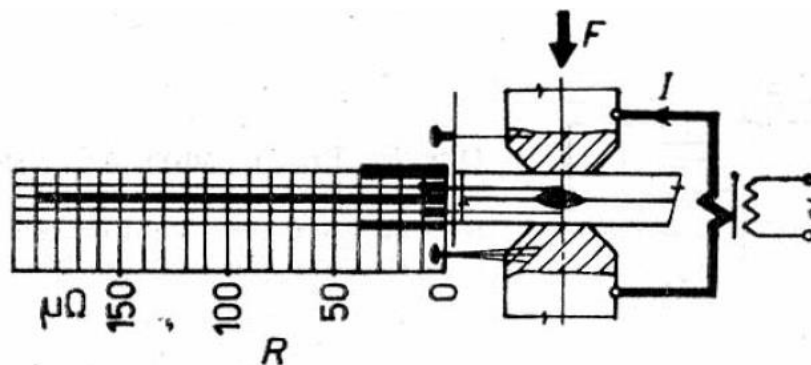
## 2.2.2 Přejchodové a materiálové odpory

V místě svaru se vyskytuje několik dílčích elektrických odporů, jejichž součet tvoří celkový odpor  $R$ , který se podílí na vzniku tepla. Jednotlivé odpory jsou uvedeny na **Obr. 5** a jejich označení a význam je následující: [7]

- $R_1, R_5$  – přechodové odpory mezi svařovací elektrodou a svařovaným materiálem. Tyto přechodové odpory jsou při odporovém svařování nežádoucí.
- $R_2, R_4$  – vlastní odpory svařovaných materiálů.
- $R_3$  – přechodový odpor mezi svařovanými materiály, který je funkcí tloušťky a odporu vrstvy oxidů, nerovnostmi povrchu, velikosti přitlačné síly apod. Tento odpor je ze všech největší (**Obr. 6**), proto je mezi svařovanými materiály dosaženo nejvyšší teploty.

Výsledný elektrický odpor:

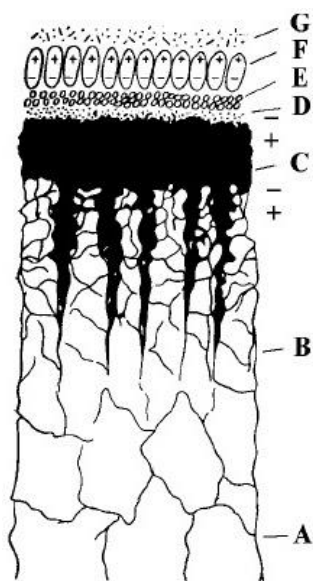
$$R = \sum_{i=1}^n R_n = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad [\Omega] \quad (1)$$



*Obr. 6 Složky celkového odporu svarového spoje při bodovém svařování [3]*

## 2.2.3 Odporový ohřev

Fyzikální stav povrchu svařovaného materiálu je charakterizován přítomností, složením a strukturou povrchových povlaků a vrstev. Obvyklý stav povrchu kovových těles vystavených působení vzduchu je na **Obr. 7**. V závislosti na konkrétních podmínkách a složení vnějšího prostředí může být tloušťka a pořadí vrstev různé. Vrchní vrstva je však obvykle tvořena oxidy. [4]



- A – vrstva materiálu plasticky nedeformovaného,  
B – povrchová vrstva plně dezorientovaných  
krystalů s mezivrstvami oxidů,  
C – vrstva oxidů s charakteristickou polaritou vrchních  
vrstev kovu (polarita označena + a -),  
D – adsorpční vrstva kyslíkových iontů a neutrálních  
molekul vzduchu,  
E – vrstva molekul vody,  
F – vrstva molekul tuků,  
G – ionizované prachové částice.*

**Obr. 7** Povrch kovu na vzduchu [9]

Při styku dvou kovových částí se jejich povrchy vzájemně dotýkají nejprve v místech vrcholků povrchových nerovností. I při malém vnějším zatížení je tlak v těchto místech tak vysoký, že způsobuje plastické deformace. Jak již bylo uvedeno na **Obr. 7**, je většina kovů pokryta za normálních okolností vrstvami oxidů a dalších povlaků, které mají vysoký elektrický odpor (v podstatě se jedná o izolátory). Vodivé mikrokontakty jsou proto omezené pouze na ta místa, kde působením plastické deformace došlo k narušení těchto vrstev a povlaků. Kovové kontakty se vytvoří pouze na části dotýkajících se ploch. [4]

U bodového svařování dochází na začátku svařovacího procesu k intenzivnímu vývinu tepla především na styku svařovaných plechů. Vzniklé teplo se vedením šíří do bezprostředně přilehlých objemů základního materiálu a zvýšení teploty má za následek vzrůst měrného elektrického odporu. Průchodem elektrického proudu se v těchto oblastech vytváří další teplo. Původně plošný zdroj tepla se mění na objemový, kde teplo vniká i po praktickém zániku přechodových odporů ve styku plech – plech. [4]

V průběhu svařovacího procesu se celkový elektrický odpor mezi elektrodami mění. To vede i k časové závislosti všech základních elektrických veličin v sekundárním okruhu svařovacího zařízení. [4]

Celkové množství tepla vyvinuté průchodem svařovacího proudu svařovanými díly závisí na následujících veličinách: [7]

- protékající elektrický proud  $I$  [A],

- elektrický odpor vodiče  $R$  [ $\Omega$ ] – skládá se z několika dílčích odporů,
- doba průtoku elektrického proudu  $t$  [s].

Závislost těchto veličin lze matematicky popsat tzv. Jouleovým – Lenzovým zákonem:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad [J] \quad (2)$$

Množství tepla vyvinuté v jednotce objemu materiálu za sekundu, při průchodu svařovacího proudu o hustotě  $J$ , se určí z následujícího vztahu a označuje se jako intenzita objemového zdroje tepla. [4]

$$q_v = \rho \cdot J^2 = \frac{J^2}{\sigma} \quad [\Omega \cdot A^2 \cdot m^{-3}] \quad (3)$$

$\rho$  – měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot m$ ]

$J$  – proudová hustota [ $A \cdot m^{-2}$ ]

$\sigma$  – měrná elektrická vodivost [ $S \cdot m^{-1}$ ]

Měrný elektrický odpor je nejdůležitější fyzikální charakteristika a ukazatel vhodnosti materiálu pro odporové svařování. Závisí především na chemickém složení a v menší míře také na stavu materiálu. V **Tab. 1** je přehled měrného elektrického odporu různých kovů a slitin při teplotě 20 °C. [4]

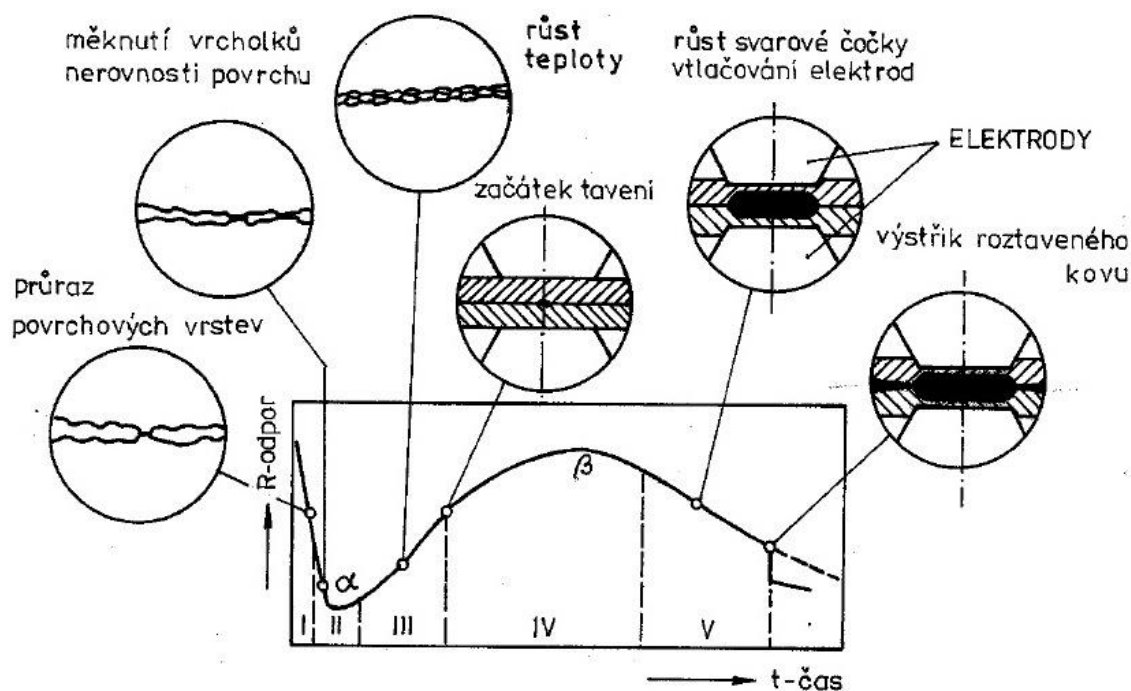
**Tab. 1** Měrný elektrický odpor různých kovů a slitin při teplotě 20 °C [10]

Materiál	Měrný elektrický odpor $\rho$ [ $\mu\Omega \cdot m$ ]
Cín	0,11
Hliník	0,0278
Měď	0,0175
Nikl	0,07
Olovo	0,21
Platina	0,108
Stříbro	0,016
Tantal	0,12
Wolfram	0,05
Zinek	0,059
Zlato	0,022
Čisté železo	0,1
Měkká (nizkouhlíková) ocel	0,12 – 0,2
Rychlořezná ocel	0,48
Korozivzdorná ocel (18Cr9Ni)	0,7 – 0,75
Transformátorový plech	0,5
Bronz (94Cu6Sn)	0,055



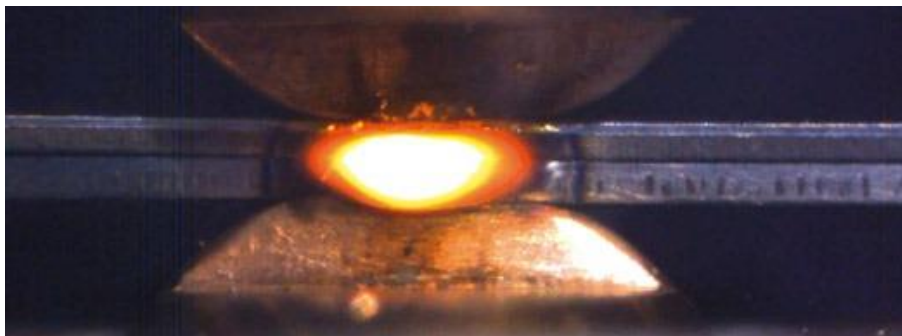
## 2.2.4 Metalurgický proces

Na **Obr. 8** je znázorněn vliv časové závislosti elektrického odporu během svařování na metalurgický pochod tvorby svarové čočky.



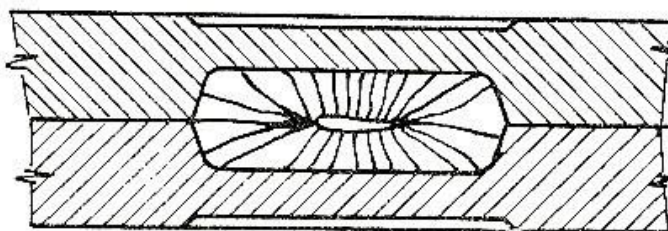
**Obr. 8** Metalurgický proces vytváření svarové čočky u bodového svařování (nízkouhlíková nelegovaná ocel) [9]

Při bodovém odporovém svařování dochází díky vnesenému teplu pomocí elektrického proudu a odporu k natavení obou svařovaných dílů v konkrétním místě (**Obr. 9**). Pro vznik každého bodového svaru je tedy charakteristický intenzivní ohřev v omezené oblasti až na teplotu tavení a následné rychlé ochlazení (rychlost ohřevu a následného ochlazení může dosáhnout hodnot až  $100\,000\text{ °C}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Tento cyklus probíhá při ustavičném přitlačování svařovaných dílců k sobě. Svařované dílce se zahřívají vnitřně na místě budoucího svaru bez přímého přívodu tepla zvenku. Úpravou svařovacích podmínek je snaha získat přiměřený objem roztaveného kovu, což je možné dosáhnout tehdy, když je teplota tavení soustředěna ve středu budoucího svaru a nedostane se na povrch svařovaných dílů. [2, 7]



*Obr. 9 Natavení svařovaných dílců [11]*

Pokud jsou svařovací podmínky nastaveny tak, že tavení nastane v místě styku svařovaných dílců, pak postupuje toto tavení směrem dovnitř svařovaného materiálu a vytvoří útvar roztaveného kovu ve tvaru čočky, jejíž tloušťka musí být vždy menší, než je součet tloušťek svařovaných dílců, např. plechů. Dosedající chlazené měděné elektrody podporují odvod tepla z povrchu svařovaného materiálu, čímž brání k jeho úplnému přetavení. Elektrody přivádějící elektrický proud do svaru současně stlačují svařované dílce a brání vystříknutí expandujícího roztaveného kovu a plynů ven ze svaru. Vznikající svar je jakoby uzavřený v tuhé kovové nádobě (dutině), kam je omezený přístup vzduchu. Dále následuje proces ochlazování, který může být přirovnán k ochlazování oceli v kokile. [2]



*Obr. 10 Průřez bodového svaru (krystalizace a staženina v jeho středu) [2]*

Roztavením základního materiálu je však porušena původní mikrostruktura kovu, odstraní se textura a objeví se nové krystalizující útvary – dendrity. Orientace dendritů naznačuje odvod tepla povrchem svařovaných plechů do chlazených svařovacích elektrod, přičemž se ve středu svaru vytvoří dutinka mikroskopických rozměrů. Dutinka (staženina) se objeví tam, kde se nejdéle držel tekutý kov (**Obr. 10**). Tento jev je možné pozorovat u každého bodového svaru a nesmí se zaměnit např. s vystříknutým kovem ze svaru nebo s jinými úkazy nehomogenity svaru. [2]

Vzniklý čočkovitý tvar je symetrický k rovině styku svařovaných dílců, tedy i ke středu ohřevu. Tento předpoklad se uskuteční pouze při zachování tzv. tepelné rovnováhy ve svaru. Její porušení nastane např. při svařování materiálů odlišné tloušťky, materiálů různé kvality nebo při použití nesprávných svařovacích elektrod. [2]

### 2.2.5 Mechanický proces

Mechanický proces při odporovém svařování je reprezentován působením tlaku po dobu svařování a patří k jeho základním činitelům. Působení tlaku je možné rozdělit do tří za sebou následujících period: [2]

- a) přitlačení,
- b) svaření,
- c) kování (zpracování svaru).

V periodě přitlačení má přitlačná síla zlepšit přilnutí svařovaných dílců k sobě. Tento požadavek je obzvláště důležitý při svařování lisovaných plechů, které je z důvodu pružení nebo nerovnosti výlisků obtížné svařovat bez zvýšené přitlačné síly. Svařovací elektrody dosedající na povrch výlisku přizpůsobí výlisek svařovanému protikusmu a vytvoří tak podmínky pro vznik přechodového odporu, a tím i svaru, v místě styku materiálů. Mimo tohoto, elektrody (se sférickou dosedající plochou) protlačí jemnou vrstvu oxidů nebo jiných nečistot, které ještě zůstaly po očištění na povrchu materiálu. [2]

Po dobu svařování, tj. v průběhu metalurgického procesu, udržuje svařovací tlak tavící se kov v uzavřené dutině a brání jeho vystříknutí, současně trvá funkce tlaku z předcházející periody. [2]

V konečné fázi svařovacího cyklu, kdy se již vytvořil dokonalý tavný svar a začíná tuhnout, má působení tlaku (zpravidla zvýšeného) zlepšit strukturu svaru. Ve svaru se vytvoří hrubozrnná struktura litého kovu, kterou je možné zjemnit působením zvýšeného tlaku. Při svařování kalitelného materiálu, který můžeme vyžít přímo při svařování snížením svařovacího proudu v poslední periodě, tj. po dobu žihání, musí působit nižší tlak, aby nedošlo k deformaci žiháním změkklého materiálu. Kovací tlak působí v některých případech příznivě na odstranění staženin vyskytujících se hlavně při svařování materiálů s hrubší strukturou. [2]

### 2.2.6 Svařovací parametry

Základními svařovacími parametry u bodového svařování jsou:

- svařovací (přítlačná) síla  $P_s$  [kN],
- svařovací proud  $I_s$  [kA],
- svařovací čas  $t_s$  [ms], [1 perioda = 20 ms].

Tyto hodnoty je možné nastavovat na svařovacím zařízení a mění se s ohledem např. na tloušťku a materiál svařovaných plechů.

Svařovací parametry se orientačně pohybují v následujících intervalech: [8]

- svařovací (přítlačná) síla  $P_s$  – 0,5 až 10 kN,
- svařovací proud  $I_s$  – 1 až 100 kA,
- svařovací čas  $t_s$  – 40 až 2 000 ms.

Tyto intervaly vykazují velké rozpětí daných parametrů, protože zahrnují oba druhy svařovacích režimů. Každému ze svařovacích režimů odpovídají typické parametry, které se pohybují v menším rozmezí. O těchto svařovacích režimech je uvedeno více v následující podkapitole.

V následující tabulce (**Tab. 2**) jsou pro ukázkou uvedeny orientační hodnoty svařovacích parametrů pro odporové bodové svařování pozinkovaných plechů, které jsou v automobilovém průmyslu hojně využívány na výrobu karoserie, dle normy ČSN EN ISO 14373 Odporové svařování – Postup pro bodové svařování nepovlakovaných a povlakovaných nízkouhlíkových ocelí.

**Tab. 2** Směrné hodnoty svařovacích parametrů pro bodové svařování pozinkovaných ocelových plechů tloušťky 0,4 až 3,0 mm dle ČSN EN ISO 14373 [12]

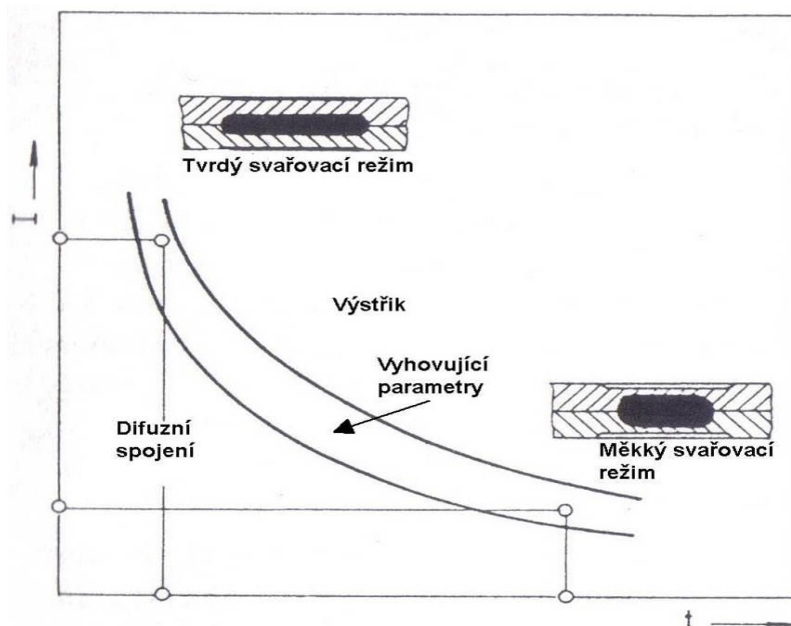
Tloušťka jednoho plechu		Průměr plochy elektrody	Svařovací parametry					
			Pozinkováno ponorem <sup>a</sup>			Elektrolyticky pozinkováno <sup>b</sup>		
			Síla	Doba svaru v periodách <sup>c</sup>	Proud	Síla	Doba svaru v periodách <sup>c</sup>	Proud
mm	mm	mm	kN		kA	kN		kA
> 0,4	≤ 0,6	4	1,5 až 2,0	6 až 8	7 až 9	1,5 až 2,0	6 až 8	6 až 8
> 0,6	≤ 0,8	4	1,9 až 2,0	8 až 10	8 až 10	1,9 až 2,2	8 až 10	7 až 9
> 0,8	≤ 1,0	5	2,2 až 2,9	9 až 12	9 až 11	2,2 až 2,9	9 až 12	8 až 10
> 1,0	≤ 1,2	5	2,8 až 3,6	10 až 13	10 až 13	2,8 až 3,6	10 až 13	9 až 13
> 1,2	≤ 1,6	6	3,4 až 4,5	11 až 15	14 až 16	3,4 až 4,5	11 až 15	12 až 15
> 1,6	≤ 2,0	7	4,4 až 5,5	12 až 16	18 až 21	4,4 až 5,5	12 až 16	14 až 17
> 2,0	≤ 2,5	8	5,4 až 6,8	14 až 18	22 až 26	5,4 až 6,8	14 až 18	17 až 22
> 2,5	≤ 3,0	9	6,6 až 8,0	17 až 21	26 až 30	6,6 až 8,0	17 až 21	19 až 24

<sup>a</sup> Vhodné pro tloušťky povlaku G275 (t = 20 μm na jedné straně).  
<sup>b</sup> Vhodné pro tloušťky povlaku 7 μm na jedné straně.  
<sup>c</sup> 1 perioda = 0,02 s

### 2.2.7 Druhy svařovacích režimů

Požadovaného tepla při odporovém bodovém svařování lze dosáhnout výše zmíněnými dvěma různými režimy svařování (**Obr. 11**). Prvním režimem je **měkký režim svařování**, který je charakterizován nižší přítlačnou silou, nižším svařovacím proudem a delším časem svařování. Druhý je **tvrdý režim svařování**, u kterého jsou svařovací parametry v opačném poměru, tzn. vyšší přítlačná síla, vyšší svařovací proud a kratší čas svařování. [8]

Intervaly hodnot základních svařovacích parametrů pro jednotlivé svařovací režimy jsou uvedeny v **Tab. 3**.



$I$  – svařovací proud [kA],  $t$  – svařovací čas [1 perioda = 20 ms]

**Obr. 11** Oblasti měkkého a tvrdého svařovacího režimu [13]

**Tab. 3** Srovnání parametrů svařování jednotlivých svařovacích režimů [3]

	Měkký režim	Tvrdý režim
Přítláčná síla $P_s$ [kN]	do 1	~ 2
Svařovací proud $I_s$ [kA]	do 5	~ 10
Svařovací čas $t_s$ [ms]	nad 500	~ 160

### Měkký svařovací režim

Výhody:

- nevyžaduje zařízení velkého příkonu
- umožňuje používat menší průřezy elektrických vodičů
- je méně citlivý na odchylky odporové svařitelnosti svařovaných materiálů

Nevýhody:

- vyžaduje delší strojové časy (nižší produktivita)
- vznikají větší deformace a napětí ve svarových spojích
- vzniká hrubozrnná struktura svarového kovu
- nutná častější úprava svařovacích elektrod

### **Tvrký svařovací režim**

Výhody:

- krátké strojní časy
- krátkodobé působení svařovací teploty (rychlé chladnutí svaru) vede k jemnozrnné struktuře svarového kovu
- minimální napětí a deformace
- menší spotřeba elektrické energie a svařovacích elektrod

Nevýhody:

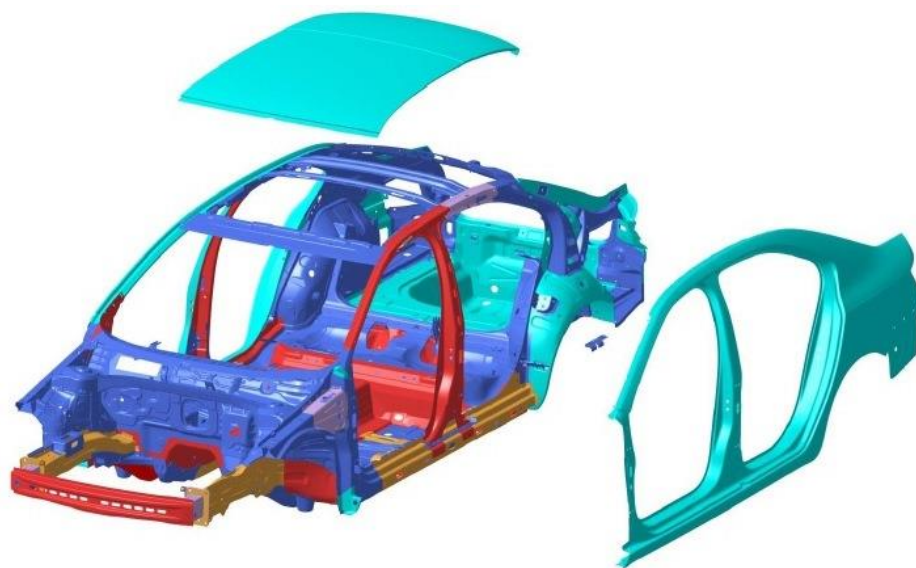
- vyžaduje zařízení velkých příkonů a silnějších konstrukcí
- vyžaduje dobrou energetickou situaci v podniku

[14]

### 3 Materiály používané v automobilovém průmyslu

V dnešní době je trend takový, že materiály používané na výrobu samonosných karoserií v automobilovém průmyslu, musí mít vysokou pevnost při zachování dostatečné plasticity pro tváření. Nejčastěji se zatím používají ocelové materiály, ale některé automobilové závody již vyrábějí karoserie z hliníkových slitin. Je to otázka ceny (vyšší u hliníkové karoserie), ale na druhou stranu i hmotnosti, kdy hliníková karoserie je až o 43 % lehčí než karoserie ocelová. Proto se vyvíjejí moderní vysokopevnostní ocelové materiály, aby automobilová karoserie, kde je použita velká část těchto vysokopevnostních materiálů právě pro redukci hmotnosti, alespoň trochu konkurovala karoserii hliníkové. Hmotnost je tedy dalším, velmi důležitým kritériem pro stavbu automobilu.

#### 3.1 Kategorie nejčastěji používaných (ocelových) materiálů



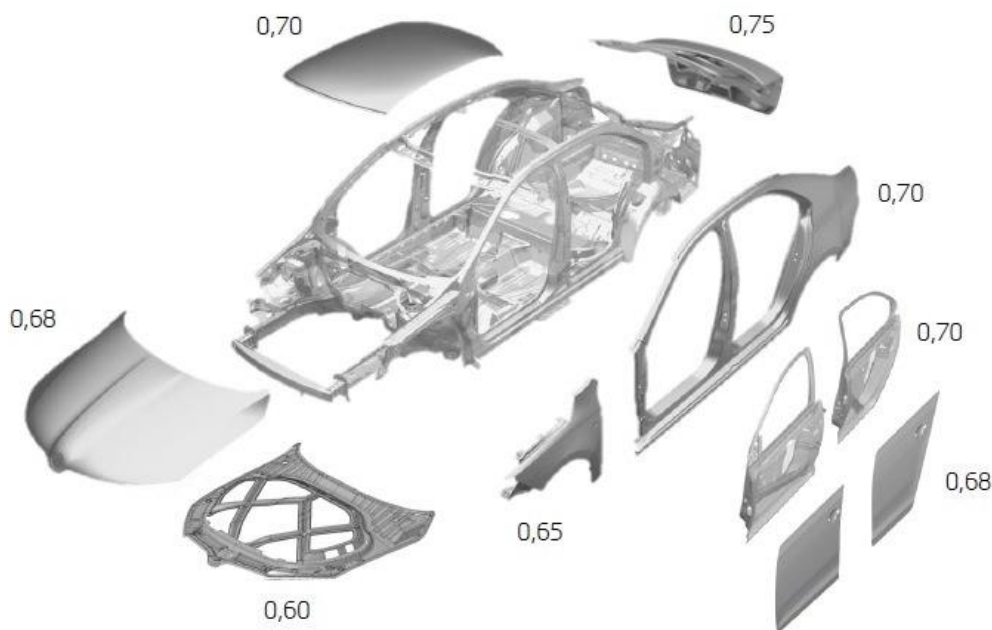
Typ oceli	Mez kluzu	100 %
Hlubokotažná ocel (LSS)	< 200 MPa	21,2 %
Vysokopevnostní ocel (HSS)	200 – 400 MPa	33,6 %
Ultra vysokopevnostní ocel (UHSS)	400 – 700 MPa	16,2 %
Speciální vysokopevnostní ocel (AHSS)	700 – 1000 MPa	2,9 %
Za tepla tvářená vysokopevnostní ocel (PHS)	1000 – 1200 MPa	26,1 %

Obr. 12 Materiálový koncept – Škoda Octavia III [15]

Karoserie je vyrobena z několika různých druhů ocelových plechů (Obr. 12), z nichž má každý svoji určitou výhodu a podle ní je použit právě na konkrétní díl karoserie. Dnes jsou automobiloví výrobci velice omezováni Evropskou unií, která klade velký důraz na životní






prostředí (snižování emisí). Toho se docílí menší spotřebou motoru, právě za přispění co nejlehčí karoserie. Proto se v dnešní době při výrobě karoserií klade velký důraz na snižování tloušťky plechů (**Obr. 13, Tab. 4**) při použití materiálů s vyšší pevností, což vede ke snížení hmotnosti a tím i spotřeby motoru. Dále se také stále více používají vysokopevnostní (martenzitické) oceli, tvářené za tepla, z nichž se vyrábějí bezpečnostní prvky karoserie.



**Obr. 13** Tloušťky plechů [mm] – Škoda Octavia III [15]

**Tab. 4** Srovnání tlouštěk plechů tří generací modelu Škoda Octavia [15]

			
	<b>Octavia I</b>	<b>Octavia II</b>	<b>Octavia III</b>
	Tloušťka [mm]		
<b>Kapota</b>	0,75	0,70	0,68
<b>Přední blatník</b>	0,75	0,75	0,65
<b>Střecha</b>	0,80	0,75	0,70
<b>Postranice vnější</b>	0,75	0,75	0,70
<b>Povrchové dveře</b>	0,80	0,70	0,68
<b>Vnitřní dveře</b>	0,80	0,75	0,70

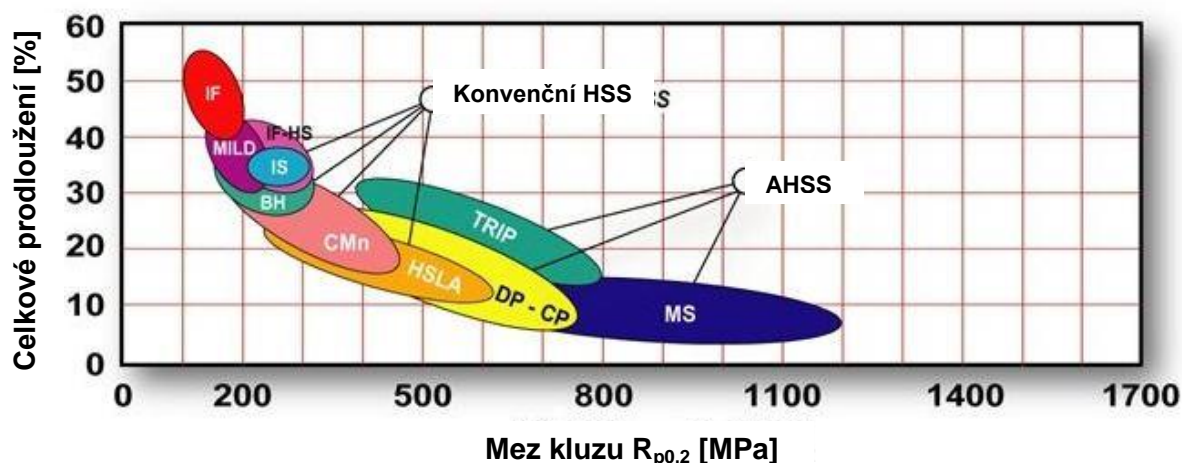
### 3.1.1 Konkrétní typy používaných ocelí

V automobilovém průmyslu lze oceli rozdělit dle několika způsobů. Jedním ze způsobů je klasifikace ocelí podle metalurgie, kdy oceli rozdělujeme do těchto základních tříd: [16]

- **nízkopevnostní oceli (LSS)** – jedná se o hlubokotažné oceli (plechy) a patří sem např. IF a Mild oceli,
- **konvenční vysokopevnostní oceli (HSS)** – do této třídy spadají např. IF-HS, BH, CMn a HSLA oceli,
- **pokročilé vysokopevnostní oceli (AHSS)** – někdy také označovány jako UHSS, jsou materiály s ještě vyšší pevností než HSS oceli, zástupci této třídy jsou např. DP, CP, TRIP, TWIP a MS oceli,
- **za tepla tvářené vysokopevnostní oceli (HF či PHS)** – oceli s nejvyšší pevností ze všech výše uvedených, které se používají na bezpečnostní prvky karoserie, spadají sem zejména manganbórové oceli (22MnB5).

Mez kluzu  $R_{p0,2}$  se u ocelí HSS pohybuje v rozmezí 180 až 600 MPa a u ocelí AHSS v intervalu 350 až 1200 MPa. Hodnoty meze pevnosti v tahu  $R_m$  u HSS ocelí jsou v rozmezí 300 až 800 MPa a AHSS ocelí v intervalu 500 až 1600 MPa. [17, 18]

**Obr. 14** znázorňuje porovnání celkového prodloužení a meze kluzu  $R_{p0,2}$  výše uvedených materiálů.



*Obr. 14* Závislost celkového prodloužení na mezi kluzu daných ocelí [19]

## 3.2 LSS (Low Strength Steel) oceli

Jak již bylo zmíněno výše, do této kategorie patří oceli (IF, Mild) s nízkou pevností.

### 3.2.1 IF (Interstitial Free) oceli

Jedná se o tzv. oceli bez intersticií, což znamená, že při krystalizaci nejsou ve struktuře přítomny žádné intersticiální atomy, které by ocel zpevňovaly. Díky nedostatku intersticiálních atomů v atomové struktuře mají tyto oceli extrémně vysokou tažnost (**Tab. 5**), ideální pro hlubokotažné výrobky, proto se také někdy tato ocel označuje jako EDDS (Extra Deep Drawing Steel). [20]

IF oceli mají feritickou matici a jsou mikrolegovány Ti nebo Nb (silné karbidotvorné a nitridotvorné prvky) pro snížení obsahu C a N pod velmi nízké hodnoty (0,005 %), čímž je docíleno vynikajících plastických vlastností. Proto se tato ocel používá v automobilovém průmyslu na tvarově složité díly. [21]

IF oceli je možné velmi dobře svařovat jak tavným, tak tlakovým způsobem svařování. [20]

**Tab. 5** Obsah uhlíku a mechanické vlastnosti IF oceli [21]

Obsah C [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	$n^1$ [-]
0,001 – 0,01	165	120 – 290	47	$\geq 0,20$
<sup>1</sup> Exponent deformačního zpevnění				

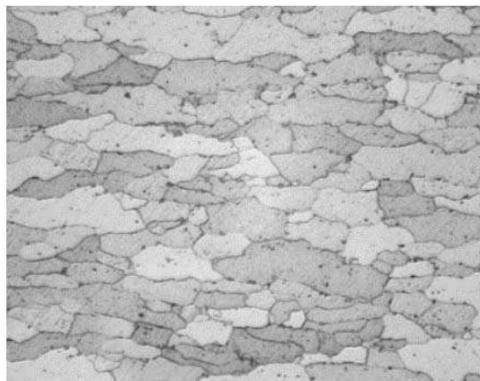
### 3.2.2 Mild oceli

Jedná se o běžné nízkouhlíkové oceli s nižší pevností, které mají v zásadě feritickou strukturu (**Obr. 15**) a jsou stabilizovány mikrolegujícími prvky, jako je Ti a/nebo Nb. Do této kategorie ocelí spadá několik poddruhů, jako např. CS (Commercial Steel), DS (Drawing Steel) – **Tab. 6**, FS (Forming Steel), apod. [22, 23]

Mild oceli mohou být snadno svařovány při použití všech obvyklých svařovacích technik. [23]

**Tab. 6** Obsah uhlíku a mechanické vlastnosti oceli s označením DS (Drawing Steel) [23]

Obsah C [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	$n$ [-]
0,02 – 0,15	172	310	46	0,21



*Obr. 15* Typická mikrostruktura DS oceli [23]

### 3.3 HSS (High Strength Steel) oceli

Tuto kategorii zahrnují nejpoužívanější (konvenční) oceli (IF-HS, BH, HSLA) na výrobu automobilové karoserie. Jedná se o oceli s vysokou pevností.

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

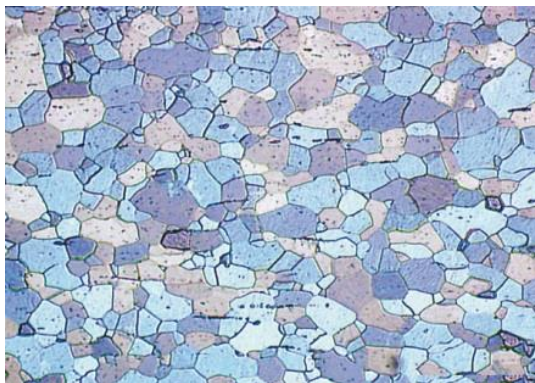
Jedná se o IF oceli, které jsou navíc zpevněny přísadou Mn, Si a P do tuhého roztoku feritu (stejně jako klasické IF oceli mají feritickou strukturu – **Obr. 16**). Jejich nízký poměr mezi  $R_m/R_{p0,2}$  a vysoký exponent deformačního zpevnění zajišťuje těmto ocelím vynikající hlubokotažnost, proto jsou tyto oceli vhodné zejména pro složité součásti, které vyžadují vysokou pevnost (např. podběhy kol). [24]

IF-HS oceli je možné velmi dobře svařovat všemi možnými způsoby. [24]

V **Tab. 7** je uvedeno chemické složení a mechanické vlastnosti IF-HS oceli s označením IF 180 (dle normy EN 10268: 2006+A1: 2013 je označena jako HC180Y). [24]

*Tab. 7* Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli IF 180 (HC180Y) [24]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]	n [-]
max. 0,01	max. 1,0	max. 0,25	180 – 230	340 – 400	$\geq 35$	$\geq 0,19$



*Obr. 16* Typická mikrostruktura oceli IF 180 (HC180Y) [24]

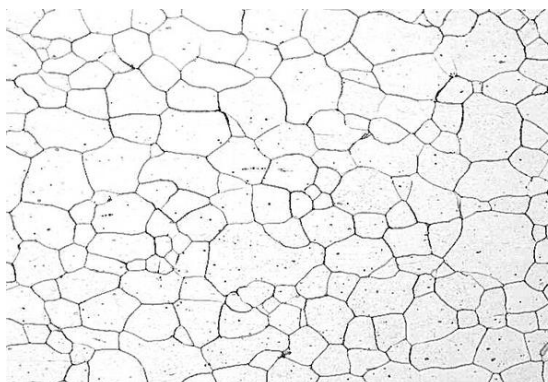
### 3.3.2 BH (Bake Hardenable) oceli

BH oceli mají základní feritickou mikrostrukturu (**Obr. 17**). Chemické složení a proces výroby je navržen tak, aby uhlík ve fázi výroby byl přítomen v roztoku a posléze byl uvolněn ve fázi vytvrzování (při teplotě vypalování laku – 170 °C po dobu 20 minut), díky čemuž je umožněno zvýšení meze kluzu (BH efekt). Příčinou zvýšení meze kluzu jsou různé zpevňovací procesy (precipitace karbidů, zvětšení velikosti zrna během vytvrzování a zvýšení rychlosti ochlazování okamžitě po vytvrzení). Tyto oceli se používají pro výrobu např. dveří a kapot. [21, 22]

BH oceli mohou být snadno svařovány všemi konvenčními procesy svařování, vzhledem k jejich nízkému obsahu základních a legujících prvků. [24]

*Tab. 8* Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 180 BH (HC180B) [24]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	n [-]
max. 0,04	max. 0,7	max. 0,5	180 – 230	300 – 360	≥ 34	≥ 0,17



*Obr. 17* Typická mikrostruktura oceli 180 BH (HC180B) [24]

### 3.3.3 HSLA (High Strength Low Alloy) oceli

Tato skupina ocelí se vyrábí válcováním za studena i za tepla a je zpevněna především mikrolegujícími prvky (V, Ti, Nb), které přispívají k jemné precipitaci karbidů a ke zjemnění zrna. To má za následek zvýšení pevnosti u mikrolegované oceli a zlepšení svařitelnosti, neboť tyto oceli nevykazují změkčení ani zhrubnutí zrna v oblasti svaru. Tyto materiály jsou vhodné zejména pro konstrukční (výztužné) díly karoserie. [22, 24]

HSLA oceli mohou být snadno svařovány při použití všech běžných svařovacích procesů. [24]

*Tab. 9 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli HSLA 340 (HC340LA) [24]*

C [%]	Mn [%]	Si [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]
max. 0,08	max. 0,7	max. 0,04	340 – 400	420 – 490	≥ 23



*Obr. 18 Typická mikrostruktura oceli HSLA 340 (HC340LA) [24]*

### 3.4 AHSS (Advanced High Strength Steel) oceli

Tato kapitola se věnuje speciálním vysokopevnostním ocelím (DP, CP, TRIP, TWIP, MS), jejichž využití je vhodné na bezpečnostní a nosné prvky automobilové karoserie.

#### 3.4.1 DP (Dual Phase) oceli

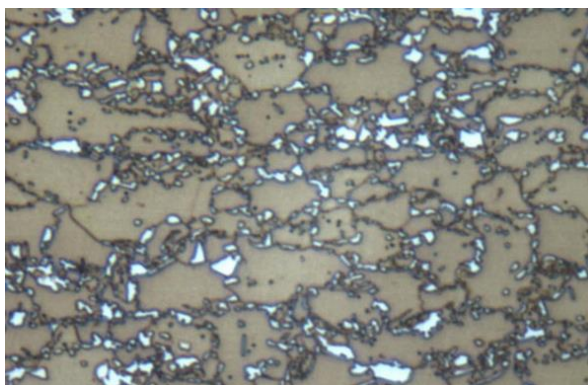
Dvoufázové oceli nabízejí vynikající kombinaci pevnosti a tažnosti, díky jejich mikrostruktúře (**Obr. 19**), ve které je dispergovaná pevná martenzitická fáze (10 – 30 %) ve formě ostrůvku v měkké feritické matrici (70 – 90 %). Tyto oceli mají vysoké mechanické zpevnění, což vede ke zvýšení meze kluzu po tváření. Mez kluzu se dále ještě zvýší díky BH efektu při vypékání laku, stejně jako je tomu u BH ocelí. [24]

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 výztuhy). [24]

Ačkoliv DP oceli jsou více legovány než např. HSLA oceli, i přesto mohou být snadno svařovány při použití obvyklých svařovacích procesů za předpokladu, že jsou upraveny svařovací parametry používané v průmyslových podmínkách. Zejména při svařování laserem svary dosahují vynikající pevnosti. [24]

**Tab. 10** Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli Dual Phase 600 (HCT600X) [24]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	n [-]
max. 0,14	max. 2,1	max. 0,4	330 – 410	600 – 700	≥ 21	0,14



**Obr. 19** Typická mikrostruktura oceli Dual Phase 600 (HCT600X) [24]

### 3.4.2 CP (Complex Phase) oceli

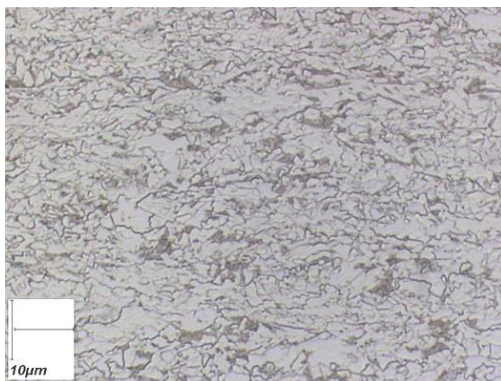
Mikrostruktura vícefázových ocelí (**Obr. 20**) obsahuje malé množství martenzitu, někdy i zbytkového austenitu ve feriticko-bainitické matrici. Vysokého zjemnění zrna lze docílit pomalou rekrystalizací, případně precipitací mikrolegujících prvků Ti nebo Nb. Jednou z výhod CP ocelí je vysoká hodnota meze kluzu při zachování stejné hodnoty meze pevnosti v tahu. [22]

Jako všechny předešlé typy ocelí jsou i CP oceli tvářeny za studena pro získání lehkých konstrukčních prvků. Používají se na výrobu automobilových dílů jednoduchých tvarů (ocel je tedy pouze mírně deformovaná) jako jsou např. dveřní lišty, příruby sedadel. [24]

CP oceli mají velmi dobrou odporovou svařitelnost, kdy rozsah svařovacích parametrů dle normy ČSN EN ISO 18278-2 je poměrně široký. Dále jsou CP oceli velmi dobře svařitelné i laserem. [24]

**Tab. 11** Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli Complex Phase 800 (HDT780C) [24]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]
max. 0,1	max. 2,0	max. 0,25	680 – 830	≥ 780	≥ 10



**Obr. 20** Typická mikrostruktura oceli Complex Phase 800 (HDT780C) [24]

### 3.4.3 TRIP (TRansformation Induced Plasticity) oceli

Jedná se o oceli s transformačně indukovanou plasticitou, které nabízejí vynikající kombinaci pevnosti a tažnosti v důsledku jejich mikrostruktury (**Obr. 21**). Ta se skládá z ostrůvků tvrdého zbytkového austenitu (5 – 15 %) a bainitu (25 – 40 %) rozptýleného v měkké feritické matici (50 – 60 %). Při plastické deformaci se austenit transformuje na martenzit (TRIP efekt). Tyto oceli mají vyšší obsah C než např. DP oceli, pro stabilizaci netransformovaného zbytkového austenitu. Dále mají vyšší obsah Si nebo Al pro urychlení transformace feritu na bainit a pro zabránění vzniku karbidů v oblasti bainitu. [22, 24]

V důsledku jejich vysoké absorpční energie a únavové pevnosti jsou tyto oceli vhodné pro automobilové konstrukční a bezpečnostní díly (příčné a podélné nosníky, výztuhy pro B sloupky a nárazníky). [24]

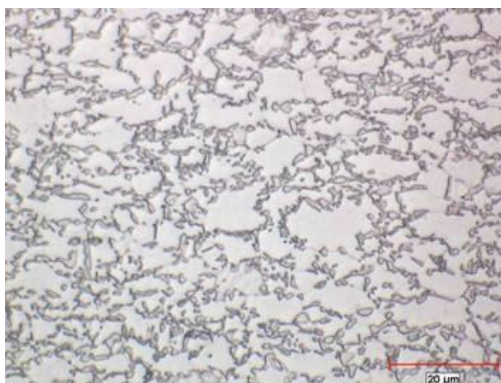
TRIP oceli mohou být snadno svařeny pomocí odporové bodové metody za předpokladu, že jsou správně nastaveny odpovídající svařovací parametry. Vzhledem k vysokému uhlíkovému ekvivalentu (cca 0,5) musí být zvýšena elektrodová síla a upraven svařovací cyklus tak, aby se získal kvalitní svarový bod. Tyto oceli jsou vhodné i pro obloukové svařování metodou MAG, kdy i přes vyšší uhlíkový ekvivalent není zapotřebí zvláštních opatření, aby se



zabránilo vzniku trhlin za studena. Dále je možné použít metodu laserového svařování, která je vhodná pro homogenní svarové spoje (TRIP + TRIP). [24]

**Tab. 12** Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli TRIP 690 (HCT690T) [24]

C [%]	Mn [%]	Al+Si [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]	n [-]
max. 0,2	max. 2,0	max. 2,0	410 – 510	690 – 800	≥ 25	≥ 0,19



**Obr. 21** Typická mikrostruktura oceli TRIP 690 (HCT690T) [24]

#### 3.4.4 TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli

Jak již sám název napovídá, plastická deformace u těchto ocelí probíhá pomocí mechanismu dvojčatění. Díky mechanismu dvojčatění je rychlost deformace velmi výrazná a má vliv na mikrostrukturu, která je velmi jemná. Tyto oceli mají vysoký obsah Mn (17 – 24 %), který udržuje C v tuhém roztoku austenitu, dále jsou dolegovány Al (potlačuje přeměnu austenitu na nežádoucí  $\epsilon$ -martenzit) a Si (zlepšuje pevnost tuhého roztoku). Díky těmto legurám je matrice plně austenitická (**Obr. 22**), dodávající oceli extrémní hodnoty tažnosti při velmi vysoké pevnosti (ještě lepší tvařitelnost vysokopevnostních dílů než u předešlé TRIP oceli s nízkým obsahem Mn). [22, 25]

TWIP oceli mají velmi dobré mechanické výhody oproti ostatním ocelím, takže jsou velmi perspektivní pro automobilový průmysl, díky skvělému spojení vysoké pevnosti a tvařitelnosti, velmi dobré odolnosti proti nárazu a snížení hmotnosti vozidla. Jsou používány v deformačních zónách karoserie. [25]

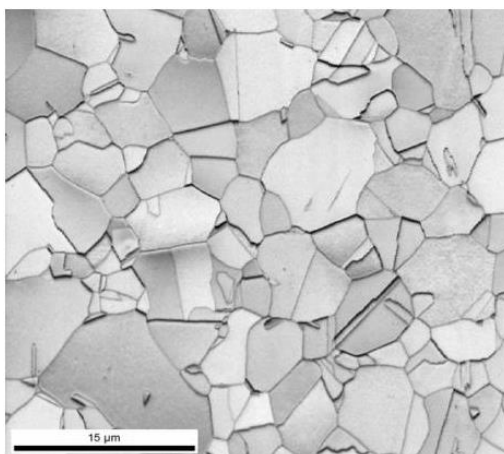
Svařitelnost TWIP ocelí je špatná (zejména u metody TIG). To má za následek vysoký obsah legur (zejména Mn) a mechanismus dvojčatění. Proto jsou svarové spoje těchto ocelí náchylné ke vzniku trhlin za tepla v důsledku austenitického tuhnutí (vysoká objemová roztažnost austenitické fáze), což při tuhnutí (ochlazování) vede k velkému poklesu objemu. Při použití

laserové metody se trhliny za tepla nevyskytují díky nižším tepelným příkonům v porovnání s metodou TIG. Dalším problémem při svařování TWIP ocelí je u metody TIG (ne u laseru) interkrystalická koroze. V neposlední řadě má na svařitelnost neblahý vliv zinek (u zinkem povlakovaných plechů), který ve svarovém kovu vyvábí póry v důsledku vypařování. [26]

V **Tab. 13** je pro ukázkou uvedeno typické chemické složení TWIP oceli a mechanické vlastnosti, odpovídající oceli s tímto konkrétním chemickým složením.

*Tab. 13 Chemické složení a mechanické vlastnosti TWIP oceli [27]*

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Al [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]
0,54	22,9	0,12	0,04	480	1140	57,3



*Obr. 22 Typická mikrostruktura TWIP oceli [22]*

### 3.4.5 MS (Martensitic Steel) oceli

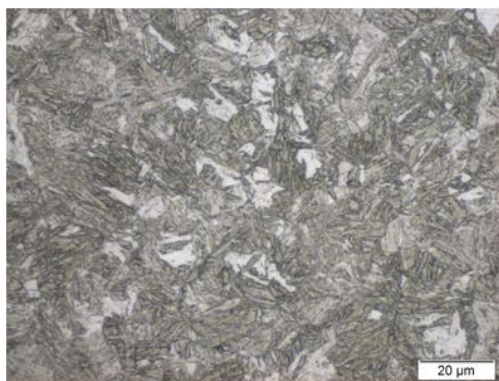
Již podle názvu je patrné, že mikrostruktura (**Obr. 23**) je převážně martenzitická. Ta se získá transformací austenitu při válcování za tepla a následném zakalení (vysoká rychlost ochlazení), resp. za studena, po kterém následuje žihání a poté také zakalení. Martenzitickou strukturu lze také získat tepelným zpracováním až po samotném tváření. Tyto oceli jsou tedy charakterizovány martenzitickou strukturou, která ale obsahuje i malé množství feritu a/nebo bainitu. V rámci skupiny vícefázových ocelí vykazují MS oceli nejvyšší úroveň meze pevnosti v tahu (až do 1700 MPa). MS oceli jsou často po zakalení ještě popuštěny s cílem zlepšit tažnost a mohou tedy poskytnout přiměřenou tvárnost i při extrémně vysokých pevnostech. Přidáním většího množství C se MS ocelím zvyšuje kalitelnost a zpevňuje martenzit. Pro zvýšení kalitelnosti se používají i další prvky v různých kombinacích (Mn, Si, Cr, Mo, B, V, Ni). [22]

Díky vynikajícím mechanickým vlastnostem (vysoká mez pevnosti v tahu) jsou tyto oceli zvláště vhodné pro bezpečnostní prvky se zvýšenou odolností proti nárazům, které jsou součástí automobilové karoserie (části předního a zadního nárazníku, boční prahové výztuže, střešní příčnick). [24]

MS oceli mají dobrou odporovou svařitelnost. Rozsah svařovacích parametrů je poměrně široký. Dále jsou MS oceli dobře svařitelné i laserem. [24]

**Tab. 14** Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli MartINsite® 1200 [24]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>80</sub> [%]
max. 0,13	max. 2,4	max. 0,30	≥ 950	1200 – 1400	≥ 3



**Obr. 23** Typická mikrostruktura oceli MartINsite® 1200 [24]

### 3.5 Za tepla tvářená ocel 22MnB5

Jedná se o jednoho ze zástupců za tepla tvářených ocelí (HF – Hot Formed nebo PHS – Press Hardened Steel). Výrobci této oceli používají různá označení. Za tepla tvářené oceli vyrábí např. společnost ArcelorMittal, která používá samotné označení 22MnB5 nebo také Usibor 1500. Dalším výrobcem je ThyssenKrupp, který používá označení MBW 1500. [24, 28].

Tato ocel je určena pro použití v automobilovém průmyslu na celou řadu konstrukčních nosných (příčné a podélné nosníky, uchycení nárazníku, součásti podvozku) a bezpečnostních částí karoserie (A-sloupek, B-sloupek – **Obr. 24**, boční výztuhy dveří a prahů), které vyžadují dobrou odolnost proti nárazu. Velmi vysoká mechanická pevnost po tvářením umožňuje dosáhnout úspory hmotnosti daného dílu o 30 až 50 % oproti konvenčním ocelím tvářeným za studena. [24]

Hlavními výhodami za tepla tvářené oceli 22MnB5 jsou: [24]

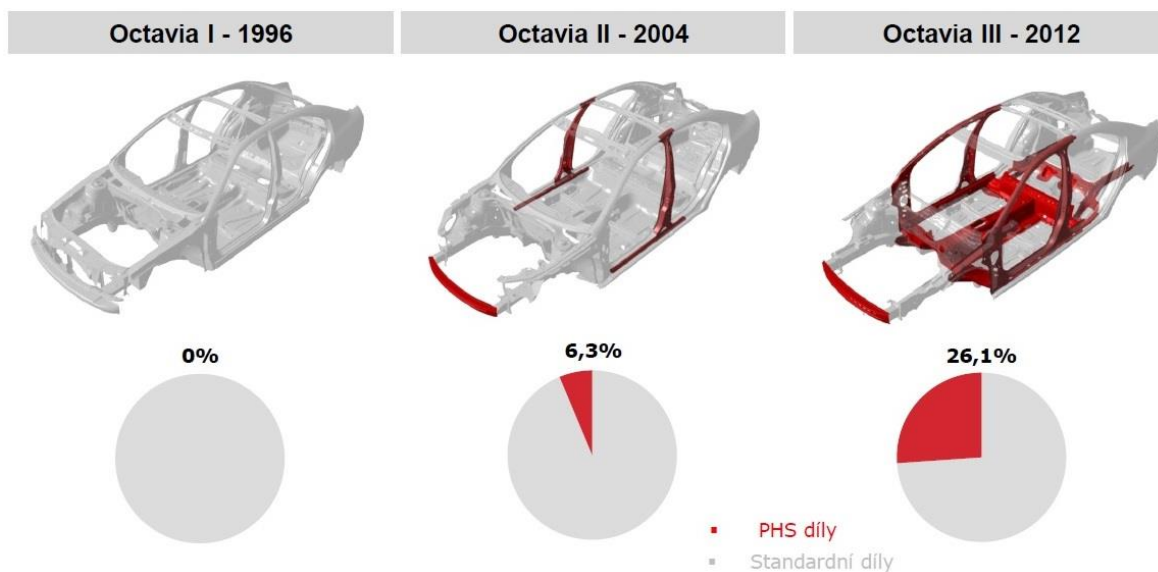
- velmi dobrá tvárnost za tepla umožňuje vyrobít složité geometrie dílu, což integruje další pomocné díly (odstranění výztužných dílů a sestav),
- celková absence odpružení plechu,
- jednotné mechanické vlastnosti po celém dílu,
- výjimečná únavová pevnost a odolnost proti nárazu, což umožňuje podstatné snížení hmotnosti.



*Obr. 24 B-sloupek (tloušťka plechu: 1,85 mm) [24]*

Ve ŠKODA AUTO se tato ocel začala využívat na bezpečnostní prvky v malé míře až v modelu Octavia II. U nejnovějšího modelu Octavia III je již za tepla tvářená ocel zastoupena cca ve čtvrtině celé karoserie, což velmi ušetřilo pohotovostní hmotnost vozu v porovnání s předchozím modelem, a to o 102 kg. [15]

Porovnání využití za tepla tvářené oceli v karoserii jednotlivých modelů Škoda Octavia je uvedeno na **Obr. 25**.



Obr. 25 Použití za tepla tvářených plechů v konstrukci karoserie modelů Škoda Octavia [15]

### 3.5.1 Vlastnosti oceli 22MnB5

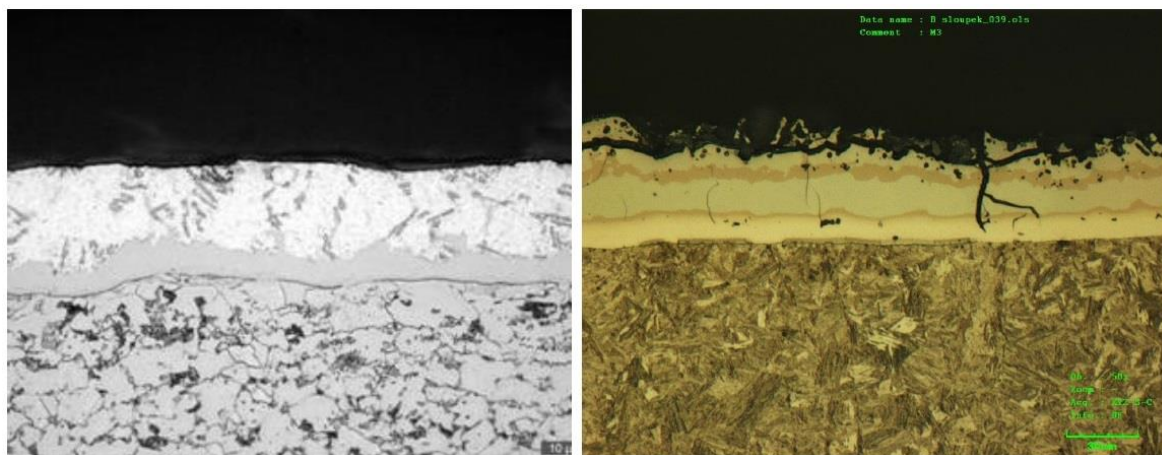
Ocel 22MnB5 je velmi vhodná pro tzv. kalení lisováním. Tato vlastnost je dána přidavkem malého množství bóru (**Tab. 15**), proto se tato ocel také označuje jako bórová nebo manganbórová. Ve stavu dodání má tato ocel feriticko-perlitickou strukturu (**Obr. 26 vlevo**), která zajišťuje nižší hodnoty meze pevnosti v tahu a meze kluzu (**Tab. 16**) a po tváření za tepla, kdy dojde k zakalení lisováním, má strukturu martenzitickou (**Obr. 26 vpravo**), která zajistí výrazný nárůst hodnot meze pevnosti v tahu a meze kluzu. [22, 24]

Tab. 15 Chemické složení oceli 22MnB5 [29]

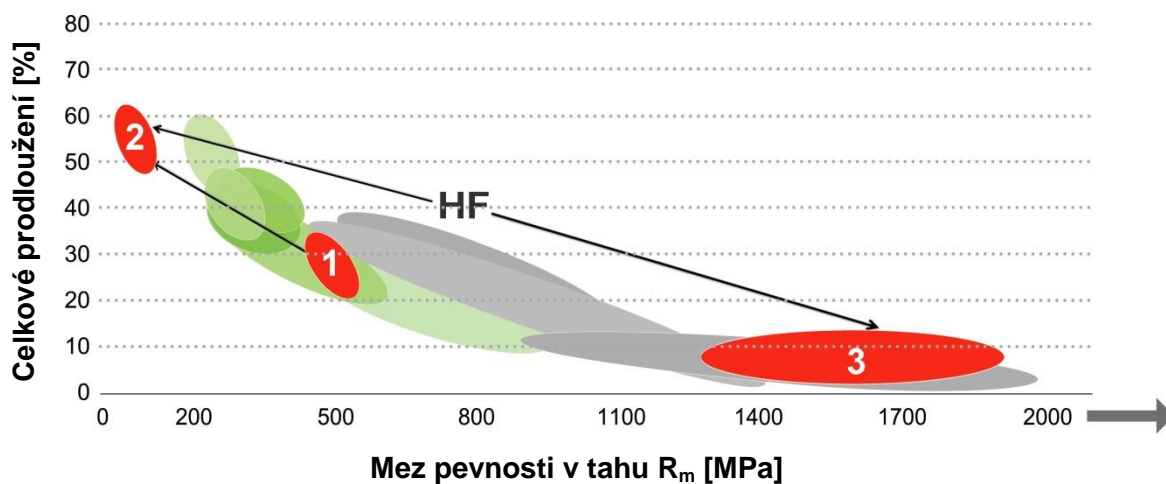
C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	P [%]	S [%]	Ti [%]	Al [%]	B [%]
0,20 až 0,25	0,15 až 0,40	1,10 až 1,40	≤ 0,35	≤ 0,35	≤ 0,025	≤ 0,005	0,020 až 0,050	0,020 až 0,060	0,002 až 0,005

Na **Obr. 27** je znázorněna závislost celkového prodloužení na mezi pevnosti v tahu za tepla tvářených ocelí.

Již z huti je materiál 22MnB5 dodán s povrchovou vrstvou. Nejčastěji se jedná o povrchovou vrstvu na bázi Al-Si, která chrání ocel v průběhu ohřevu před vysokoteplotní oxidací.



Obr. 26 Feriticko-perlitická struktura před vytvrzením v nástroji (vlevo) a martenzitická struktura po vytvrzení v nástroji (vpravo) oceli 22MnB5 s povrchovou vrstvou Al-Si [15]



1 – studený stav, 2 – ohřev nad teplotu  $A_{c3}$ , 3 – tepelně zpracováno.

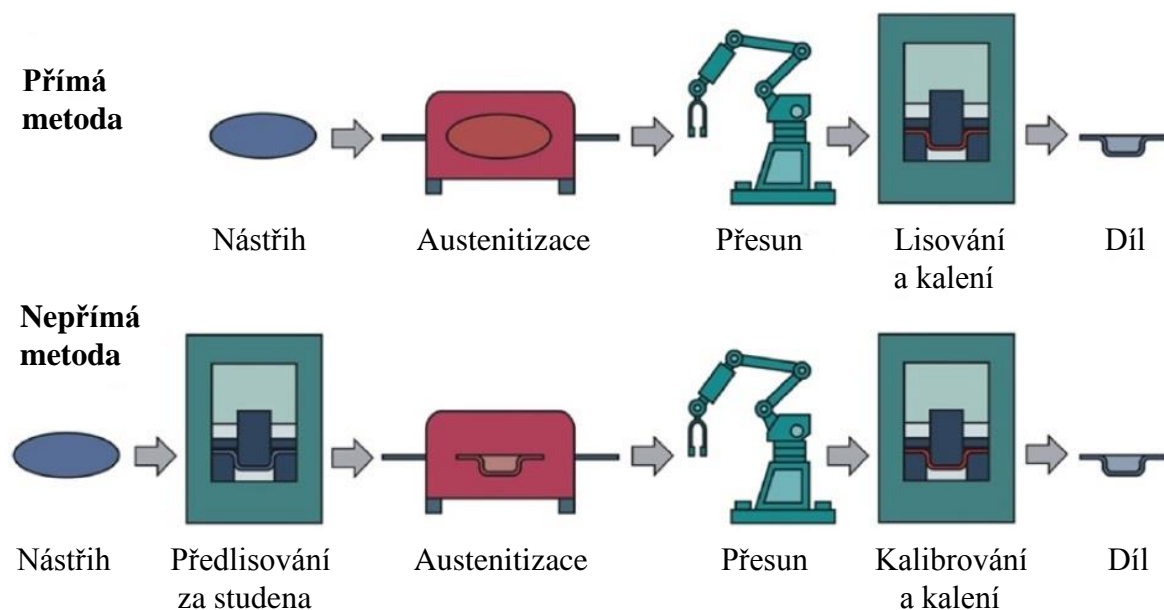
Obr. 27 Závislost celkového prodloužení na mezi pevnosti v tahu za tepla tvářených ocelí v průběhu tváření [22]

Tab. 16 Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 před a po tváření za tepla [24]

Mechanické vlastnosti v dodaném stavu		
$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]
320 – 550	500 – 700	$\geq 10$
Mechanické vlastnosti po tepelném zpracování		
$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80}$ [%]
1100	1500	6

### 3.5.2 Výroba za tepla tvářených dílů z oceli 22MnB5

V dnešní době jsou běžné dva možné způsoby výroby. První variantou je přímá metoda lisování, která je nejpoužívanější. Její princip je patrný z **Obr. 28**. Tato metoda je vhodná zejména pro zpracování mangan-bórové oceli s povrchovou vrstvou Al-Si. Druhou variantou je nepřímá metoda lisování. Tato metoda se oproti předešlé metodě liší jen v předlisování plechu za studena. Tento způsob umožňuje zpracování žárově pozinkovaných plechů, ale je mnohem složitější a nákladnější než přímé lisování. [28]



**Obr. 28** Základní způsoby procesu tváření za tepla [30]

Na následujícím obrázku (**Obr. 29**) je znázorněna reálná výroba dílu přímou metodou lisování.



**Obr. 29** Výroba za tepla tvářených dílů přímou metodou lisování ve ŠKODA AUTO [15]

Rozhodujícími parametry při procesu tvářením za tepla jsou teplota a čas. Výroba finálního dílu (výlisku) je rozdělena do několika po sobě jdoucích kroků (**Obr. 29**). V prvním kroku se feriticko-perlitická struktura dílu přemění na strukturu austenitickou (austenitizace). Toho se dosáhne ohřevem dílu např. v indukční peci nad teplotu  $A_{c3}$  (850 – 950 °C) po dobu cca 4 – 8 minut. [30]

Ve druhém kroku se vyjme polotovár z pece (nástřih plechu u přímé metody lisování, resp. předlisovaný plech u nepřímé metody) a putuje do lisovacího nástroje. Přesun plechu probíhá na volném vzduchu a jeho trvání se pohybuje řádově v jednotkách sekund. V době transportu tedy dochází k ochlazení dílu, kdy míra ochlazení je závislá na tloušťce plechu. Proto se musí tato teplotní ztráta kompenzovat (ohřev dílu v prvním kroku cca o 100 °C nad teplotu  $A_{c3}$ ) pro zajištění austenitizační teploty plechu při zahájení lisování.

V posledním kroku dochází ke zhotovení finálního tvaru dílu (lisování) s následným zakalením v chlazeném nástroji. Velkou roli hrají uzavírací časy tvářecího lisu, které musí být co nejmenší, pro zachování plastické tvarovatelnosti materiálu. Po uzavření nástroje je požadovaná co nejvyšší tepelná výměna (s ochlazovací rychlostí minimálně 27 °C·s<sup>-1</sup>) mezi



lisovacím nástrojem a dílem, pro získání požadované martenzitické struktury. U oceli 22MnB5 začíná martenzitická transformace při 425 °C ( $M_s$ ) a končí při 280 °C ( $M_f$ ). [30]

### 3.5.3 Odporová svařitelnost oceli 22MnB5

Svařitelnost této oceli (bez povrchové vrstvy Al-Si) je srovnatelná s jinými uhlíkovými oceli podobného složení. Odporové bodové svařování se pro spojování této oceli používá nejvíce, protože nabízí několik výhod. Mezi ně patří např. dobrá automatizace, malá deformace součásti v oblasti svaru, eliminace přídavného materiálu. Ve srovnání s ocelí s nižší pevností je potřeba při bodovém svařování použít vyšší přitlačnou sílu elektrod a delší svařovací časy, případně použít vícepulzní svařování. Bodové svary jsou relativně tvárné. Při svařování dvou plechů (oba jsou vyrobeny z oceli 22MnB5) je pevnost svaru většinou na stejné úrovni jako je pevnost základního materiálu. Při svařování dvou plechů odlišných materiálů (22MnB5 + ocel s nižší pevností) je pevnost svaru ovlivněna méně pevným materiálem. [24, 28]

Velký vliv na svařitelnost má právě povrchová vrstva Al-Si. Na životnost elektrod má tato vrstva dobrý vliv, protože má určité specifické složení (promísení se základním materiálem), které mnohonásobně zvyšuje životnost svařovacích elektrod (několik tisíc bodů bez poškození) ve srovnání s konvenčními povrchovými úpravami. [24]

Na svařovací proces má vrstva Al-Si horší vliv. Rozdílné přechodové odpory povrchové vrstvy a základního materiálu způsobují nestabilitu svařovacího procesu. Tzn., že i při svařování stejnými parametry můžeme dostat svary rozdílných vlastností. To je způsobené právě složením povrchové vrstvy, které může být na různých místech svařovaného plechu rozdílné (např. velikost a množství obsažených heterogenit s různým chemickým složením). [31]

Více o povlaku Al-Si je uvedeno v kapitole 4.

V **Tab. 17** jsou uvedeny typické vlastnosti bodového svaru z oceli 22MnB5 s povrchovou vrstvou Al-Si a na **Obr. 30** je znázorněn detail řezu bodového svaru z této oceli.

**Tab. 17** Typické vlastnosti bodového svaru oceli 22MnB5 s povrchovou vrstvou Al-Si [28]

Tloušťka plechu [mm]	Síla z křížové zkoušky pro $d_{\min}^1$ [kN]	Střihová síla pro $d_{\min}^1$ [kN]	Průměrná tvrdost HV 0,1	
			Základní materiál	Svarová čochka
1,5	4,4	16,8	485	525

<sup>1</sup> Minimální průměr svaru ( $3,5\sqrt{t}$ )

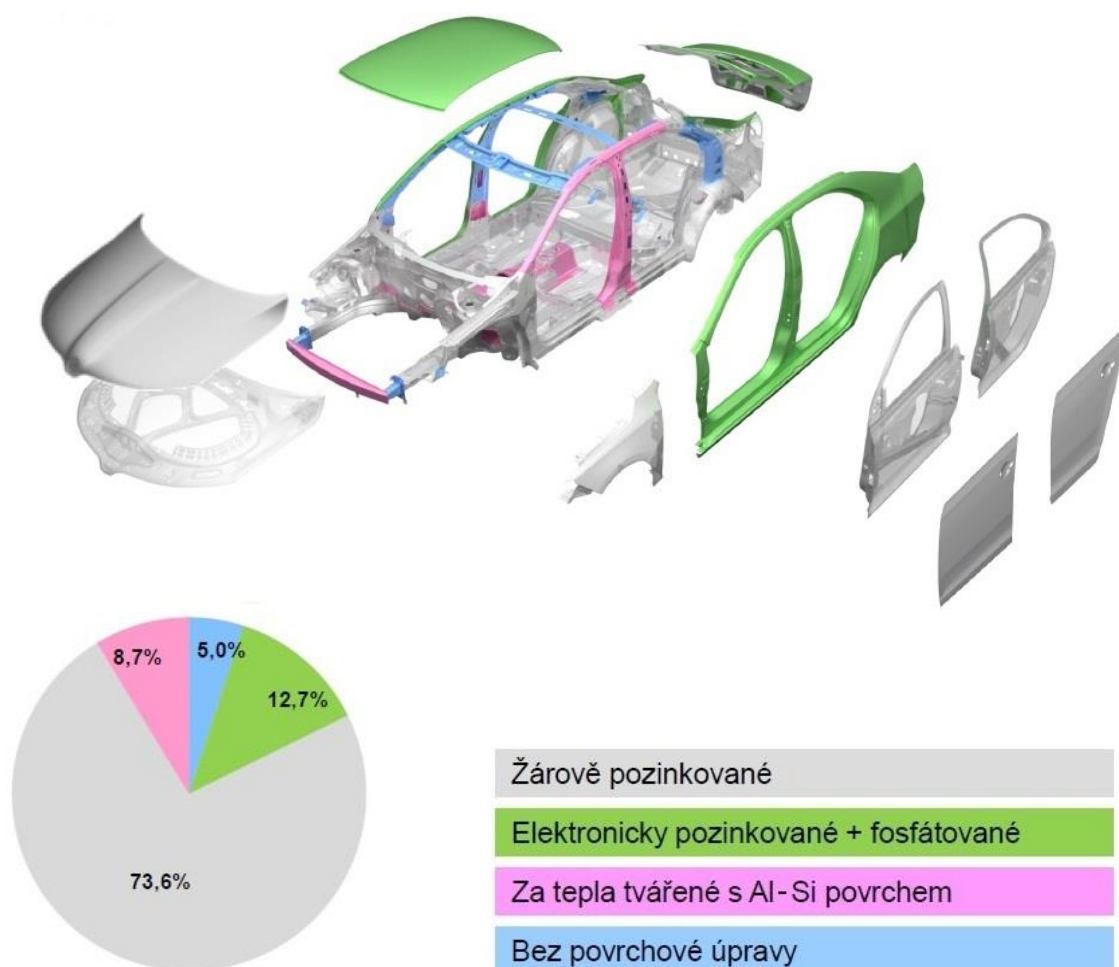


**Obr. 30** Detail řezu bodového spoje (22MnB + 22MnB5, tloušťka plechů: 1,2 mm)

## 4 Ochranné povlaky plechů používaných na výrobu karoserie

Plechů používaných na výrobu automobilové karoserie mohou být úplně bez povrchové úpravy (jen cca 5 % plechů z celé karoserie), ale většinou jsou opatřeny povrchovou úpravou zabraňující korozi, čímž se zvýší životnost karoserie. V dnešní době jsou kladeny velké nároky na kvalitu (morfologii) povrchu dílů, čemuž také přispívá vhodně zvolená povrchová úprava. Zlepšená morfologie povrchu dále přispívá k lepšímu ulpění maziva, které ještě více chrání materiál před korozi a je potřebné pro tvářecí operace. Samozřejmostí je určitá tvárnost povlaku, aby nedošlo k jeho porušení při tváření.

V automobilovém průmyslu se nejčastěji používají povrchové úpravy na bázi zinku (**Obr. 31**) a pro díly tvářené za tepla se používá povrchová vrstva na bázi Al-Si. Dále existuje mnoho speciálních povlaků (např. tenké organické povlaky). Každá povrchová úprava má své přednosti a používá se na ty díly karoserie, kde jsou její výhody potřebné.



**Obr. 31** Povrchové úpravy dílů karoserie modelu Škoda Octavia III [15]

## 4.1 Povlaky za studena tvářených plechů na bázi zinku

Povlaky na bázi zinku patří mezi nejpoužívanější povrchové úpravy za studena tvářených plechů, které jsou součástí automobilových karoserií. Rozlišujeme dvě metody nanášení povlaku zinku:

- elektrolyticky (EG – Electro Galvanized)
- žárově (HDG – Hot Dip Galvanized)

### 4.1.1 Elektrolytické zinkování

Povlaky jsou vytvářeny metodou elektrolytického (galvanického) nanášení povlaku na bázi zinku nebo jeho slitin např. s hliníkem nebo železem. Konkrétní provedení elektrolyticky pozinkovaných produktů velmi závisí na morfologii povrchu základního materiálu a na parametrech elektrolytického procesu. Způsob elektrolytického pozinkování zajišťuje vysokou chemickou čistotu povlakové vrstvy a rovnoměrnou kontrolovatelnou tloušťku povlaku (odchylka  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ ). Při elektrolytickém pozinkování se tedy dosahuje velmi čisté a tudíž tvárné (houževnaté) Zn vrstvy, která odolává i značným přetvořením. Proto se používá pro povlakování hlubokotažných ocelí. Na základě elektrochemických zákonitostí dvojice železo-zinek (efekt obětované anody) nabízí povlak výbornou korozní ochranu, i když je poškozen (např. poškrábáním). [32]

Výhodou této metody povlakování zinkem je možnost nanášení povlaku jen z jedné strany dílu. U jednostranně povlakovaných dílů tedy můžeme nanést lak karoserie jen na vnější viditelnou stranu plechu, zatímco pozinkovaná vnitřní strana plechu nabízí vynikající protikorozní ochranu především v dutinách dílu. [32]

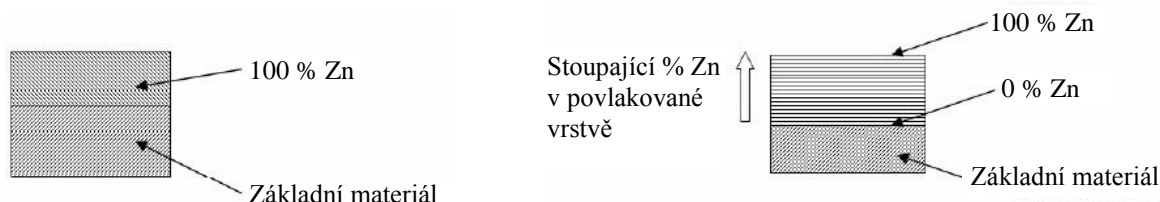
Na základě nepříznivých tribologických vlastností (v porovnání s povlaky žárově nanášenými) je vhodná jistá chemická úprava tohoto povlaku a to zejména u obzvláště náročných výlisků. Z tohoto důvodu se elektrolyticky zinkované díly ještě fosfátují. [32]

Výhody elektrolytického zinkování, oproti žárovému zinkování, lze shrnout do tří základních bodů: [32]

- proces neovlivňuje původní mechanické vlastnosti materiálu, zejména jeho hlubokotažnost,
- proces umožňuje přípravu velmi tenkých zinkových povlaků,

- proces umožňuje výrobu diferencovaných a jednostranných zinkových povlaků.

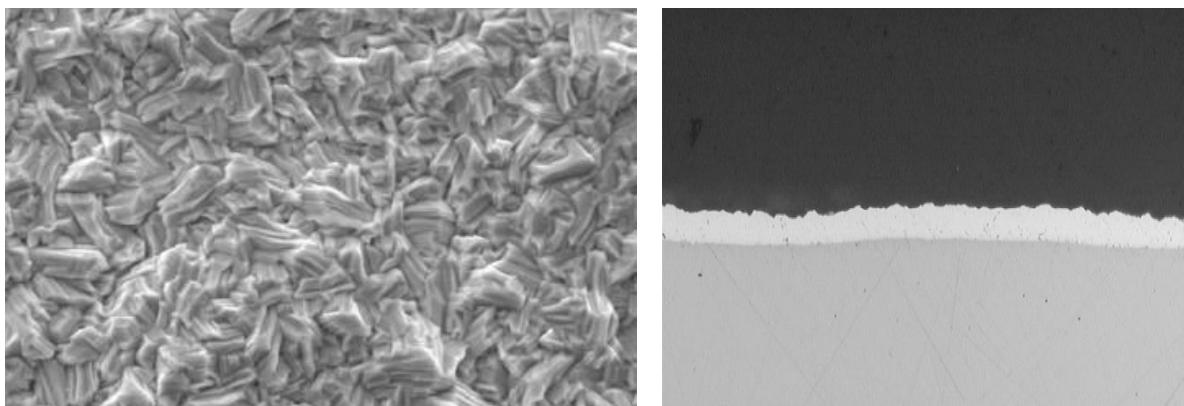
Na **Obr. 32** je znázorněn rozdíl v rozložení zinku pro jednotlivé technologie výroby zinkového povlaku.



#### Elektrolytické zinkování

#### Žárové zinkování

*Obr. 32* Porovnání rozložení zinku při elektrolytickém a žárovém pokovení [32]



*Obr. 33* Morfologie (vlevo) a řez vrstvou (vpravo) elektrolytického povlaku zinku [24]

#### 4.1.2 Žárové zinkování

Zinkový povlak se u této metody vytváří ponořením dílu do taveniny zinku nebo jeho slitin s hliníkem, železem, hořčíkem. Před samotným zinkováním se povrch povlakované součásti musí předupravit (odmaštění, zbavení okují, moření), aby se dosáhlo kovově čistého povrchu. [32]

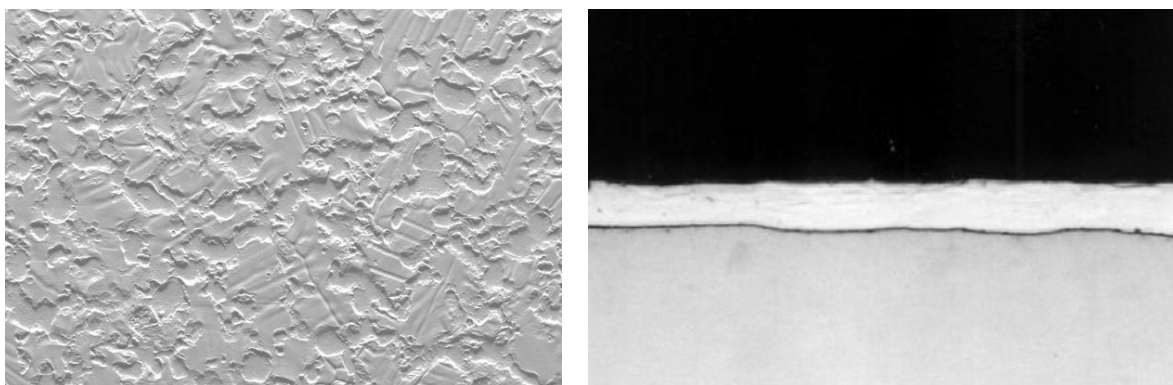
Použití žárově pozinkovaných materiálů při výrobě karoserie souvisí s jejich odolností proti korozi a dobrou tvárností. Povlak má velmi dobrou korozní ochranu, i když je mírně poškozen. Takto povlakované plechy jsou vhodné pro hluboké tažení. [32]

Povlak vyrobený touto technologií je velice homogenní a hladký bez nerovností. Tzn., že mazivo potřebné pro lisování dílu nemůže na tak hladkém povrchu ulpět. Proto se po nanesení povlaku používá jemné tryskání nebo drezírovací válce, které poruší hladkost povrchu pro ulpění maziva. [32]

V **Tab. 18** jsou pro ukázkou uvedeny tloušťky žárově naneseného povlaku zinku s označením Z140.

*Tab. 18 Hmotnosti a tloušťky povlaku žárového zinku Z140 [29]*

Hmotnost povlaku (obě strany) [g·m <sup>-2</sup> ]	Hmotnost povlaku (jedna strana) [g·m <sup>-2</sup> ]		Doporučené hodnoty tlouštěk povlaku (jedna strana) [μm]		Hustota povlaku [g·cm <sup>-3</sup> ]
	Minimum	Maximum	Typická hodnota	Rozsah hodnot	
140	65	90	10	8,5 až 13	7,1



*Obr. 34 Morfologie (vlevo) a řez vrstvou (vpravo) žárového povlaku zinku [24]*

## 4.2 Povlak za tepla tvářených plechů na bázi siluminu (Al-Si)

Tento povlak se používá v automobilovém průmyslu na materiály termomechanicky zpracované (tvářené za tepla) jako je např. materiál 22MnB5. Povlak Al-Si chrání termomechanicky zpracovávaný plech před vysokoteplotní oxidací (tvorba okují), která doprovází tvářecí proces probíhající za vysokých teplot (850 – 950 °C). Proto se vylisované díly již nemusí zbavovat okují (eliminace tryskání a moření), což je výrazná časová a finanční úspora. Dále je tento povlak odolný i proti nízkoteplotní oxidaci (korozi).

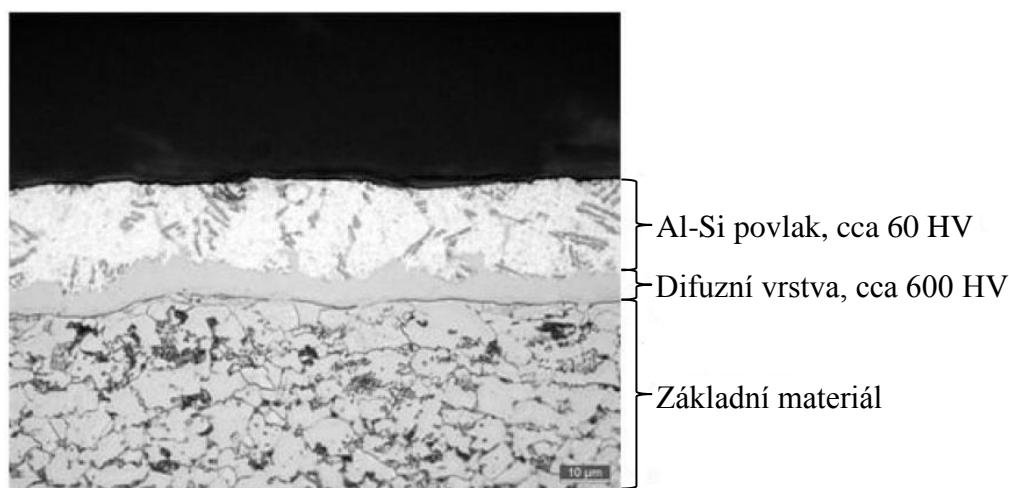
### 4.2.1 Vlastnosti povlaku Al-Si před tvářením za tepla (nevytvrzený stav)

Existuje několik typů tohoto povlaku z hlediska hmotnosti povlaku na m<sup>2</sup>. Zde je uveden jeden ze zástupců s označením AS150, jehož minimální hmotnost, která je vztažená na obě strany plechu, je 150 g·m<sup>-2</sup>. Specifikace povlaku AS150 jsou uvedeny v následující tabulce

(**Tab. 19**). Tyto hodnoty se mohou v praxi lišit v závislosti na různém stupni válcování materiálu s tímto povlakem. [29]

*Tab. 19 Hmotnosti a tloušťky povlaku ASI50 [29]*

Hmotnost povlaku (obě strany) [g·m <sup>-2</sup> ]	Hmotnost povlaku (jedna strana) [g·m <sup>-2</sup> ]		Doporučené hodnoty tloušťek povlaku (jedna strana) [μm]		Hustota povlaku [g·cm <sup>-3</sup> ]
	Minimum	Maximum	Typická hodnota	Rozsah hodnot	
150	60	100	25	19 až 33	cca 3



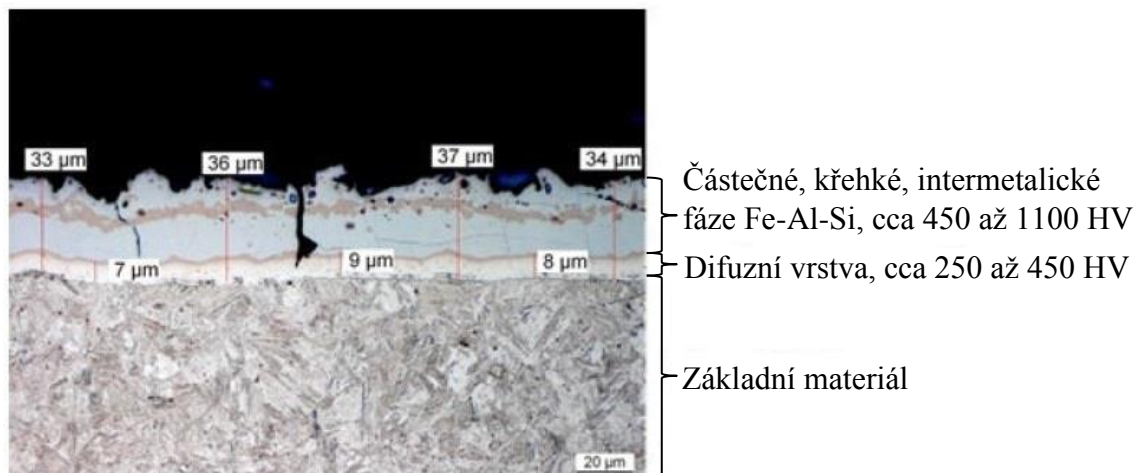
*Obr. 35 Povlak ASI50 v nevytvrzeném stavu [29]*

#### 4.2.2 Vlastnosti povlaku Al-Si po tváření za tepla (vytvrzený stav)

Po tváření plechu s tímto povlakem za tepla se nezmění jen struktura základního materiálu plechu (z feriticko-perlitické na martenzitickou), ale i struktura a vlastnosti daného povlaku. Při vysokých teplotách během tvářecího procesu dochází k difuzi prvků (hlavně Fe) ze základního materiálu do povlaku. Díky této difuzi se v povlaku začnou tvořit intermetalické fáze (Fe-Al-Si), které mají velký vliv na tvrdost a strukturu povrchové vrstvy (**Obr. 36**). Vysoká tvrdost vytvrzeného povlaku musí být brána v úvahu při navrhování tvářecích nástrojů, vzhledem k jejich opotřebení. [29, 31]

**Tab. 20** Hodnoty tloušťek celkové a difuzní vrstvy povlaku ASI50 ve vytvrzeném stavu [29]

Celková tloušťka povlaku (jedna strana) [ $\mu\text{m}$ ]		Tloušťka difuzní vrstvy (jedna strana) [ $\mu\text{m}$ ]
Typická hodnota	Rozsah hodnot	Rozsah hodnot
35	30 až 50	$\leq 16$



**Obr. 36** Povlak ASI50 ve vytvrzeném stavu s měřenými tloušťkami vrstev [29]

#### 4.2.3 Vliv povlaku Al-Si na svařitelnost

Díky intermetalickým fázím různého složení v oblasti povrchové vrstvy dochází k ovlivnění svařovacího procesu, což může snížit pevnost finálního svarového spoje.

Při použití odporové bodové metody svařování plechů s povlakem Al-Si, musí být bezpodmínečně dodrženy přípustné tloušťky vrstev povlaku (**Tab. 20**), protože překročení povolené tloušťky, zejména difuzní vrstvy, vede ke zvýšení elektrického odporu povlaku. Zvýšený elektrický odpor zvyšuje i teplotu, tím pádem dojde k velkému natavení svarové oblasti a může docházet k rozstříku svarového kovu, což má za následek zmenšení průměru bodového svaru, který je menší než průměr požadovaný a to vede ke snížení pevnosti svaru. [29]



## 5 Praktický experiment

Experimentální část práce je zaměřena na porovnání vlastností svarových spojů u stejného materiálu (22MnB5 s povlakem Al-Si) s různým tepelným zpracováním. Změna parametrů tepelného zpracování byla v tak malém rozsahu, že neovlivnila vlastnosti základního materiálu, ale má velký vliv na povrchovou vrstvu (Al-Si), která destabilizuje svařovací proces. Zejména má vliv na tloušťku difuzní vrstvy vznikající na rozhraní mezi ocelí a povlakem (s rostoucí teplotou a dobou výdrže na teplotě při tepelném zpracování, roste i tloušťka difuzní vrstvy). Právě vliv tloušťky difuzní vrstvy na vlastnosti (pevnost) svarových spojů a na parametry svařování je předmětem zkoumání v rámci této diplomové práce. V experimentu je dále řešeno, jak se liší vlastnosti svarových spojů při svařování v měkkém a tvrdém režimu a také je zde porovnáno jednopulzní a vícepulzní svařování v rámci tvrdého režimu. Diplomová práce je řešena ve spolupráci se společností ŠKODA AUTO.

### 5.1 Cíle diplomové práce

Cíle práce lze shrnout do několika následujících bodů:

- Chemická analýza povrchové vrstvy Al-Si před svařováním
- Zhodnocení vlivu tloušťky difuzní vrstvy na svařitelnost (materiál 22MnB5)
- Porovnání měkkého a tvrdého režimu svařování
- Porovnání jednopulzního a vícepulzního svařování v tvrdém režimu
- Hodnocení kvality, celistvosti a mechanických vlastností svarových spojů s využitím následujících metod:
  - Zkouška ultrazvukem
  - Metalografické hodnocení
  - Statická zkouška stříhem (dle ČSN EN ISO 14273)
  - Dynamická zkouška stříhem (nenormalizovaná zkouška stříhem za vysokých rychlostí)

### 5.2 Rozbor svařovaného materiálu

Zkoumané plechy s variantním tepelným zpracováním byly poskytnuty firmou ŠKODA AUTO (vyrobeny firmou ArcelorMittal). Celkem bylo dodáno 6 typů plechů (400 x 450 mm; od každého plechu více kusů) o tloušťce 1,2 mm ze stejného materiálu 22MnB5 s povlakem

Al-Si, s různým tepelným zpracováním. Dodané plechy byly rovné (jen válcované), nebyly to vylisované reálné díly karoserie jako např. B-sloupek.

Variantní tepelné zpracování mělo za úkol simulovat proces tváření za tepla, bez konečného vylisování konkrétního tvaru (výsledkem je rovný plech), při různých teplotách ohřevu (austenitizace) a různých dobách ohřevu. Následně byly plechy zakaleny, což simulovalo zakalení výlisku v chlazeném tvářecím nástroji. Tím byly získány tepelně zpracované plechy s martenzitickou strukturou, které byly v rámci diplomové práce následně svařovány.

Analyzovaný materiál je vysokopevnostní ocel 22MnB5 (její vlastnosti jsou uvedeny v podkapitole 3.5) s povrchovou vrstvou na bázi Al-Si (její vlastnosti jsou uvedeny v podkapitole 4.2). Variantní tepelné režimy (teplota ohřevu / doba ohřevu) plechů jsou následující:

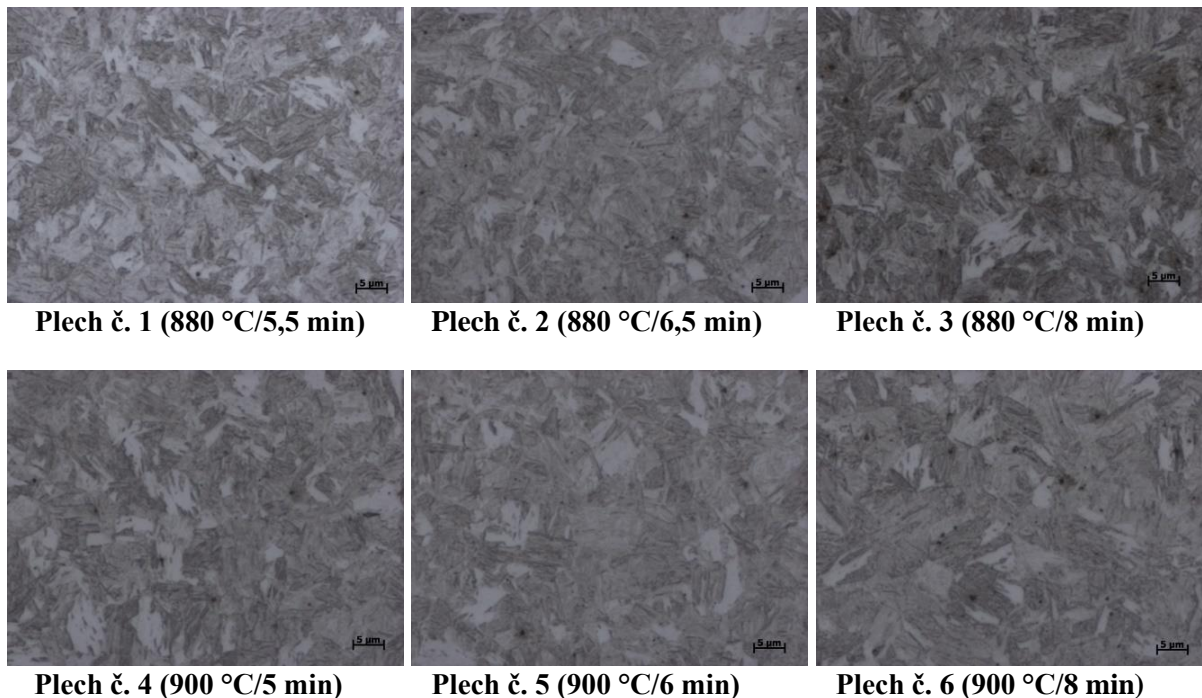
- Plech č. 1 ... 880 °C / 5,5 min
- Plech č. 2 ... 880 °C / 6,5 min
- Plech č. 3 ... 880 °C / 8 min
- Plech č. 4 ... 900 °C / 5 min
- Plech č. 5 ... 900 °C / 6 min
- Plech č. 6 ... 900 °C / 8 min

### 5.2.1 Mikrotvrdość a metalografie základního materiálu 22MnB5

Z výše uvedeného je patrné, že tepelné režimy jednotlivých tepelných zpracování byly měněny ve velmi malém rozsahu a na strukturu základního materiálu neměly v podstatě vliv. Tzn., že i martenzitická mikrostruktura jednotlivých plechů byla stejná (**Obr. 37**). S tím souvisí i mikrotvrdość základního materiálu, jejíž výsledky jsou uvedeny v **Tab. 21**. Z toho vyplývá, že variantní tepelné zpracování při tak malém rozsahu tepelných režimů, nemá vliv na změnu vlastností základního materiálu.

Měření mikrotvrdości (dle Vickerse) zalisovaných výbrusů jednotlivých plechů bylo provedeno v laboratořích ÚST, FS ČVUT v Praze na tvrdoměru IndentaMet od firmy BUEHLER. Vnikacím tělesem byl diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Na přístroji se nastavilo zatížení 0,5 kg (HV0,5), které na zkoušený plech působilo po dobu 10 s při okolní teplotě 20 °C. Na každém plechu bylo provedeno 5 vtisků.

Fotografie mikrostruktur základních materiálů byly pořízeny také v laboratořích ÚST, FS ČVUT v Praze na optickém metalografickém mikroskopu Axio Observer D1m od firmy Zeiss.



*Obr. 37 Martenzitická mikrostruktura jednotlivých plechů (zvětšení 1000x)*

*Tab. 21 Naměřené hodnoty mikrotvrdostí plechů*

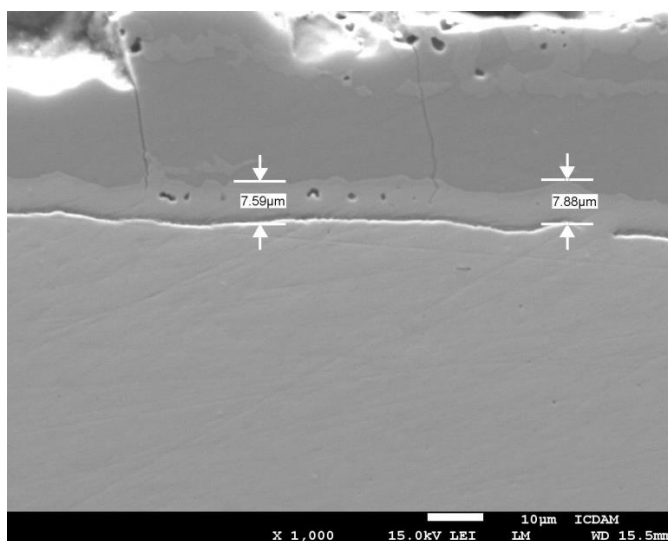
Plech č.	Č. vtisku	HV0,5	Ø HV0,5	Plech č.	Č. vtisku	HV0,5	Ø HV0,5
<b>1</b>	1	492	<b>476</b>	<b>4</b>	1	493	<b>499</b>
	2	496			2	506	
	3	500			3	500	
	4	444			4	507	
	5	449			5	489	
<b>2</b>	1	427	<b>473</b>	<b>5</b>	1	439	<b>465</b>
	2	475			2	477	
	3	481			3	504	
	4	490			4	495	
	5	491			5	412	
<b>3</b>	1	503	<b>471</b>	<b>6</b>	1	465	<b>489</b>
	2	502			2	504	
	3	482			3	470	
	4	415			4	500	
	5	454			5	506	

## 5.2.2 Chemická analýza povrchové vrstvy Al-Si

### Tloušťka difuzní vrstvy

Na rozdíl od základního materiálu mělo variantní tepelné zpracování na povlak Al-Si podstatně větší vliv. Ukázalo se, že difuzní vrstva mezi povlakem a základním materiálem je na teplotu i dobu výdrže na teplotě velmi citlivá. I malý rozsah tepelných režimů výrazně ovlivnil zejména tloušťku difuzní vrstvy (**Obr. 38**). Tloušťka difuzní vrstvy se s rostoucí teplotou a dobou výdrže na teplotě výrazně zvětšuje. A právě zhodnocení vlivu tloušťky difuzní vrstvy (tzn. vliv teploty ohřevu a doby ohřevu) na svažitelnost materiálu 22MnB5 je hlavním cílem této práce. Proto bylo pro porovnání zvoleno 6 plechů s různým tepelným zpracováním, resp. s různou tloušťkou difuzní vrstvy.

Se změnou tloušťky difuzní vrstvy souvisí i rozložení dalších subvrstev povlaku. V případě menší tloušťky difuzní vrstvy (cca 4,5  $\mu\text{m}$ ) se heterogenity vyskytují v povlaku jako izolované útvary. V případě větší tloušťky difuzní vrstvy (cca 9  $\mu\text{m}$ ) se spojují a vytváří kompaktní subvrstvu.

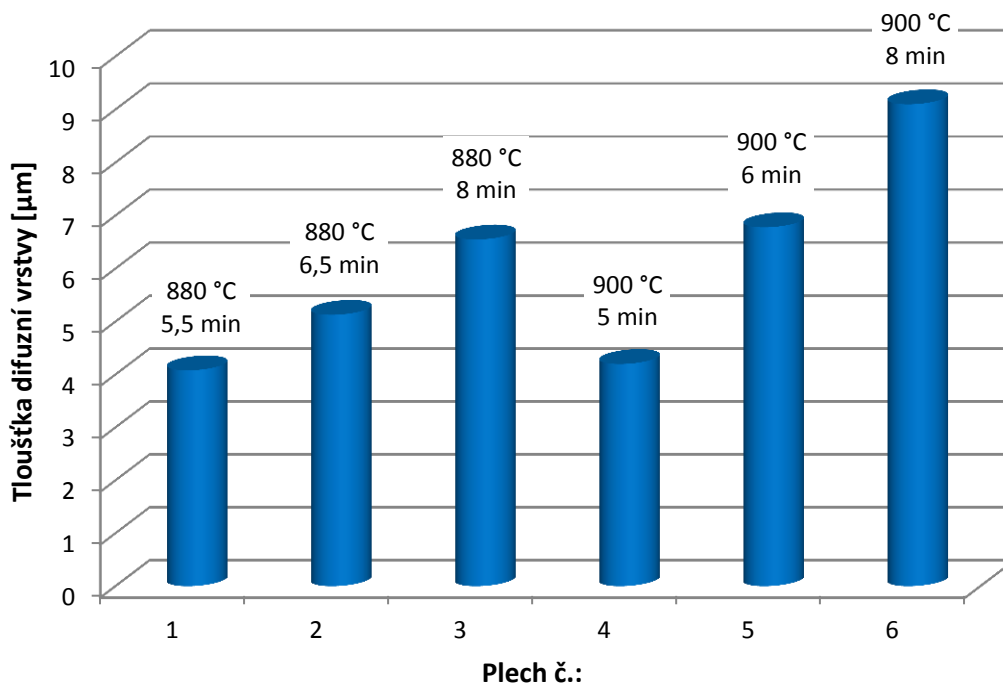


**Obr. 38** Měření difuzní vrstvy povlaku Al-Si

Tloušťka difuzní vrstvy byla měřena na příčných výbrusech. Tloušťky difuzní vrstvy jsou uvedeny v následující tabulce (**Tab. 22**) a pro lepší porovnání tlouštěk této vrstvy je k dispozici **Graf. 1**.

*Tab. 22 Tloušťka difuzní vrstvy plechů s variantním tepelným zpracováním*

Plech č.	1	2	3	4	5	6
Tloušťka [ $\mu\text{m}$ ]	4,08	5,13	6,55	4,20	6,78	9,10



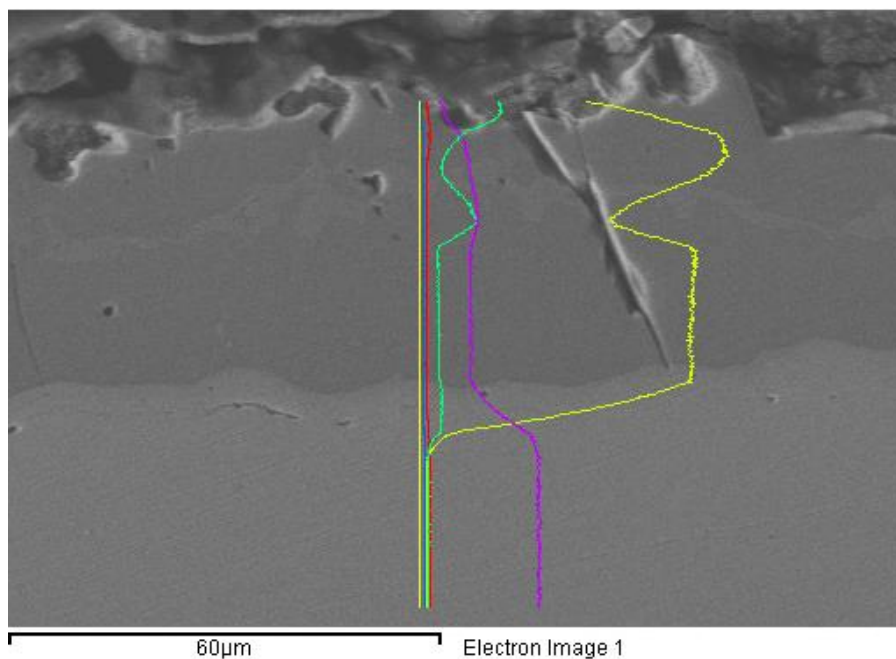
*Graf. 1 Tloušťka difuzní vrstvy v závislosti na tepelném zpracování*

Výsledky měření tloušťky difuzní vrstvy jednotlivých plechů potvrdily předpoklad, že s prodlužujícím se časem a zvyšující se teplotou tepelného zpracování, se zvětšuje i tloušťka difuzní vrstvy. Ani v jednom případě ale tloušťka nepřekročila hranici 16  $\mu\text{m}$ , která je považována dle standardu TL 4225 (interní směrnice ve ŠKODA AUTO) za kritickou.

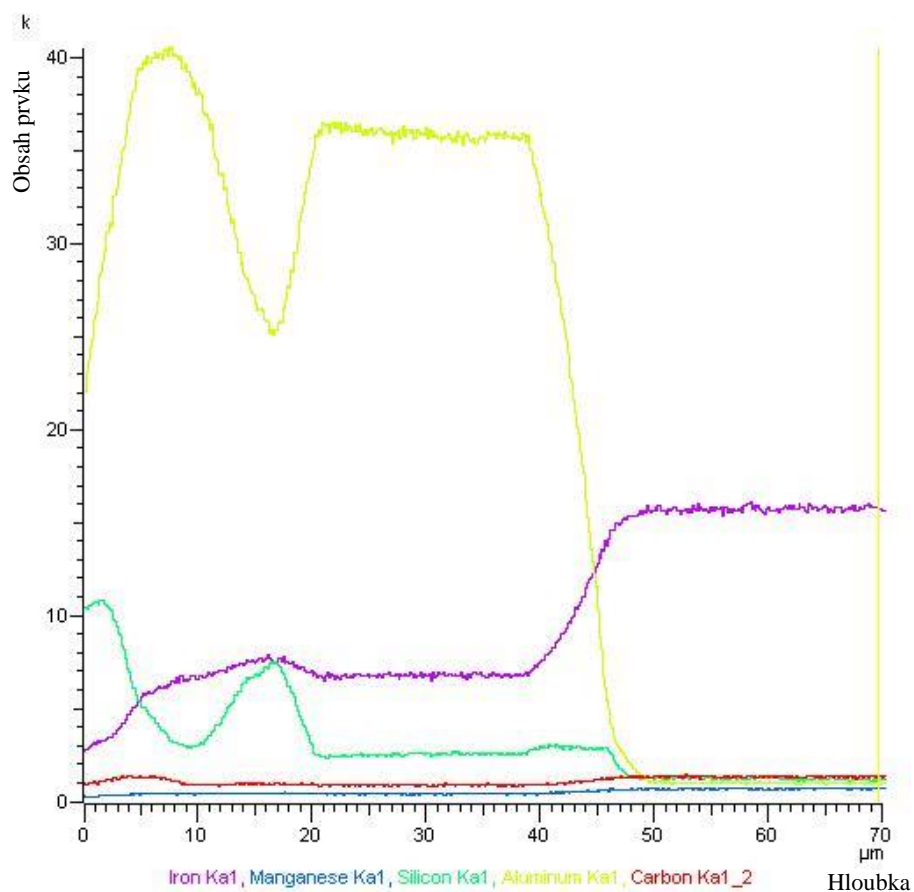
### Liniová EDS analýza

Průběh chemického složení povlaku od jeho povrchu až do základního materiálu byl zjištěn EDS liniovou analýzou, která byla provedena na příčných výbrusech (**Obr. 39**).

Na **Obr. 39** a **Obr. 40** je dobře vidět nižší obsah hliníku (žlutá křivka) na povrchu povlaku a v oblasti heterogenit. Tento pokles kopíruje lokální navýšení obsahu křemíku (zelená křivka), na povrchu povlaku a 15  $\mu\text{m}$  pod povrchem (zmiňovaná oblast heterogenit).



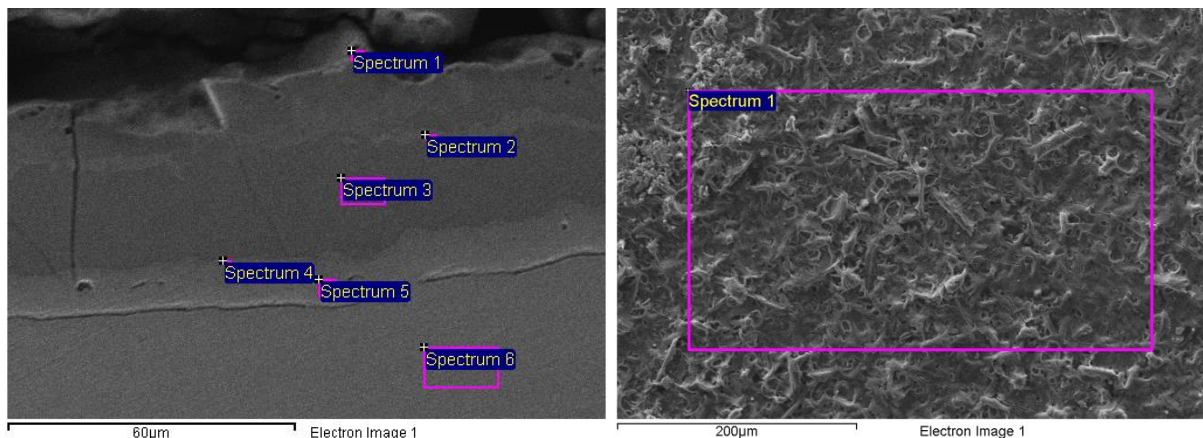
**Obr. 39** Liniová analýza v příčném výbrusu (plech č. 1)



**Obr. 40** Změny obsahů vybraných prvků v povlaku Al-Si (viz. Obr. 43)

### Bodová EDS analýza vybraných oblastí

Chemické složení v oblastech 2 až 6 (**Obr. 41 vlevo**) bylo měřeno na příčných výbrusech plechů, oblast 1 byla měřena jak v příčném výbrusu, tak i kolmo k povrchu plechu (**Obr. 41 vpravo**). Sledován byl zejména obsah hliníku, křemíku a železa. K vyhodnocení změn chemického složení u jednotlivých vzorků byl použit poměr prvků Al/Si.



**Obr. 41** Bodová EDS analýza subvrstev povlaku v příčném výbrusu a z povrchu povlaku (vpravo)  
(plech č. 3)

### Měřené oblasti:

1. Povrch plechu (povlaku)
2. Subvrstva 1 (heterogenity)
3. Subvrstva 2
4. Přejít mezi difuzní vrstvou a povlakem
5. Difuzní vrstva
6. Základní materiál

**Tab. 23** Poměry Al/Si v jednotlivých oblastech povlaku daných plechů

Poměr Al/Si		Oblast					
		1	2	3	4	5	6
Plech č.	1	9,73	6,23	16,02	14,29	13,91	0,15
	2	9,41	11,42	15,36	14,21	12,06	0,23
	3	13,55	18,47	18,16	19,77	3,92	0,28
	4	9,04	2,49	16,02	15,73	15,02	0,30
	5	11,86	2,66	11,94	14,38	2,21	0,26
	6	10,05	3,15	20,92	19,88	2,24	0,27

V **Tab. 23** jsou uvedeny poměry Al/Si v jednotlivých oblastech povlaku plechů s variantním tepelným zpracováním. U většiny vzorků odpovídají naměřené hodnoty výsledkům z liniové analýzy, poměry Al/Si jsou v oblasti heterogenit (2) nižší než uvnitř povlaku (3). Obsah hliníku zůstává vysoký i v přechodové vrstvičce (4) mezi difuzní vrstvou (5) a zbytkem povlaku. V samotné difuzní vrstvě obsah hliníku prudce klesá (pro delší časy a vyšší teploty tepelného zpracování) a obsah železa naopak roste, což je patrné i z liniové analýzy.

Chemická analýza popsaná v této kapitole byla provedena v laboratořích ÚMI, FS ČVUT v Praze na elektronovém mikroskopu JSM-7600F od firmy JEOL.

### 5.3 Příprava a svaření vzorků pro jednotlivé zkoušky

#### Nastříhání vzorků

Dle vhodně zvoleného nástřihového plánu byly nejdříve z dodaných plechů nastříhány (elektrickými padacími nůžkami na plech v laboratořích ÚST, FS ČVUT v Praze) požadované vzorky daných rozměrů pro jednotlivé zkoušky.

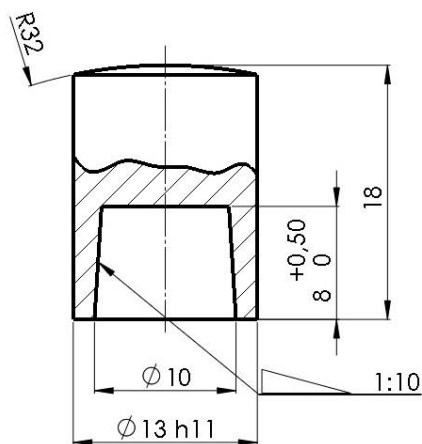
#### Svaření nastříhaných vzorků (použitá zařízení)

Svařováno bylo ve dvou svařovacích režimech (měkký a tvrdý). Tzn., že byly použity dva svařovací stroje.

Z nastříhaných vzorků byly k sobě přivařeny vždy jen vzorky z jednoho typu plechu. Tzn., že např. k vystřiženému vzorku z plechu č. 1 byl bodově přivařen opět vzorek z plechu č. 1. Výsledný svarový spoj (z plechu č. 1) byl následně zkoumán.

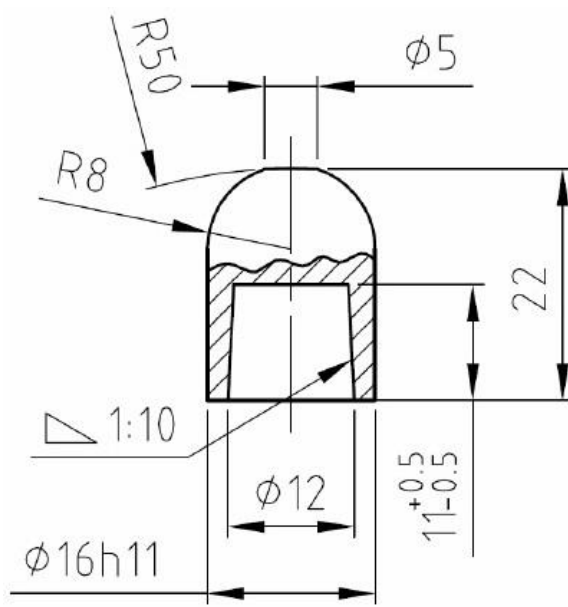
Svařování vzorků v měkkém režimu bylo provedeno ve spolupráci s firmou RUBI CZECH v Brandýse nad Labem na svařovacím lisu s adaptivním řízením MIDIsport Vision QSVM 9000/12000T od firmy ELMATECH (**Obr. 42 vlevo**) a byly použity elektrodové čepičky s označením A0-13-18 (**Obr. 42 vpravo**) dle ČSN EN ISO 5821.





**Obr. 42** Svařovací odporový lis MIDIspot (vlevo) a geometrie elektrodové čepičky (vpravo)

Spoje svařené v tvrdém režimu byly zhotoveny v laboratořích ÚST, FS ČVUT v Praze na svařovacím lisu PMS 11-4 od firmy DALEX (**Obr. 43 vlevo**) a byly použity elektrodové čepičky s označením 39D 1978-1 (**Obr. 43 vpravo**).



**Obr. 43** Svařovací odporový lis PMS 11-4 (vlevo) a geometrie elektrodové čepičky (vpravo)

### 5.3.1 Svařovací parametry

#### Měkký režim svařování

Pro měkký režim bylo použito zařízení s adaptivním řízením. Tzn., že svařovací parametry byly zvoleny zcela automaticky, podle tloušťky a vlastností svařovaného materiálu, bez zásahu obsluhy. Základní parametry svařování byly velmi podobné u všech svarů, bez ohledu na různou tloušťku difuzní vrstvy a jejich hodnoty se pohybovaly v rozmezí uvedeném v **Tab. 24**.

**Tab. 24** Základní svařovací parametry pro měkký svařovací režim

Svařovací proud $I_s$ [kA]	Svařovací čas $t_s$ [ms]	Přítlačná síla $P_s$ [kN]
7,16 – 7,26	854 – 976	2,8 – 3,1
Pouze vzorek M12 měl svařovací proud jen 385 ms (viz. dále).		

### Tvrký režim svařování (1. sada – jeden pulz)

Pro tvrdý režim byla provedena optimalizace svařovacích parametrů (**Tab. 25** a **Tab. 26**) pro výběr té nejvhodnější kombinace parametrů. Optimalizace byla provedena na plechu č. 1 a zvolené parametry byly použity i na plechy ostatní. Všechny plechy byly tedy svařeny stejnými parametry, aby bylo možné porovnávat vlastnosti svarů při stejných podmínkách svařování. V rámci optimalizace bylo svařeno 20 svarů na pásu plechu č. 1, kdy vždy 2 po sobě jdoucí svary byly svařeny stejnými parametry. Sekáčovou zkouškou (dle ČSN EN ISO 10447) byla ověřena kvalita svarů a změřen průměr všech svarů. Důležitá nebyla jen velikost svaru, ale i vizuální vzhled povrchu svaru a vytržené části svaru (hloubka vtisku elektrod, velikost výronku apod.).

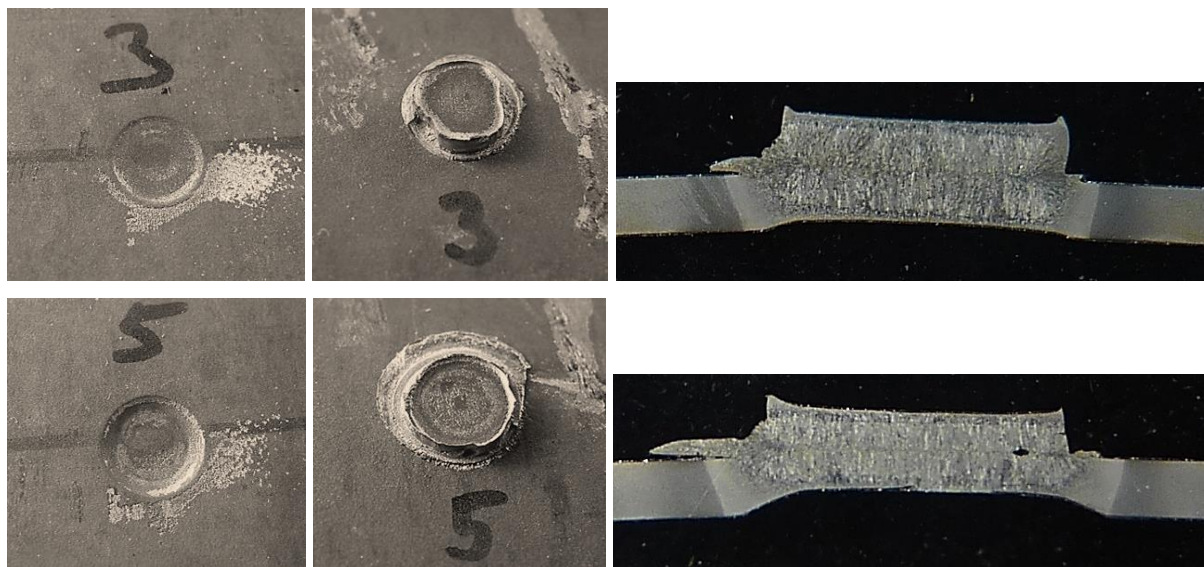
**Tab. 25** Svařovací parametry (konst.  $t_s$  a  $P_s$ ) + průměr svarů

	Označení svarů optimalizace									
	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
$t_s$ [ms]	280		280		280		280		280	
$I_s$ [kA]	6		6,5		7		7,5		8	
$P_s$ [kN]	2,5		2,5		2,5		2,5		2,5	
d [mm]	4,31	4,05	5,05	5,03	5,28	5,49	6,36	6,69	6,81	6,49

**Tab. 26** Svařovací parametry (konst.  $t_s$  a  $I_s$ ) + průměr svarů

	Označení svarů optimalizace									
	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b	10a	10b
$t_s$ [ms]	280		280		280		280		280	
$I_s$ [kA]	7		7		7		7		7	
$P_s$ [kN]	1,5		2		2,5		3		3,5	
d [mm]	5,26	5,76	5,02	5,30	5,54	5,45	5,68	5,16	5,46	4,55

Dle provedené optimalizace ve tvrdém jednopulzním režimu (s přihlédnutím k výsledkům z předchozích výzkumů) byly zvoleny optimální svařovací parametry (zelené stínování v **Tab. 25** a **Tab. 26**), které odpovídají svarům 3 (a, b) a 8 (a, b). Svary 3 a 8 sice nemají větší průměr (minimální průměr však splňují) než např. svar 5 (a, b), ale celkový vzhled svaru (vytržené části) a hloubka vtisku je přijatelná, na rozdíl od svaru 5. Porovnání svaru 3b a 5b je na **Obr. 44**.



*Obr. 44 Povrch, vytržená část a metalografický výbrus svaru 3b (nahore) a svaru 5b (dole) po sekáčové zkoušce*

Z Obr. 44 je patrné, že svar 5b je nepřijatelný (i přes velký průměr svaru) zejména z důvodu velké hloubky vtisku, který by dle normy neměl překročit 20 % tloušťky plechu. Dále je na obrázku vidět velký výronek a vnitřní vada (staženina) v dělicí rovině svarové čochky.

#### **Tvrký režim svařování (2. sada – dva pulzy)**

Druhá sada tvrdého režimu byla svařena stejnými základními svařovacími parametry jako sada první, s tím rozdílem, že zde bylo použito vícepulzního režimu (konkrétně dvoupulzního). Tzn., že svařování neprobíhalo jedním pulzem svařovacího proudu, jako tomu bylo u 1. sady, ale dvěma pulzy svařovacího proudu.

#### **5.3.2 Vzorky pro zkoušku ultrazvukem a metalografií**

U těchto zkoušek není žádné omezení normou pro rozměry zkoušeného vzorku, proto se bodové svary zhotovily na nenormalizovaném rozměru vzorku. Pouze byla dodržena minimální vzdálenost středu bodového svaru od okrajů vzorku (6,25 mm) a minimální rozteč středů bodových svarů (19,2 mm) dle normy ČSN EN ISO 14373. Při měkkém režimu svařování byly k sobě přivařeny nastříhané vzorky stejného rozměru v rámci jednoho plechu pomocí pěti bodových svarů (Obr. 45 vlevo). Při tvrdém režimu tomu bylo zrovna tak, jen svařované vzorky měly jiný rozměr a byly svařeny pomocí sedmi bodových svarů (Obr. 45 vpravo). Počet svarů a rozměr vzorku byl dán nástřihovým plánem a omezeným množstvím materiálu.



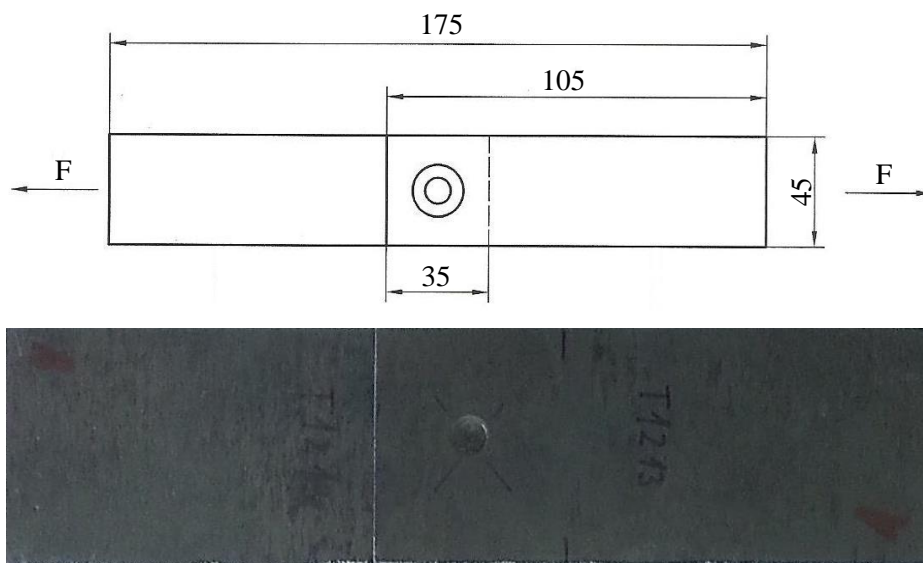
**Obr. 45** 5 svarů v měkkém režimu (vlevo) a 7 svarů v tvrdém režimu (vpravo) (plech č. 4)

Zkouška ultrazvukem byla pro bodové svary svařené v měkkém režimu a pro svary z 1. sady (jeden pulz) tvrdého režimu svařování provedena ve spolupráci se ŠKODA AUTO vícekanálovou sondou (15 MHz) na přístroji s označením RSWA F1 (Frankie) od firmy Tessonics. Bodové svary z 2. sady (dva pulzy) tvrdého režimu svařování byly zkoušeny z časových důvodů jedнокanálovou sondou (V2340; 15 MHz) na přístroji Defektoskop EPOCH 600 od firmy OLYMPUS.

Metalografické výbrusy bodových svarů byly zhotoveny v laboratořích ÚST, FS ČVUT v Praze.

### 5.3.3 Vzorky pro statickou zkoušku stříhem

Statická zkouška stříhem byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14273, kde je uveden přesný rozměr vzorku (**Obr. 46** nahoře) vzhledem k tloušťce plechu zkoušeného vzorku (v našem případě 1,2 mm).



**Obr. 46** Rozměry vzorku v mm (nahore) a ukázka reálného vzorku z plechu č. 1 (dole)

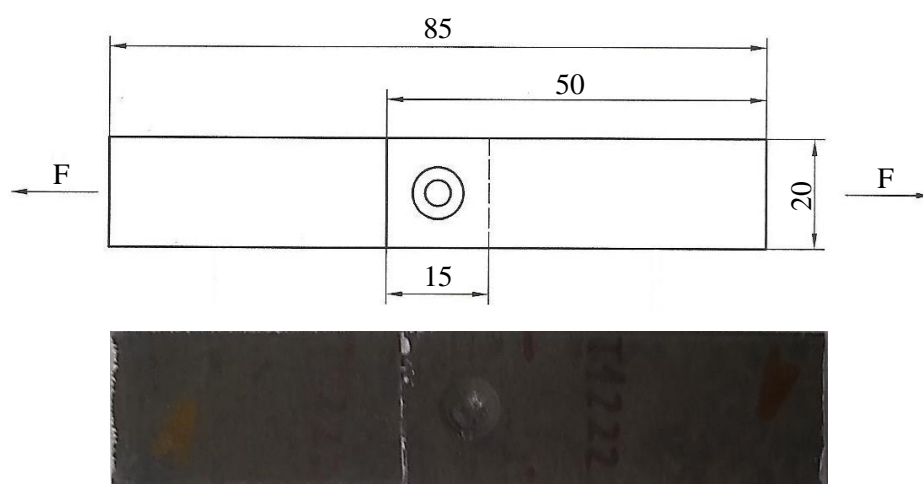
Výstupem statické zkoušky stříhem byla maximální síla ( $F_{ss}$ ) potřebná pro ustřížení svaru, změřený průměr svaru ( $d$  – minimální průměr svaru by dle ČSN EN ISO 14373 neměl klesnout pod hodnotu  $3,5\sqrt{t}$ , kde  $t$  je tloušťka plechu) a určený typ porušení (svar s vytrženou symetrickou nebo nesymetrickou částí; svar s porušením v dělicí rovině). Správný postup vyhodnocení výsledků je uveden v normě ČSN EN ISO 14273.

Statická zkouška stříhem byla provedena v laboratořích ÚST, FS ČVUT v Praze na trhačím stroji LabTest 5.100SP1 od firmy LaborTech při malých rychlostech posuvu trhačích čelistí (v našem případě  $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

### 5.3.4 Vzorky pro dynamickou zkoušku stříhem

Dynamická zkouška stříhem byla provedena ve spolupráci s dopravní fakultou Univerzity v Pardubicích na přístroji, který si sami vyvinuli pro zkoušení pevnosti svaru právě těchto vysokopevnostních martenzitických ocelí. Jedná se o zkoušku dynamickou, tzn. při vysokých rychlostech posuvu trhačích čelistí (v našem případě  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Výsledkem této zkoušky je zjištění maximální síly potřebné pro ustřížení ( $F_{sd}$ ).

Na tuto zkoušku se nevztahuje žádná norma, takže rozměry zkoušených vzorků (**Obr. 47 nahore**) byly zvoleny dle minimální velikosti vzorku potřebné pro upnutí do čelistí přístroje při dodržení minimálních vzdáleností středů bodových svarů od kraje (dle ČSN EN ISO 14373).



**Obr. 47** Rozměry vzorku v mm (nahore) a ukázka reálného vzorku z plechu č. 1 (dole)

### 5.3.5 Značení jednotlivých svarů

#### Měkký režim svařování

## M x y

- M – měkký režim svařování
- x – číslo plechu (1 – 6)
- y – číslo svaru v rámci jednoho plechu (1 – 6); svary č. 1 – 5 jsou určeny pro zkoušku ultrazvukem a metalografií; svar č. 6 je určen pro statickou zkoušku stříhem

Např. svar s označením M34 představuje svar svařený v měkkém režimu z plechu č. 3 a je na vzorku, který je určený pro zkoušku ultrazvukem a metalografií, pod č. 4.

#### Tvrký režim svařování

## T x y z

- T – tvrdý režim svařování
- x – číslo plechu (1 – 6)
- y – číslo sady – jeden nebo dva pulzy (1 – 2)
- z – číslo svaru v rámci jednoho plechu (1 – 22): svary č. 1 – 7 jsou určeny pro zkoušku ultrazvukem a metalografií; svary č. 8 – 17 jsou určeny pro statickou zkoušku stříhem; svary 18 – 22 jsou určeny pro dynamickou zkoušku stříhem

Např. svar s označením T4112 představuje svar svařený v tvrdém režimu (1. sada) z plechu č. 4 a je na vzorku, který je určený pro statickou zkoušku stříhem, pod č. 12.

### 5.4 Vyhodnocení měkkého svařovacího režimu

Vzorky byly svařeny v měkkém režimu ve spolupráci s firmou RUBI CZECH. V praxi se měkkého režimu příliš nevyužívá, z důvodu delších svařovacích časů, které jsou neekonomické v souvislosti s prodloužením celkové doby výroby. Vzorky byly svařeny na zařízení s adaptivním řízením, kde svařovací parametry nejsou voleny obsluhou, ale vestavěný software si na základě změřených přechodových odporů sám volí optimální parametry. Předpokladem byly ideální svary bez vad. Parametry byly pro každý svar zaznamenány a vzájemně mezi sebou porovnány jak z hlediska typu plechu (**Tab. 27**), tak z hlediska jednotlivých svarů na jednom typu plechu. Výsledné svary byly proměřeny

vícekanálovou ultrazvukovou sondou (pro zjištění případných vnitřních vad) a následně z nich byly vyrobeny metalografické výbrusy.

**Tab. 27** Průměrné hodnoty svařovacích parametrů jednotlivých plechů (měkký režim)

	Plech č.					
	1	2	3	4	5	6
$I_s$ [kA]	7,19	7,26	7,26	7,19	7,19	7,16
$t_s$ [ms]	797	898	894	894	858	942
$P_s$ [kN]	2,90	3,03	3,00	2,92	2,93	2,88

#### 5.4.1 Zkouška ultrazvukem a metalografické výbrusy

Na každém typu plechu bylo zhotoveno 5 bodových svarů, které byly hodnoceny ultrazvukem a optickou mikroskopií. Výsledky z ultrazvuku jsou uvedeny v **Tab. 28** a **Tab. 29**.

**Tab. 28** Výsledky zkoušky ultrazvukem (vícekanálová sonda) jednotlivých svarů (měkký režim)

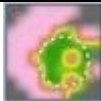



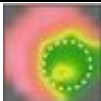


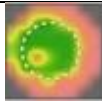
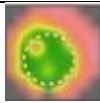



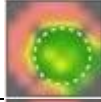












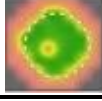
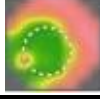
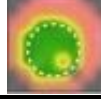

Svar	Dobry / Špatny	Průměr čočky [mm]	Hloubka vtisku elektrody [mm]	Výška svaru [mm]	Svar	Dobry / Špatny	Průměr čočky [mm]	Hloubka vtisku elektrody [mm]	Výška svaru [mm]
M11		5,3	0,10	2,23	M41		5,6	0,21	2,20
M12		2,6	0,11	2,20	M42		5,3	0,21	2,14
M13		5,3	0,12	2,24	M43		5,3	0,20	2,19
M14		5,1	0,17	2,19	M44		5,2	0,20	2,19
M15		5,4	0,14	2,20	M45		5,1	0,20	2,21
M21		4,8	0,18	2,10	M51 <sup>1</sup>	-	-	-	-
M22		5,7	0,16	2,22	M52		4,6	0,19	2,10
M23		5,9	0,24	2,20	M53		5,3	0,18	2,19
M24		6,0	0,21	2,22	M54		6,0	0,19	2,20
M25		6,0	0,20	2,25	M55		5,3	0,21	2,17
M31		5,3	0,21	2,17	M61		4,8	0,20	2,19
M32		6,0	0,21	2,21	M62		5,3	0,21	2,17
M33		6,1	0,22	2,20	M63		5,9	0,18	2,12
M34		5,8	0,20	2,20	M64		5,1	0,19	2,15
M35		6,8	0,20	2,25	M65		6,0	0,19	2,12

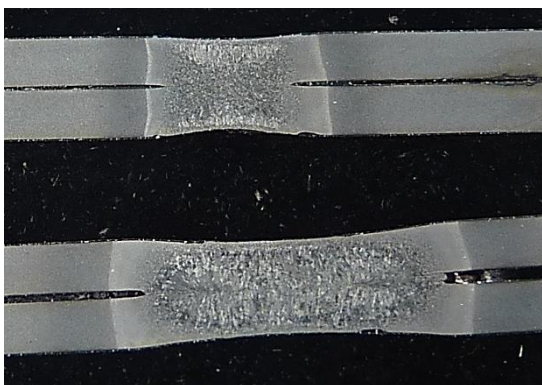
Průměr čočky je menší než průměr požadovaný (4,6) a dokonce menší než minimální (3,9).  
<sup>1</sup> Nestandardní průběh zkoušky.

Z výsledků měření (**Tab. 28**) vícekanálovou sondou je patrné, že z hlediska velikosti průměru svaru vyhověly všechny svary kromě svaru M12 (**Obr. 48**), který měl průměr svarové čočky menší než minimální (viz. C-Scan svaru). Hodnocení svaru vícekanálovou sondou spočívá zejména v nedestruktivním změření průměru svarové čočky, přičemž si přístroj dle tloušťky svařovaných plechů sám vypočítá minimální (3,9 mm) a požadovaný průměr (4,6 mm). Minimální průměr svarové čočky tvoří 85 % průměru požadovaného. Z ultrazvukových

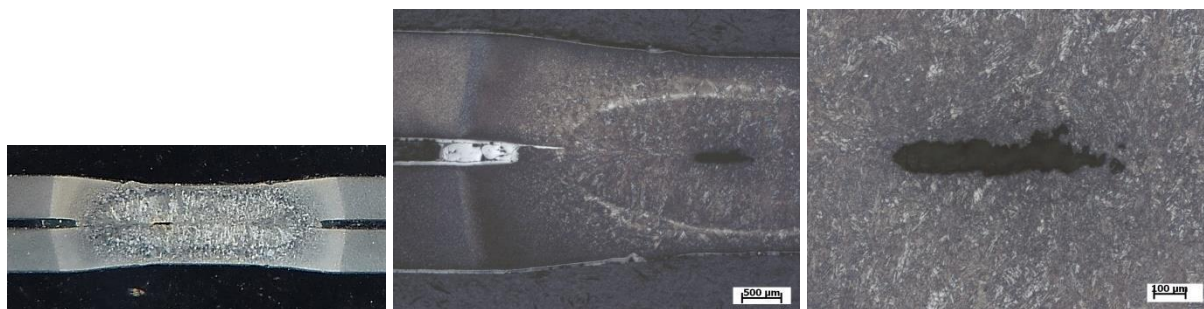
snímků (**Tab. 29**) je patrné, že většina svarů i přes vyhovění obsahuje v dělicí rovině svarové čočky vnitřní vady (žlutočervené skvrny v zelené oblasti; **Obr. 49**).

**Tab. 29** Ultrazvukové C-scany jednotlivých svarů získané vícekanálovou sondou (měkký režim)

C-Scan svaru		První část označení svaru					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Druhá část označení svaru	1					-	
	2						
	3						
	4						
	5						



**Obr. 48** Porovnání průměrů svaru M12 (nahore) a M13 (dole) (makro snímek metalografických výbrusů)



**Obr. 49** Vnitřní vada (staženina) svaru M61 v různém zvětšení (makro snímek, 25x, 100x)



## 5.4.2 Statická zkouška stříhem

Výsledky ze statické zkoušky stříhem jsou uvedeny v **Tab. 30**.

*Tab. 30 Hodnoty maximální síly potřebné pro přestřížení svaru a průměr svaru (měkký režim)*

	Označení svaru					
	M16	M26	M36	M46	M56	M66
<b>F<sub>ss</sub> [kN]</b>	21,93	22,36	22,61	22,47	20,69	21,82
<b>d [mm]</b>	5,66	6,05	6,01	5,44	5,73	5,89

Výsledky měření (**Tab. 30**) – maximální síla při přestřížení a průměr svaru – byly u všech svarů u jednotlivých plechů velmi podobné. Ve všech případech byl vytržený svar porušen symetricky (**Obr. 50**). Lze říci, že tloušťka difuzní vrstvy při svařování v měkkém režimu neměla na kvalitu svarového spoje vliv.



*Obr. 50 Vytržená část svaru M26 (vlevo) a otvor po vytržené části svaru (vpravo)*

## 5.5 Vyhodnocení tvrdého svařovacího režimu (1. sada – jeden pulz)

Vzorky svařené tvrdým režimem s jedním pulzem byly svařeny následujícími svařovacími parametry (dle provedené optimalizace):  $I_s = 7$  kA,  $t_s = 280$  ms a  $P_s = 2,5$  kN.

### 5.5.1 Zkouška ultrazvukem a metalografické výbrusy

Pro zkoušku ultrazvukem bylo určeno vždy 7 svarů na každém plechu. Následně byly zhotoveny jejich metalografické výbrusy.

**Tab. 31** Výsledky zkoušky ultrazvukem (vícekanálová sonda) jednotlivých svarů (tvrdý režim – jeden pulz)

Svar	Dobrá / Špatná	Průměr čočky [mm]	Hloubka vtisku elektrody [mm]	Výška svaru [mm]	Svar	Dobrá / Špatná	Průměr čočky [mm]	Hloubka vtisku elektrody [mm]	Výška svaru [mm]
T111	Špatná	5,3	0,25	2,17	T411	Dobrá	5,3	0,23	2,16
T112	Špatná	4,8	0,43	1,74	T412	Dobrá	5,1	0,22	2,13
T113	Špatná	5,2	0,27	2,16	T413	Špatná	5,3	0,25	2,09
T114	Dobrá	5,2	0,24	2,17	T414	Špatná	6,5	0,36	1,79
T115	Špatná	5,3	0,25	2,13	T415	Dobrá	5,3	0,24	2,09
T116	Dobrá	5,1	0,17	2,39	T416	Dobrá	5,3	0,23	2,11
T117	Dobrá	6,1	0,22	2,18	T417	Špatná	5,3	0,26	2,05
T211	Špatná	5,3	0,25	2,14	T511	Dobrá	5,3	0,23	2,09
T212	Dobrá	4,8	0,19	2,22	T512	Dobrá	5,1	0,21	2,08
T213	Dobrá	5,2	0,20	2,20	T513	Dobrá	4,6	0,24	2,09
T214	Dobrá	4,8	0,19	2,21	T514	Dobrá	5,0	0,24	2,06
T215	Dobrá	4,6	0,17	2,21	T515	Špatná	5,3	0,26	2,04
T216	Dobrá	5,3	0,20	2,20	T516	Dobrá	4,6	0,23	2,08
T217	Dobrá	5,3	0,23	2,18	T517	Špatná	6,5	0,49	1,55
T311	Dobrá	5,3	0,22	2,19	T611	Špatná	6,0	0,29	2,06
T312	Dobrá	5,3	0,21	2,19	T612	Špatná	5,3	0,28	2,01
T313	Dobrá	5,5	0,18	2,25	T613	Špatná	5,5	0,41	1,69
T314	Dobrá	4,7	0,19	2,21	T614	Dobrá	4,7	0,17	2,06
T315	Dobrá	5,3	0,22	2,17	T615	Špatná	4,6	0,27	1,97
T316	Dobrá	6,1	0,22	2,19	T616	Špatná	5,0	0,25	2,02
T317	Dobrá	4,7	0,19	2,20	T617	Špatná	5,3	0,29	2,01

Hloubka vtisku je větší než 20 % tloušťky plechu (pro plech 1,2 tomu odpovídá hodnota 0,24).

Vícekanálová ultrazvuková sonda vyhodnotila všechny svary uvedené v **Tab. 31** jako vyhovující, protože tato sonda se používá především na změření průměru svarové čočky, který u všech svarů splňoval minimální (3,9 mm) i požadovaný průměr (4,6 mm). Bohužel ale u některých svarů nevyhověla hloubka vtisku elektrody, jejíž hodnota musí být dle ČSN EN ISO 14373 maximálně 20 % tloušťky svařovaného plechu. Díky tomu byly některé svary vyhodnoceny jako nevyhovující.

Nejlepších výsledků bylo dle hloubky vtisku dosaženo u svarů na plechu č. 2 (svary T21x, tloušťka difuzní vrstvy je 5,13 μm) a plechu č. 3 (T31x, tloušťka difuzní vrstvy je 6,55 μm), vyjma vzorku T211, který hloubku vtisku přesáhl jen těsně o 0,01 mm. Naopak jako nejhorší se ukázaly svary plechu č. 6 (tloušťka difuzní vrstvy je 9,10 μm), kdy naopak ze sedmi svarů vyhověl pouze jeden (T614). Ostatní svary nevyhověly díky zmíněné velké hloubce vtisku elektrod. Výsledky také ukazují, jak je svařovací proces i v rámci jednoho plechu (stejná tloušťka difuzní vrstvy) velmi nestabilní, např. svar T613 má vysokou hodnotu vtisku (0,41

mm) a naopak svar T614 má poměrně nízkou hodnotu vtisku (0,17). To mohlo být způsobeno nehomogeností jednotlivých vrstev povlaku.

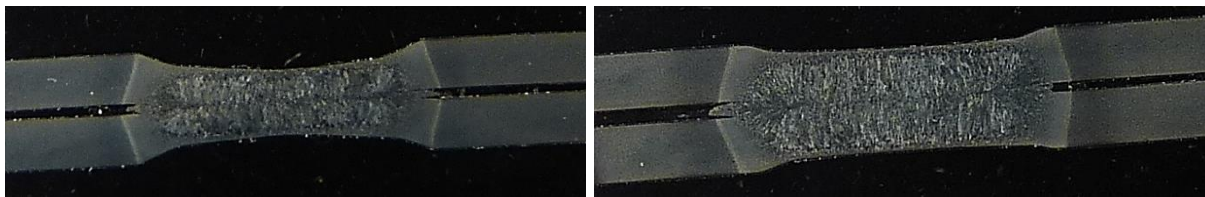
Na **Obr. 51** je porovnán nevyhovující svar T517 s největší hloubkou vtisku (0,49 mm) a vyhovující svar T215 s nejmenší hloubkou vtisku elektrod (0,17 mm).

Na rozdíl od bodových spojů svařovaných v měkkém režimu svařování, které téměř všechny obsahovaly vnitřní vady ve svarové čočce, spoje svařené v jednopulzním tvrdém režimu dle snímků z ultrazvuku (**Tab. 32**) vnitřní vady neobsahovaly. To dokazuje vhodnou volbu svařovacích parametrů, dle provedené optimalizace.

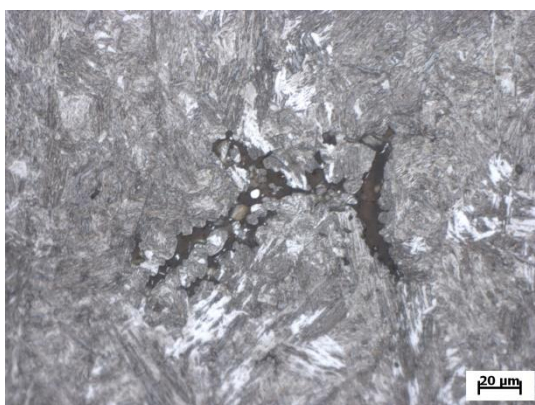
Přesto se vady ve svarech vyskytovaly i po jednopulzním tvrdém režimu svařování, ale jejich velikost byla v porovnání s měkkým režimem mnohem menší (pod rozlišovací schopností ultrazvuku). Proto se menší vady ukázaly až na optické mikroskopii metalografických výbrusů (**Obr. 52**). Jednalo se především o staženiny.

**Tab. 32** Ultrazvukové C-scany jednotlivých svarů získané vícekanálovou sondou (tvrdý režim – jeden pulz)

C-Scan svaru		První část označení svaru					
		T11	T21	T31	T41	T51	T61
Druhá část označení svaru	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
	7						



**Obr. 51** Porovnání hloubek vtisku elektrod nevyhovujícího svaru T517 (vlevo) a vyhovujícího svaru T215 (vpravo)



**Obr. 52** Mikrostruktura svaru T411 s vnitřní vadou (zvětšení 500x)

### 5.5.2 Statická zkouška stříhem

Statická stříhová zkouška byla provedena vždy na deseti vzorcích (svarech) z každého typu plechu. Výsledky jsou uvedeny v **Tab. 33**.

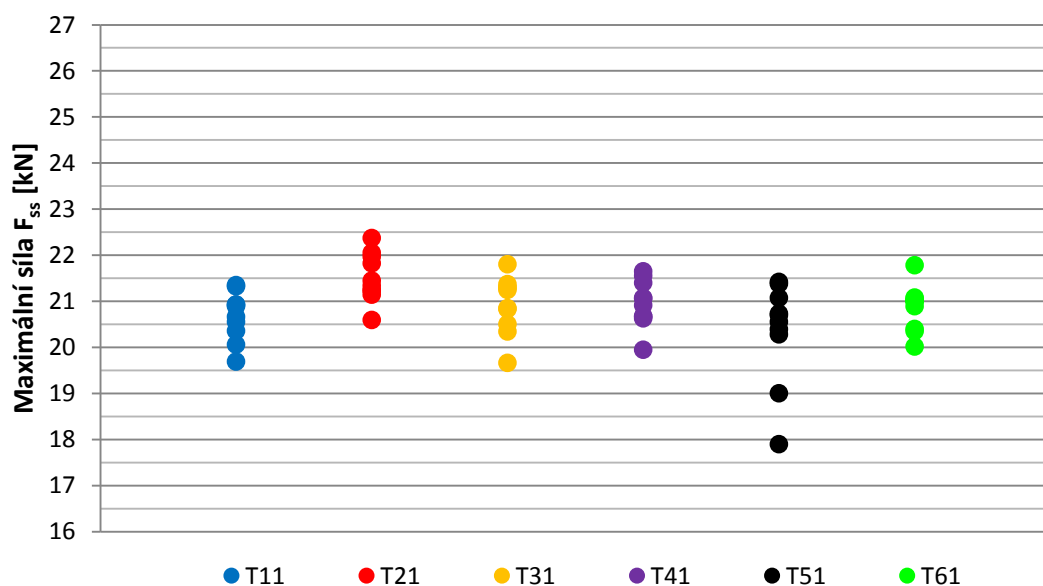
**Tab. 33** Hodnoty maximální síly  $F_{ss}$  potřebné pro přestřížení svaru (tvrdý režim – jeden pulz)

Max. síla $F_{ss}$ [kN]		První část označení svaru					
		T11	T21	T31	T41	T51	T61
Druhá část označení svaru	8	20,66	21,14	19,66	21,07	20,55	20,35
	9	20,06	20,59	20,50	20,67	21,38	20,40
	10	20,36	21,24	21,29	21,06	19,00	21,01
	11	19,69	21,97	21,25	21,65	20,39	21,01
	12	20,55	21,34	20,34	21,40	20,70	21,78
	13	20,93	21,23	21,37	20,91	20,28	21,00
	14	20,93	22,05	20,85	20,68	17,90	20,89
	15	21,32	22,37	21,31	20,63	21,42	21,05
	16	20,89	21,82	21,80	19,95	21,07	21,08
17	21,35	21,45	20,83	21,55	20,73	20,02	
Průměrná max. síla [kN]		20,67	21,52	20,92	20,96	20,34	20,86

Hodnoty síly potřebné pro přestřížení svaru byly pro všechny kontrolované svary velmi podobné, jak v rámci jednotlivých svarů na jednom plechu, tak i v porovnání průměrných

hodnot všech typů plechů. Např. u plechu č. 6 (kde většina svarů měla velké hloubky vtisků zjištěné zkouškou ultrazvukem), výsledky dokazují, že nadměrná hloubka vtisku nemá na sílu při přestřižení vliv.

Pro lepší názornost malého rozptylu jednotlivých maximálních sil při přestřižení svaru v rámci jednoho typu plechu jsou výsledky shrnuty do následujícího grafu (**Graf. 2**). Větší rozptyl hodnot maximálních sil byl jen u svarů na plechu č. 5.



**Graf. 2** Rozptyl maximálních sil  $F_{ss}$  při přetržení svarů v rámci jednotlivých typů plechů (tvrdý režim – jeden pulz)

**Tab. 34** Průměry jednotlivých svarů (tvrdý režim – jeden pulz)

Průměr svaru d [mm]	První část označení svaru						
	T11	T21	T31	T41	T51	T61	
Druhá část označení svaru	8	7,10	6,62	5,93	7,46	7,04	6,42
	9	7,25	6,84	5,80	7,22	7,32	7,43
	10	7,21	7,02	7,22	7,31	7,12	6,28
	11	7,16	7,05	6,45	6,35	6,78	7,11
	12	7,17	7,06	7,28	6,63	7,10	6,86
	13	7,02	6,58	7,26	6,39	7,36	6,80
	14	7,30	6,92	7,12	7,18	7,31	6,27
	15	7,08	6,86	7,24	6,97	7,19	7,08
	16	7,20	7,34	7,20	6,41	6,32	6,92
17	7,34	7,15	7,14	6,44	6,64	6,42	

Neustřižený vzorek (natržení svaru v TOO), měřený průměr natrženého otvoru (**Obr. 56 vlevo**).  
 Ustřižený vzorek (vytržený svar v TOO zůstal na jedné polovině roztrženého vzorku), měřený průměr vytržené části (**Obr. 56 uprostřed**).  
 Ustřižený vzorek v dělicí rovině svaru (**Obr. 56 vpravo**).



**Obr. 53** Možné varianty porušení svarů po zkoušce stříhem ukázané na svaru T5113 (vlevo), T5117 (uprostřed) a T5114 (vpravo)

Porušení svarů po zkoušce stříhem bylo trojího typu. Nejčastější variantou bylo neustřížení celého svaru, kdy došlo jen k natržení svaru v TOO (**Obr. 53 vlevo**), ale vzorek se neoddělil na dvě části. Tento způsob porušení je ideální stav, protože vzorek byl porušen v TOO, ne přímo ve svaru a ještě k tomu se zcela neustříhl, což dokazuje dostatečnou houževnatost materiálu v TOO. Průměr svaru nebylo možné u tohoto typu porušení změřit, proto byl měřen průměr natrženého otvoru. Výsledkem jsou vyšší hodnoty průměru svaru, v **Tab. 34** psané červeným písmem.

Druhou variantou byl klasický stav porušení, kdy došlo k vytržení svaru v TOO a vzorek se ustříhl na dvě části. Vytržený svar zůstal na jedné polovině vzorku (**Obr. 53 uprostřed**), kde bylo možné snadno změřit jeho průměr (**Tab. 34** černé písmo).

Posledním typem porušení bylo ustřížení svaru v dělicí rovině svarové čočky (**Obr. 53 vpravo, Tab. 34** modré písmo). Vzhledem k tomu, že tento typ porušení značí špatné provaření a křehkost svaru, je tato varianta nevyhovující.

Všechny svary z hlediska průměru svaru vyhověly, protože změřený průměr byl vždy větší než minimální (cca 4 mm) dle normy ČSN EN ISO 14373. Z hlediska porušení svaru bylo nejlepších výsledků dosaženo na plechu č. 1, kde všechny svary byly porušeny prvním – optimálním typem porušení. U plechů č. 2 a 3 nastala první varianta porušení vždy nejméně u šesti svarů, což je také příznivý výsledek.

### 5.5.3 Dynamická zkouška stříhem

Pro dynamickou zkoušku stříhem bylo určeno pět vzorků (svarových spojů) od každého typu plechu. Jedná se o nenormalizovanou zkoušku stříhem při vysokých rychlostech posuvu

trhacích čelistí. Hodnotí se maximální síla potřebná pro přestřížení spoje. Výsledky jsou uvedeny v **Tab. 35**.

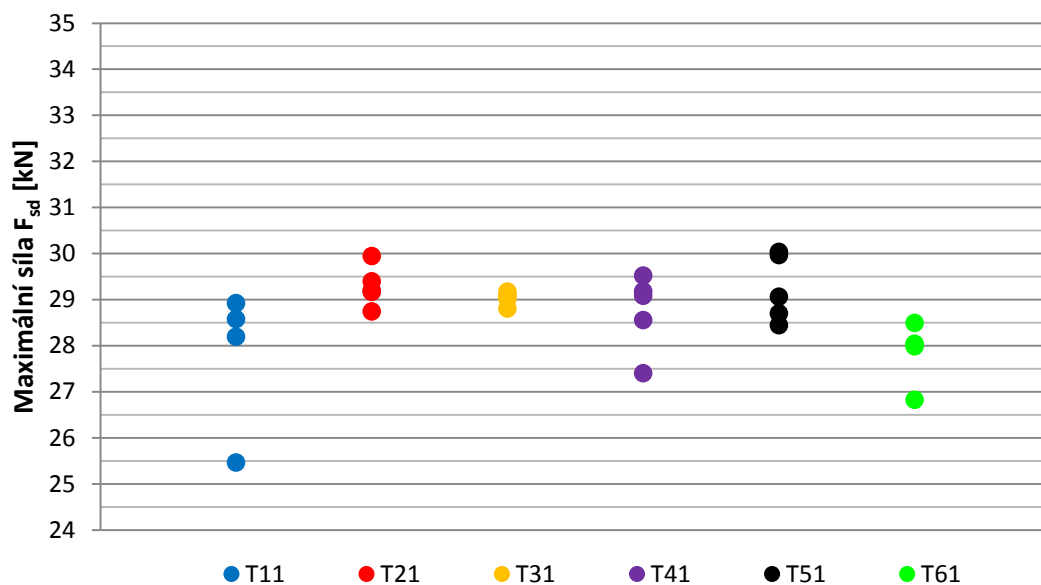
*Tab. 35 Hodnoty maximální síly  $F_{sd}$  potřebné pro přestřížení svaru (tvrdý režim – jeden pulz)*

Max. síla $F_{sd}$ [kN]		První část označení svaru					
		T11	T21	T31	T41	T51	T61
Druhá část označení svaru	18	- <sup>1</sup>	29,94	29,11	27,40	28,44	28,49
	19	25,46 <sup>1</sup>	28,74	29,02	29,08	29,96	26,82
	20	28,19	29,20	29,07	29,18	30,03	28,04
	21	28,57	29,39	29,17	28,55	28,70	28,02
	22	28,92	29,16	28,80	29,52	29,06	27,98
Průměrná max. síla [kN]		27,79	29,29	29,03	28,75	29,24	27,87

<sup>1</sup> Nestandardní průběh zkoušky

Hodnoty maximální síly jsou si opět velmi podobné jako u statické zkoušky stříhem a to jak v rámci jednoho typu plechu, tak i při srovnání průměrných hodnot jednotlivých plechů.

**Graf. 3** ukazuje malý rozptyl hodnot maximálních sil. Nejmenší rozptyl hodnot byl u svarů na plechu č. 3 a poté plechu č. 2. To ukazuje velkou stabilitu pevnosti svarů a tím pádem i stabilitu svařovacího procesu při svařování.



*Graf. 3 Rozptyl maximálních sil  $F_{sd}$  při přetržení svarů v rámci jednotlivých typů plechů (tvrdý režim – jeden pulz)*

## 5.6 Vyhodnocení tvrdého svařovacího režimu (2. sada – dva pulzy)

Další sada vzorků byla svařena ve tvrdém dvoupulzním režimu se stejnými svařovacími parametry jako sada první ( $I_s = 7$  kA,  $t_s = 280$  ms a  $P_s = 2,5$  kN). Dva pulzy svařovacího proudu bez další změny ostatních parametrů (např. snížení přítlačné síly elektrod) způsobily špatný průběh svařovacího procesu. Při svařování téměř každého svaru došlo k rozstříku materiálu mezi svařované plechy. Na svarech se objevily velmi tvrdé a ostré ostříky (**Obr. 55 vpravo**), které v praxi ovlivňují další zpracování svařeného dílu, protože se musí mechanicky opracovávat. Neopracovaný ostřík dokáže po zatmelení proniknout tmelem a vnáší do svařeného dílu korozi. Z tohoto hlediska byly svarové spoje nevyhovující.

### 5.6.1 Zkouška ultrazvukem a metalografické výbrusy

Zkouška ultrazvukem byla provedena jednonálovou sondou a stejně jako u první sady bylo zkoušeno vždy sedm svarových spojů z každého typu plechu.

*Tab. 36 Výsledky zkoušky ultrazvukem (jednonálová sonda) jednotlivých svarů (tvrdý režim – dva pulzy)*

Označení svaru	Dobry / Špatny	Výška svaru [mm]	Označení svaru	Dobry / Špatny	Výška svaru [mm]
T121		1,78	T421		1,86
T122		1,55	T422		1,87
T123		1,81	T423		1,47
T124		1,67	T424		1,81
T125		1,55	T425		1,79
T126		1,88	T426		1,95
T127		1,40	T427		1,42
T221		1,55	T521		1,52
T222		1,51	T522		1,49
T223		1,32	T523		1,63
T224		1,61	T524		1,96
T225		1,49	T525		1,37
T226		1,41	T526		1,84
T227		1,32	T527		1,64
T321		1,49	T621		1,52
T322		1,69	T622		1,52
T323		1,61	T623		1,85
T324		1,78	T624		1,75
T325		1,77	T625		1,68
T326		1,64	T626		1,28
T327		1,47	T627		1,61



Z výsledků ultrazvukové kontroly (**Tab. 36**) je vidět, že téměř všechny svary byly nevyhovující díky nadměrné hloubce vtisku elektrod, která značně překračovala povolenou hodnotu 20 % tloušťky plechu. Proto byla použita jen jednokanálová sonda, která svary vyhodnocuje díky echogramům zahrnujících i vliv hloubky vtisku, na rozdíl od vícekanálové sondy, která svar vyhodnocuje z hlediska velikosti průměru svaru.

Velká hloubka vtisku elektrod byla způsobena dvěma pulzy svařovacího proudu, kdy materiál více měkne a kleště s elektrodami tedy udělají větší hloubku vtisku.

Na **Obr. 54** je ukázka typického bodového odporového spoje, svařovaného dvopulzním tvrdým režimem, pro který je charakteristická velká hloubka vtisku a vytvoření většího výronku (jedná se vlastně o ostřík) po obvodu svarové čočky mezi svařovanými plechy. Velký výronek je způsoben dvěma pulzy svařovacího proudu, které vedou k popuštění (změknutí) tvrdého základního materiálu. Svar je elektrodami více stlačen a natavený materiál se vytlačí (přesune) do stran právě ve formě výronku (ostříku).



*Obr. 54 Metalografický výbrus svaru T621 s výronkem a velkou hloubkou vtisků po elektrodách*

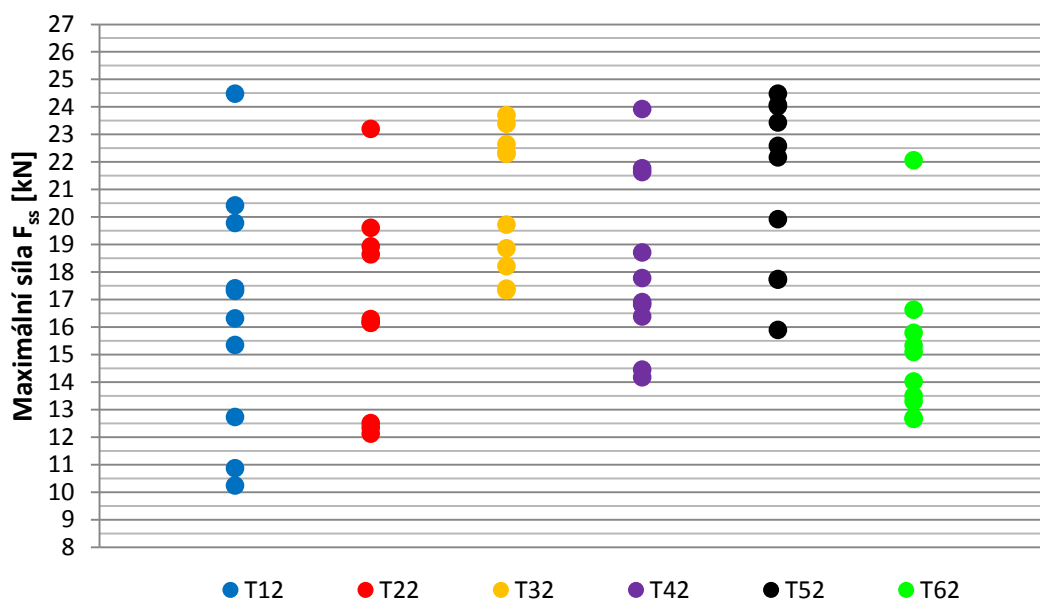
### 5.6.2 Statická zkouška stříhem

Statická zkouška stříhem byla provedena na vzorcích svařených tvrdým režimem s dvěma pulzami svařovacího proudu stejně jako u sady první na deseti vzorcích (svarech) od každého typu plechu. Výsledky jsou uvedeny v **Tab. 37**.

Tab. 37 Hodnoty maximální síly  $F_{ss}$  potřebné pro přestřížení svaru (tvrdý režim – dva pulzy)

Max. síla $F_{ss}$ [kN]		První část označení svaru					
		T12	T22	T32	T42	T52	T62
Druhá část označení svaru	8	24,48	18,92	18,20	21,63	22,58	14,01
	9	17,40	12,34	22,64	14,17	22,16	13,49
	10	15,34	19,60	22,33	16,90	24,07	15,09
	11	17,31	16,15	22,29	16,81	23,43	12,69
	12	10,86	16,17	23,38	23,92	17,71	15,78
	13	10,24	18,63	19,72	18,70	17,74	13,30
	14	12,73	12,12	17,33	14,45	24,02	15,32
	15	19,77	12,50	17,39	17,77	15,89	16,62
	16	20,42	16,29	23,70	21,76	19,92	22,06
17	16,31	23,19	18,86	16,38	24,48	12,65	
Průměrná max. síla [kN]		16,49	16,59	20,58	18,25	21,20	15,10

Výsledné hodnoty maximálních sil potřebných k přestřížení svarového spoje mají v porovnání s jednopulzním tvrdým režimem mnohem větší rozptyl (Graf. 4). To ukazuje výrazně větší nestabilitu svařovacího procesu. Příčinou nestability jsou velmi tvrdé a ostré ostříky ovlivňující pevnost svaru, vznikající v důsledku měknutí materiálu způsobeného dvěma pulzy svařovacího proudu.



Graf. 4 Rozptyl maximálních sil  $F_{ss}$  při přetržení svarů v rámci jednotlivých typů plechů (tvrdý režim – dva pulzy)

Tab. 38 Průměry jednotlivých svarů (tvrdý režim – dva pulzy)

Průměr svaru d [mm]		První část označení svaru					
		T12	T22	T32	T42	T52	T62
Druhá část označení svaru	8	9,52	6,16	8,08	9,28	9,30	6,71
	9	6,10	5,82	6,81	6,87	7,63	6,03
	10	6,49	6,00	6,39	7,10	9,22	6,21
	11	6,81	6,03	7,62	6,43	6,70	6,34
	12	6,41	6,11	7,85	9,03	7,24	6,75
	13	6,32	6,41	6,26	6,79	7,33	6,06
	14	6,13	6,21	6,75	6,83	9,25	6,48
	15	6,01	6,16	6,00	6,89	7,21	7,20
	16	6,26	6,08	9,51	9,26	7,72	7,32
	17	6,43	9,50	7,53	6,43	9,22	6,26

Neustřížený vzorek (natržení svaru v TOO), měřený průměr natrženého otvoru.  
Ustřížený vzorek (vytržený svar v TOO zůstal na jedné polovině roztrženého vzorku), měřený průměr vytržené části.



Obr. 55 Možné varianty porušení svarů po zkoušce stříhem ukázané na svaru T2217 (vlevo) a T1212 (vpravo)

Porušení spojů, svařených dvoupulzním tvrdým režimem, mělo po zkoušce stříhem v porovnání s 1. sadou jen dvě varianty (ani jednou nedošlo k porušení svaru v dělicí rovině). Prvním typem porušení bylo neustřížení celého svaru, kdy došlo jen k natržení svaru v TOO (Obr. 55 vlevo). V tomto případě byl měřen natržený otvor v TOO, nikoliv průměr svaru, proto tomuto typu porušení odpovídají větší hodnoty průměrů svarů (Tab. 38 červené písmo). Za povšimnutí stojí fakt, že tomuto typu porušení odpovídají svary bez ostříků s vysokými hodnotami maximální síly při přetržení (Tab. 37), což ukazuje na vysokou pevnost svarových spojů.

Druhou variantou porušení bylo klasické ustřížení, kdy svar zůstal na jednom ze svařovaných plechů. Ve velké většině případů byl tento typ porušení doprovázen již zmíněnými ostříky kolem obvodu svaru (**Obr. 55 vpravo**).

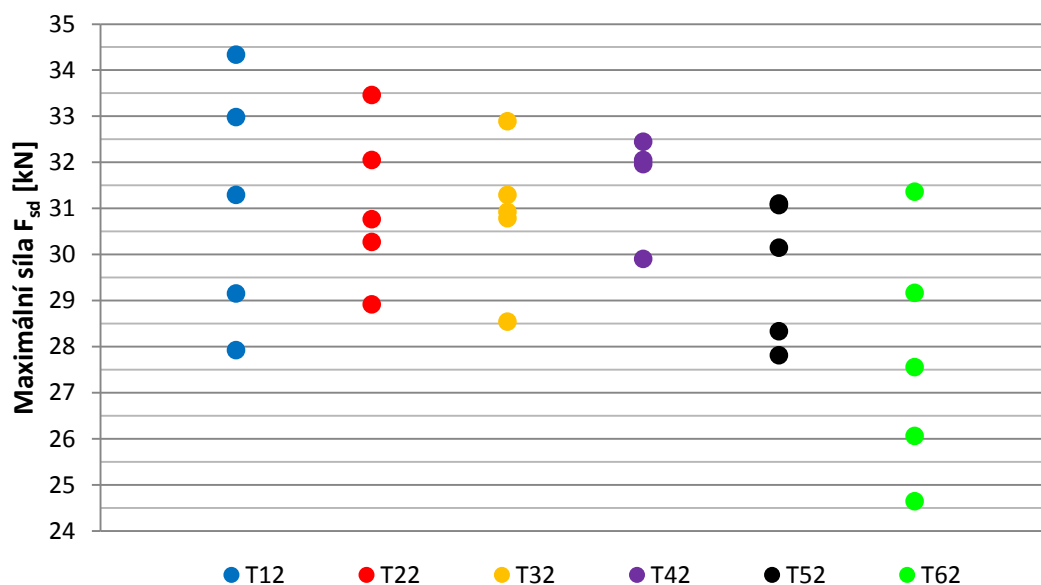
### 5.6.3 Dynamická zkouška stříhem

Dynamická zkouška stříhem (nenormalizovaná zkouška stříhem za vysokých rychlostí) byla provedena na spojích svařených dvoupulzním tvrdým režimem, stejně jako u spojů svařených jednopulzním tvrdým režimem, na pěti vzorcích (svarech) od každého typu plechu.

**Tab. 39** Hodnoty maximální síly  $F_{sd}$  potřebné pro přestřížení svaru (tvrdý režim – dva pulzy)

Max. síla $F_{sd}$ [kN]		První část označení svaru					
		T12	T22	T32	T42	T52	T62
Druhá část označení svaru	18	31,29	30,76	30,78	23,95	28,33	26,06
	19	32,98	28,91	28,54	32,44	31,10	31,36
	20	29,15	32,05	32,89	31,96	30,14	27,55
	21	27,92	30,27	31,29	32,05	27,81	24,64
	22	34,33	33,46	30,92	29,90	31,07	29,16
Průměrná max. síla [kN]		31,13	31,09	30,88	30,06	29,69	27,75

Hodnoty maximálních sil, potřebných pro přetržení svaru, jsou uvedeny v **Tab. 39**. Rozptyl hodnot maximálních sil (**Graf. 5**) je značně větší, než tomu bylo u 1. sady. To opět ukazuje na nestabilitu svařovacího procesu při dvoupulzním tvrdém režimu svařování.



**Graf. 5** Rozptyl maximálních sil  $F_{sd}$  při přetržení svarů v rámci jednotlivých typů plechů (tvrdý režim – dva pulzy)

## 6 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na bodové odporové svařování martenzitických, vysokopevnostních ocelí, tvářených za tepla (22MnB5). Oceli tohoto typu se díky své vysoké pevnosti používají na výrobu bezpečnostních dílů karoserie. Kvůli ochraně plechu při procesu tváření za tepla jsou tyto materiály opatřeny povlakem na bázi siluminu (Al-Si), který zabraňuje tvorbě okují při vysokých tvářecích teplotách. Právě tento povlak (zejména heterogenity obsažené v povlaku a velká tloušťka difuzní vrstvy vznikající mezi základním materiálem a povlakem) výrazně ovlivňuje stabilitu svařovacího procesu. Proto hlavním cílem experimentální části diplomové práce bylo popsání vlivu povrchové vrstvy (zejména tloušťky difuzní vrstvy) na stabilitu svařovacího procesu a vlastnosti svarů. Pro určení vlivu tloušťky difuzní vrstvy bylo k dispozici celkem šest plechů stejného materiálu s různým tepelným zpracováním. Variantní tepelné zpracování ovlivnilo tloušťku difuzní vrstvy velmi citlivě na teplotu a dobu výdrže na teplotě (s rostoucí teplotou a rostoucí dobou výdrže na teplotě se zvyšovala i tloušťka difuzní vrstvy). K dispozici tedy bylo šest plechů ze stejného materiálu s různou tloušťkou difuzní vrstvy (od 4,08 do 9,10  $\mu\text{m}$ ). Vždy stejné typy plechu byly bodově odporově svařeny a na svarových spojích byly provedeny nedestruktivní i destruktivní zkoušky (zkouška ultrazvukem, metalografická zkouška, zkoušky stříhem).

Chemická analýza, optická mikroskopie a měření mikrotvrlosti základního materiálu ukázaly, že variantní tepelné zpracování nemá vliv na vlastnosti základního materiálu, na rozdíl od velkého vlivu na vlastnosti povlaku. Chemická analýza ukázala, že tloušťka difuzní vrstvy se díky variantnímu tepelnému zpracování významně s rostoucí teplotou a dobou výdrže na teplotě zvyšuje.

Dalším cílem DP bylo porovnání měkkého a tvrdého svařovacího režimu. Pro měkký režim byly použity parametry automaticky volené adaptivním svařovacím zařízením. Pro tvrdý režim byly použity parametry získané optimalizací a to nejprve v jednopulzní variantě (1. sada) a poté se dvěma pulzy svařovacího proudu (2. sada).

Téměř všechny svary (kontrolované ultrazvukem), zhotovené v měkkém režimu svařování, obsahovaly vnitřní vady (patrné z ultrazvukových snímků). Vlastnosti svarů jednotlivých plechů se téměř nelišily. Lze konstatovat, že při svařování v měkkém režimu nemá velikost difuzní vrstvy (až do tloušťky 9,10  $\mu\text{m}$ ) vliv na kvalitu spoje.

Většina vzorků svařených tvrdým režimem s jedním pulzem svařovacího proudu (1. sada) při použití svařovacích parametrů, získaných optimalizací parametrů, neobsahovaly vnitřní vady (ze zkoušky ultrazvukem). Z ostatních zkoušek provedených na svarech 1. sady tvrdého režimu (statická a dynamická zkouška stříhem) je patrné, že hodnoty maximální síly ( $F_{ss}$  i  $F_{sd}$ ) potřebné pro přestřižení svaru se výrazně neliší jak v rámci jednoho plechu, tak při porovnání průměrných hodnot sil potřebných pro přestřižení jednotlivých plechů.

Druhá sada vzorků svařovaná v tvrdém režimu při použití stejných parametrů jako u 1. sady, ale s rozdílným svařovacím pulzem (dva pulzy), vykazovala velmi špatné vlastnosti svarů u všech typů plechů. Při svařování docházelo k rozstříku materiálu mezi svařované plechy (tvorba tzv. ostříků). Ostříky jsou pro svarový spoj velmi nepříznivé, protože zhoršují stabilitu procesu svařování. Zejména pak ovlivňují pevnost svaru, což ukazuje velký rozptyl naměřených hodnot maximálních sil potřebných pro přestřižení svaru jak u statické tak i dynamické zkoušky stříhem. Téměř všechny svary z této sady měly nevyhovující hloubku vtisku elektrod, což bylo způsobené právě dvěma pulzy v kombinaci s příliš velkou přitlačnou silou elektrod. Při dvoupulzním svařování materiál více měkne a to se odrazilo právě na hloubce vtisku.

Z výše uvedeného vyplývá doporučení, svařovat ve dvoupulzním tvrdém režimu s použitím nižší přitlačné síly elektrod (nižší než 2,5 kN).

Vzhledem k tomu, že svařování v měkkém režimu vede k tvorbě vnitřních vad a svařování ve dvoupulzním tvrdém režimu vede ke vzniku nežádoucích ostříků, lze konstatovat, že svařování v tvrdém režimu s parametry ( $I_s = 7$  kA,  $t_s = 280$  ms a  $P_s = 2,5$  kN) a jedním pulzem svařovacího proudu je z hlediska provedených zkoušek nejvhodnější. Dále lze konstatovat, že tak malý rozdíl v tloušťkách difuzní vrstvy nemá zásadní vliv na odporovou svařitelnost oceli 22MnB5 s povrchovou úpravou na bázi Al-Si. Proto bych doporučil, zaměřit se v dalším výzkumu na větší tloušťky difuzních vrstev (nad 10  $\mu\text{m}$ ) a případné vícepulzní svařování s menšími přitlačnými silami elektrod, protože i malá změna tepelného režimu při procesu tváření za tepla může velice změnit vlastnosti povlaku Al-Si a následně i zhoršit kvalitu a pevnost svarových spojů.

## Použitá literatura

- [1] ASLANLAR, S. The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry. *Materials and Design* 27. 2006, s. 125-131.
- [2] HOLÁSEK, J. *Odporové zvárание*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1968, 384 s.
- [3] HLAVATÝ, I. Rozdělení metod tlakového odporového svařování. *Teorie a technologie svařování* [online]. 2009 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/10-21.pdf>
- [4] NEUMANN, H. Odporové svařování: Základní principy a poznatky. *Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní: Katedra strojírenské technologie*. Liberec, 2006.
- [5] TICHÝ, J. Svařování v automobilovém průmyslu - 2. část. *Svět svaru* [online]. 2007 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Sva%C5%99.v.Automob\\_2\\_2007.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Sva%C5%99.v.Automob_2_2007.pdf)
- [6] DILLINGER, J. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa Sobotáles cz. s.r.o., 2007, 612 s. ISBN 987-80-86706-19-1.
- [7] KOLARÍK, L. Svařování elektrickým odporem. *ČVUT v Praze, Fakulta strojní: Ústav strojírenské technologie* [online]. 2010 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: [http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/odporove\\_svarovani.pdf](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/odporove_svarovani.pdf)
- [8] KUBÍČEK, J. Technologie svařování. *VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství: Ústav strojírenské technologie - Odbor technologie svařování a povrchových úprav* [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/technologie\\_svarovani\\_\\_5te\\_etv\\_etv-k\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_svarovani__5te_etv_etv-k_kubicek.pdf)
- [9] NEUMANN, H. Teorie svařování a pájení: Metalurgické základy metod tlakového svařování. Fyzikální a fyzikálně-chemické charakteristiky svařovacích procesů – odporové svařování. *Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní: Katedra strojírenské technologie – Oddělení strojírenské metalurgie*.
- [10] PLÍVA, L. *Odporové svařování*. Praha: SNTL, 1975, 265 s.
- [11] Resistance Spot Welding. *Fraunhofer IPK* [online]. [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.ipk.fraunhofer.de/en/divisions/joining-and-coating-technology/fields-of-expertise/resistance-spot-welding/>
- [12] ČSN EN ISO 14373. *Odporové svařování – Postup pro bodové svařování nepovlakovaných a povlakovaných nízkouhlikových ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [13] LIPA, M. *Odporové zvárание*. Bratislava: Weldtech, 1995, 81 s. ISBN 80-88734-13-4.

- [14] NOVÁ, I. Technologie I.: Technologie s vyšší koncentrací tepla. *Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní: Katedra strojírenské technologie – Oddělení strojírenské metalurgie* [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD12\\_pretace.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD12_pretace.pdf)
- [15] PILVOUSEK, T. Interní dokument ŠKODA AUTO a. s. – *Technologie ve výrobě karoserie*. 2015.
- [16] Automotive Steel Definitions. *World Auto Steel* [online]. [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions/>
- [17] HORVATH, C. D. The Future Revolution in Automotive High Strength Steel Usage. *American Iron and Steel Institute* [online]. 2004 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <https://www.steel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202004/16%20-%20The%20Future%20Revolution%20in%20Automotive%20AHSS%20Usage.pdf>
- [18] High Strength Steel Stamping Design Manual. *Auto/Steel Partnership* [online]. 2000 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: [http://www.asp.org/~media/Files/ASP/Enabling%20Programs/High\\_Strength\\_Steel\\_Stamping\\_Design\\_Manual.pdf](http://www.asp.org/~media/Files/ASP/Enabling%20Programs/High_Strength_Steel_Stamping_Design_Manual.pdf)
- [19] Ultra High Strength Standard Size Steel Tubing. *Superior Roll Forming* [online]. 2014 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <https://superiorrollforming.wordpress.com/2014/02/17/ultra-high-strength-standard-size-steel-tubing/>
- [20] Interstitial Free Steels. *Ispat Guru* [online]. 2014 [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: <http://ispatguru.com/interstitial-free-steels/>
- [21] KOLNEROVÁ, M. Metody tváření kovů a plastů: Pevnostní materiály v karoserii. *Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní: Katedra strojírenské technologie – Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. 2010 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/mtk/MTK3.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/MTK3.pdf)
- [22] Steel Types. *World Auto Steel* [online]. [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/>
- [23] Mild Steels. *ArcelorMittal* [online]. 2009 [cit. 2015-06-04]. Dostupné z: [http://automotive.arcelormittal.com/repository2/Automotive\\_Product%20offer/MildSteels.pdf](http://automotive.arcelormittal.com/repository2/Automotive_Product%20offer/MildSteels.pdf)
- [24] Extract from the product catalogue. *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2015-06-06]. Dostupné z: <http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/ArcelorMittal%20Automotive%20product%20offer%20EN.pdf>
- [25] Multi Phase Twinning-Induced Plasticity (TWIP) Steel. *Total Materia* [online]. 2007 [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=CZ&NM=207>



- [26] RONCERY, L. M., S. WEBER, W. THEISEN. Welding of twinning-induced plasticity steels. *Scripta Materialia* 66. 2011, s. 997-1001.
- [27] DAI, Y., D. TANG, Z. MI, J. LÜ. Microstructure Characteristics of an Fe-Mn-C TWIP Steel After Deformation. *Journal of iron and steel research, International*. 2010, 17 (9), s. 53-59.
- [28] Manganese-boron steels MBW: For hot forming. *ThyssenKrupp Steel Europe* [online]. 2014 [cit. 2015-06-10]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/download?p=497872A2A1336C33BB2485AA205A71E30634C75A178E1C0C2D89F3E13E54BDF9A1821B368D2B2B4A241395EA64F55474AD633D414D39A1B2F3F86EF45835268FB85FB5AECC87EFCBFE103F522B1F6D6C>
- [29] TL 4225. *Alloyed Quenched And Tempered Steel for Press Quenching – Uncoated or Pre-Coated: Material Requirements for Semi-Finished Products and Components*. Volkswagen Aktiengesellschaft, 2012.
- [30] KARBASIAN, H a A. E. TEKKAYA. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology* 210. 2010, s. 2103-2118.
- [31] SCHMIDOVA, E a P. HANUS. Weldability of Al-Si Coated High Strength Martensitic Steel. *Periodica Polytechnica – Transportation Engineering* 41/2. 2013, s. 127-132.
- [32] KOLNEROVÁ, M. Speciální technologie. *Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní: Katedra strojírenské technologie – Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. [cit. 2015-06-11]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/spt.htm>

## Seznam obrázků

<b>Obr. 1</b> Základní druhy odporového svařování.....	11
<b>Obr. 2</b> Ukázka robotizovaného pracoviště ve svařovně ŠKODA AUTO .....	13
<b>Obr. 3</b> Schéma odporového bodového svařování.....	13
<b>Obr. 4</b> Přímé bodové svařování (vlevo) a nepřímé bodové svařování (vpravo).....	14
<b>Obr. 5</b> Princip odporového bodového svařování.....	14
<b>Obr. 6</b> Složky celkového odporu svarového spoje při bodovém svařování .....	15
<b>Obr. 7</b> Povrch kovu na vzduchu .....	16
<b>Obr. 8</b> Metalurgický proces vytváření svarové čočky u bodového svařování (nizkougliková nelegovaná ocel).....	18
<b>Obr. 9</b> Natavení svařovaných dílců .....	19
<b>Obr. 10</b> Průřez bodového svaru (krystalizace a staženina v jeho středu).....	19
<b>Obr. 11</b> Oblasti měkkého a tvrdého svařovacího režimu .....	23
<b>Obr. 12</b> Materiálový koncept – Škoda Octavia III .....	25
<b>Obr. 13</b> Tloušťky plechů [mm] – Škoda Octavia III .....	26
<b>Obr. 14</b> Závislost celkového prodloužení na mezi kluzu daných ocelí.....	27
<b>Obr. 15</b> Typická mikrostruktura DS oceli .....	29
<b>Obr. 16</b> Typická mikrostruktura oceli IF 180 (HC180Y).....	30
<b>Obr. 17</b> Typická mikrostruktura oceli 180 BH (HC180B).....	30
<b>Obr. 18</b> Typická mikrostruktura oceli HSLA 340 (HC340LA) .....	31
<b>Obr. 19</b> Typická mikrostruktura oceli Dual Phase 600 (HCT600X).....	32
<b>Obr. 20</b> Typická mikrostruktura oceli Complex Phase 800 (HDT780C).....	33
<b>Obr. 21</b> Typická mikrostruktura oceli TRIP 690 (HCT690T).....	34
<b>Obr. 22</b> Typická mikrostruktura TWIP oceli .....	35
<b>Obr. 23</b> Typická mikrostruktura oceli MartINsite® 1200.....	36
<b>Obr. 24</b> B-sloupek (tloušťka plechu: 1,85 mm) .....	37
<b>Obr. 25</b> Použití za tepla tvářených plechů v konstrukci karoserie modelů Škoda Octavia .....	38
<b>Obr. 26</b> Feriticko-perlitická struktura před vytvrzením v nástroji (vlevo) a martenzitická struktura po vytvrzení v nástroji (vpravo) oceli 22MnB5 s povrchovou vrstvou Al-Si.....	39
<b>Obr. 27</b> Závislost celkového prodloužení na mezi pevnosti v tahu za tepla tvářených ocelí v průběhu tváření.....	39
<b>Obr. 28</b> Základní způsoby procesu tváření za tepla .....	40
<b>Obr. 29</b> Výroba za tepla tvářených dílů přímou metodou lisování ve ŠKODA AUTO .....	41
<b>Obr. 30</b> Detail řezu bodového spoje (22MnB + 22MnB5, tloušťka plechů: 1,2 mm).....	43
<b>Obr. 31</b> Povrchové úpravy dílů karoserie modelu Škoda Octavia III .....	44
<b>Obr. 32</b> Porovnání rozložení zinku při elektrolytickém a žárovém pokovení.....	46

<b>Obr. 33</b> Morfologie (vlevo) a řez vrstvou (vpravo) elektrolytického povlaku zinku .....	46
<b>Obr. 34</b> Morfologie (vlevo) a řez vrstvou (vpravo) žárového povlaku zinku .....	47
<b>Obr. 35</b> Povlak AS150 v nevytvrzeném stavu.....	48
<b>Obr. 36</b> Povlak AS150 ve vytvrzeném stavu s měřeními tloušťkami vrstev.....	49
<b>Obr. 37</b> Martenzitická mikrostruktura jednotlivých plechů (zvětšení 1000x).....	52
<b>Obr. 38</b> Měření difuzní vrstvy povlaku Al-Si (plech č. 5) .....	53
<b>Obr. 39</b> Liniová analýza v příčném výbrusu (plech č. 1) .....	55
<b>Obr. 40</b> Změny obsahů vybraných prvků v povlaku Al-Si (viz. Obr. 43).....	55
<b>Obr. 41</b> Bodová EDS analýza subvrstev povlaku v příčném výbrusu a z povrchu povlaku (vpravo) (plech č. 3).....	56
<b>Obr. 42</b> Svařovací odporový lis MIDIsport (vlevo) a geometrie elektrodové čepičky (vpravo).....	58
<b>Obr. 43</b> Svařovací odporový lis PMS 11-4 (vlevo) a geometrie elektrodové čepičky (vpravo) .....	58
<b>Obr. 44</b> Povrch, vytržená část a metalografický výbrus svaru 3b (nahore) a svaru 5b (dole) po sekáčové zkoušce .....	60
<b>Obr. 45</b> 5 svarů v měkkém režimu (vlevo) a 7 svarů v tvrdém režimu (vpravo) (plech č. 4) .....	61
<b>Obr. 46</b> Rozměry vzorku v mm (nahore) a ukázka reálného vzorku z plechu č. 1 (dole).....	61
<b>Obr. 47</b> Rozměry vzorku v mm (nahore) a ukázka reálného vzorku z plechu č. 1 (dole).....	62
<b>Obr. 48</b> Porovnání průměrů svaru M12 (nahore) a M13 (dole) (makro snímek metalografických výbrusů).....	65
<b>Obr. 49</b> Vnitřní vada (staženina) svaru M61 v různém zvětšení (makro snímek, 25x, 100x).....	65
<b>Obr. 50</b> Vytržená část svaru M26 (vlevo) a otvor po vytržené části svaru (vpravo).....	66
<b>Obr. 51</b> Porovnání hloubek vtisku elektrod nevyhovujícího svaru T517 (vlevo) a vyhovujícího svaru T215 (vpravo).....	69
<b>Obr. 52</b> Mikrostruktura svaru T411 s vnitřní vadou (zvětšení 500x).....	69
<b>Obr. 53</b> Možné varianty porušení svarů po zkoušce stříhem ukázané na svaru T5113 (vlevo), T5117 (uprostřed) a T5114 (vpravo) .....	71
<b>Obr. 54</b> Metalografický výbrus svaru T621 s výronkem a velkou hloubkou vtisků po elektrodách ...	74
<b>Obr. 55</b> Možné varianty porušení svarů po zkoušce stříhem ukázané na svaru T2217 (vlevo) a T1212 (vpravo).....	76

## Seznam tabulek

<b>Tab. 1</b> Měrný elektrický odpor různých kovů a slitin při teplotě 20 °C .....	17
<b>Tab. 2</b> Směrné hodnoty svařovacích parametrů pro bodové svařování pozinkovaných ocelových plechů tloušťky 0,4 až 3,0 mm dle ČSN EN ISO 14373.....	22
<b>Tab. 3</b> Srovnání parametrů svařování jednotlivých svařovacích režimů.....	23
<b>Tab. 4</b> Srovnání tloušťek plechů tří generací modelu Škoda Octavia.....	26
<b>Tab. 5</b> Obsah uhlíku a mechanické vlastnosti IF oceli .....	28
<b>Tab. 6</b> Obsah uhlíku a mechanické vlastnosti oceli s označením DS (Drawing Steel) .....	28
<b>Tab. 7</b> Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli IF 180 (HC180Y) .....	29
<b>Tab. 8</b> Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli 180 BH (HC180B) .....	30
<b>Tab. 9</b> Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli HSLA 340 (HC340LA).....	31
<b>Tab. 10</b> Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli Dual Phase 600 (HCT600X).....	32
<b>Tab. 11</b> Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli Complex Phase 800 (HDT780C) .....	33
<b>Tab. 12</b> Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli TRIP 690 (HCT690T).....	34
<b>Tab. 13</b> Chemické složení a mechanické vlastnosti TWIP oceli.....	35
<b>Tab. 14</b> Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli MartINsite® 1200 .....	36
<b>Tab. 15</b> Chemické složení oceli 22MnB5 .....	38
<b>Tab. 16</b> Mechanické vlastnosti oceli 22MnB5 před a po tváření za tepla.....	39
<b>Tab. 17</b> Typické vlastnosti bodového svaru oceli 22MnB5 s povrchovou vrstvou Al-Si .....	43
<b>Tab. 18</b> Hmotnosti a tloušťky povlaku žárového zinku Z140 .....	47
<b>Tab. 19</b> Hmotnosti a tloušťky povlaku AS150.....	48
<b>Tab. 20</b> Hodnoty tloušťek celkové a difuzní vrstvy povlaku AS150 ve vytvrzeném stavu.....	49
<b>Tab. 21</b> Naměřené hodnoty mikrotvrdotí plechů .....	52
<b>Tab. 22</b> Tloušťka difuzní vrstvy plechů s variantním tepelným zpracováním .....	54
<b>Tab. 23</b> Poměry Al/Si v jednotlivých oblastech povlaku daných plechů .....	56
<b>Tab. 24</b> Základní svařovací parametry pro měkký svařovací režim.....	59
<b>Tab. 25</b> Svařovací parametry (konst. $t_s$ a $P_s$ ) + průměr svarů .....	59
<b>Tab. 26</b> Svařovací parametry (konst. $t_s$ a $I_s$ ) + průměr svarů .....	59
<b>Tab. 27</b> Průměrné hodnoty svařovacích parametrů jednotlivých plechů (měkký režim) .....	64
<b>Tab. 28</b> Výsledky zkoušky ultrazvukem (vícekanálová sonda) jednotlivých svarů (měkký režim) ....	64
<b>Tab. 29</b> Ultrazvukové C-scany jednotlivých svarů získané vícekanálovou sondou (měkký režim) ....	65
<b>Tab. 30</b> Hodnoty maximální síly potřebné pro přestřížení svaru a průměr svaru (měkký režim) .....	66
<b>Tab. 31</b> Výsledky zkoušky ultrazvukem (vícekanálová sonda) jednotlivých svarů (tvrdý režim – jeden pulz).....	67
<b>Tab. 32</b> Ultrazvukové C-scany jednotlivých svarů získané vícekanálovou sondou (tvrdý režim – jeden pulz).....	68

<b>Tab. 33</b> Hodnoty maximální síly $F_{ss}$ potřebné pro přestřižení svaru (tvrdý režim – jeden pulz).....	69
<b>Tab. 34</b> Průměry jednotlivých svarů (tvrdý režim – jeden pulz) .....	70
<b>Tab. 35</b> Hodnoty maximální síly $F_{sd}$ potřebné pro přestřižení svaru (tvrdý režim – jeden pulz) .....	72
<b>Tab. 36</b> Výsledky zkoušky ultrazvukem (jednokanálová sonda) jednotlivých svarů (tvrdý režim – dva pulzy).....	73
<b>Tab. 37</b> Hodnoty maximální síly $F_{ss}$ potřebné pro přestřižení svaru (tvrdý režim – dva pulzy).....	75
<b>Tab. 38</b> Průměry jednotlivých svarů (tvrdý režim – dva pulzy).....	76
<b>Tab. 39</b> Hodnoty maximální síly $F_{sd}$ potřebné pro přestřižení svaru (tvrdý režim – dva pulzy) .....	77

## Seznam grafů

<b>Graf. 1</b> Tloušťka difuzní vrstvy v závislosti na tepelném zpracování .....	54
<b>Graf. 2</b> Rozptyl maximálních sil $F_{ss}$ při přetržení svarů v rámci jednotlivých typů plechů (tvrdý režim – jeden pulz).....	70
<b>Graf. 3</b> Rozptyl maximálních sil $F_{sd}$ při přetržení svarů v rámci jednotlivých typů plechů (tvrdý režim – jeden pulz).....	72
<b>Graf. 4</b> Rozptyl maximálních sil $F_{ss}$ při přetržení svarů v rámci jednotlivých typů plechů (tvrdý režim – dva pulzy).....	75
<b>Graf. 5</b> Rozptyl maximálních sil $F_{sd}$ při přetržení svarů v rámci jednotlivých typů plechů (tvrdý režim – dva pulzy).....	77