

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie, fakulta strojní



Rozbor vlivu povrchových úprav na kvalitu spojů při odporovém bodovém svařování

Analysis of the effect of surface treatments on the quality of joints in resistance spot welding

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

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

Bc. Daniel Holeš

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Holeš** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **437100**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Rozbor vlivu povrchových úprav na kvalitu spojů při odporovém bodovém svařování

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of the effect of surface treatments on the quality of joints in resistance spot welding

Pokyny pro vypracování:

- Rozbor využití svařovacích metod v automobilovém průmyslu, jejich zastoupení
- Problematika odporového bodového svařování tenkých ocelových plechů používaných při tvorbě automobilových karosérií
- Přehled výrobců zařízení pro odporové svařování, typy svařovacích zdrojů, jejich charakteristika, typy používaných elektrod
- Materiálový koncept předních automobilových výrobců
- Rozbor a porovnání povrchových úprav využívaných v automobilovém průmyslu, se zaměřením na NIT (New Inorganic Treatment)
- rozbor problematiky vad vznikajících při odporovém svařování, typy, příklady, příčiny vzniku, vliv povrchových úprav na jejich vznik
- závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

- [1] Zhang, H., Senkara, J.: Resistance Welding: Fundamentals and Applications, CRC Press, 2nd. Edition, 2011
- [2] Kolektiv. Materiály a jejich chování při svařování, Ostrava, 2016

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

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

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

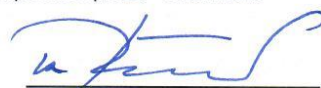
Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**



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



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



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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu citací. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Poděkování

Rád bych chtěl především poděkovat své vedoucí práce doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., která se mi věnovala nad rámec svého volného času a vždy mně byla oporou.

Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mně při práci pomáhali. Především Ing. Vlastimilu Králíkovi, Ph.D. za naskenování čepiček pomocí RedLux a Ing. Vítu Novákovi a Ing. Františkovi Tatíčkoví, Ph.D. za provedení střížné zkoušky.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Obor:	Výrobní a materiálové inženýrství
Název diplomové práce:	Rozbor vlivu povrchových úprav na kvalitu spojů při odporovém bodovém svařování
Autor diplomové práce:	Bc. Daniel Holeš
Vedoucí diplomové práce:	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran 69 Počet obrázků 30 Počet tabulek 12 Počet grafů 10
Klíčová slova:	Odporové bodové svařování, svarová čočka, New Inorganic Treatment, svařovací bodovací čepička, zkušební vzorek, zkušební plech, odlupovací zkouška, životnost svařovacích bodovacích čepiček
Anotace:	Cílem této práce je rozbor vlivu povrchových úprav NIT (New Inorganic Treatment) na kvalitu spojů při odporovém bodovém svařování. Teoretická část práce se zabývá problematikou odporového bodového svařování a používání materiálů v rámci vývoje doby. Experimentální část práce popisuje realizaci zkoušky hodnocení životnosti svařovacích bodovacích čepiček dle normy ČSN EN ISO 8166.

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
Department of Manufacturing Technology

Branch: Production and material engineering

Name of diploma thesis: Analysis of the effect of surface treatments on the quality of joints in resistance spot welding

Author of diploma thesis: Bc. Daniel Holeš

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

Extent of diploma thesis: Number of pages 69
Number of pictures 30
Number of tables 12
Number of graphs 10

Keywords: Resistance spot welding, welding nugget, New Inorganic Treatment, spot welding cap, test sample, test sheet, peel test, durability of spot welding caps

Abstract: The theoretical part of the work deals with the issue of resistance spot welding and the evolution of different materials used in automotive industry. The experimental part of the work describes the evaluation of the life of spot welding electrodes according to the ČSN EN ISO 8166.

Seznam použitých zkratek a symbolů

tab.	tabulka
obr.	obrázek
tzv.	takzvaný
NIT	New Inorganic Treatment
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
TIG	Tungsten Inert Gas
Q	celkové teplo
Jp	intenzita oporového ohřevu
R	odpor
I	proud
t	čas nebo tloušťka plechu
F	přítlačná, svařovací síla
x	vzdálenost od okraje plechu
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu
R _m	mez pevnosti v tahu
d ₁	maximální průměr bodového svaru
d ₂	minimální průměr bodového svaru
daN	dekanewton
N	Newton
MPa	Megapascal
%	procenta
A	ampér
kA	kiloampér
g	gram
um	mikrometr
mm	milimetr
nm	nanometr
km	kilometr
ms	metr za sekundu
Hz	hertz
°C	stupeň Celsia
J	joule
Ω	ohm
D	průměr
ČSN	Česká technická norma
EN	European Standard (Evropská norma)
ISO	Mezinárodní norma ISO
DIN	Deutsche Normen (Německé normy)
EG	Elektrolytické pokovení
Zn	Zinek
CO ₂	Oxid uhličitý
Cu	Měď
Zr	Zirkonium
Cr	Chrom

Al	Hliník
Mg	Magnesium
Si	Síra
Ni	Nikl
Ti	Titan
V	Vanad
Nb	Niob
PVC	polyvinylchlorid
IF	Interstitial Free
IF-HS	Interstitial Free – High Strength
BH	Bake Hardenable
HSLA	High Strength Low Alloy
DP	Dual Phase
CP	Complex Phase
TRIP	Transformation Induced Plasticity
TWIP	Twining Induced Plasticity
MS	Martensitic Steel
ASF	Audi Space Frame (Audi prostorový rám)

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Odporové svařování	12
2.1	Metody odporového svařování	12
2.2	Postupy při odporovém svařování	13
2.3	Druhy elektrod pro bodové svařování	17
2.4	Životnost elektrod.....	17
2.5	Geometrie bodových svarů.....	18
3	Další metody bodového spojování v automobilovém průmyslu.....	19
3.1	Kombinované spojování	19
3.2	Odporové bodové svařování s lepením	20
4	Přehled výrobců odporového svařování.....	22
4.1	TECNA.....	22
4.2	DALEX.....	23
4.3	Matuschek.....	23
4.4	HARMS and WENDE.....	24
4.5	Design Weld s.r.o.	24
4.6	OBARA Corporation.....	24
4.7	Düring.....	25
4.8	ELMA-Tech GMBH.....	25
4.9	Kapkon.....	25
4.10	BOSCH Rexroth	26
4.11	Amada Weld Tech	26
5	Materiálový koncept automobilů	27
5.1	Vývoj materiálu automobilu v čase	27
5.2	Nejčastější oceli využívané v automobilovém průmyslu	30
5.2.1	Nízkopevnostní oceli.....	30

5.2.2	Vysokopevnostní oceli	31
5.2.3	Pokročilé vysokopevnostní oceli.....	32
5.3	Plechý ze slitiny hliníku	34
6	Povrchové úpravy plechů pro karoserie automobilů.....	36
6.1	New Inorganic Treatment (NIT).....	37
7	Vady bodových svarů.....	39
8	Zkoušky životnosti elektrod	42
8.1	Kritéria pro ukončení zkoušky životnosti elektrod.....	42
8.2	Svařovací elektrody	42
8.3	Postup zkoušky životnosti elektrod	43
8.4	Rozměry zkušebních plechů	44
8.5	Volba svařovacích podmínek	46
9	Experimentální část	47
9.1	Svařovací parametry a jeho nastavení	47
9.2	Svařovaný materiál	48
9.3	Svařovací elektrody	48
9.4	Použité metody a zařízení.....	49
9.5	Návrh experimentu	52
9.6	Vyhodnocení zkušebních bodových svarů	52
9.6.1	Střížná zkouška	52
9.6.2	Velikost svarových čoček.....	54
9.6.3	Metalografie	56
9.6.4	Vyhodnocení vlivů velikosti opotřebení na svařovací parametry	58
9.6.5	Drsnost a optická profylometrie	60
10	Závěr.....	65
11	Seznam použité literatury	66

1 Úvod

V dnešní době je technologie odporového bodového svařování stále nejžádanější, hlavně při výrobě automobilových karoserií, kde se v průměru na jeden automobil použije 4000 až 6000 bodových svarů. Materiály používané pro výrobu karoserie se stále zdokonalují a jsou na něj kladeny vysoké nároky vzhledem k mechanickým vlastnostem, ale i vlastnostem svarových spojů (pevnostní charakteristiky, celková kvalita spoje). Kvalita odporových bodových spojů je ovlivňována také povrchovými úpravami. Neustále jsou vyvíjeny nové vrstvy a povlaky a zdokonalovány stávající povrchové úpravy pro zlepšování kluzných vlastností při hlubokém tažení, případně pro ochranu plechu před oxidací při tváření za tepla. Na tyto změny musí reagovat následný svařovací proces a musí se jim přizpůsobovat, při zachování co nejvyšší kvality spoje kvůli bezpečnosti pasažéra. Proto je třeba mapovat vliv nových povrchových úprav na svařovací proces, kvalitu spoje a opotřebení elektrod. Předložená diplomová práce se z výše uvedených důvodů věnuje vlivu vrstvy NIT (New Inorganic Treatment) na svařovací parametry, životnost elektrod a kvalitu spoje. NIT je nanášena na plech z materiálu HX180BD ZM100 s povrchovou úpravou ZnMg (EG). V rámci práce jsou porovnávány 2 plechy, kde jeden plech je s povrchovou úpravou NIT a druhý plech bez NIT.

2 Odporové svařování

Definice

„Odporové svařování je způsob, při kterém se využívá odporové (Jouleovo) teplo, vznikající průchodem svařovacího proudu spojovanými materiály, které tvoří část svařovacího okruhu. Po ohřátí se části stlačí a tím se svaří. Metody odporového svařování patří do skupiny tlakového svařování, protože pro vytvoření svarového spoje musí být použita síla pro vytvoření plastické deformace a svaření součástí.“ [1]

2.1 Metody odporového svařování

Vzorky byly svařeny podle konstrukčního uspořádání elektrod a také podle pracovního postupu odporového svařování.

- **Bodové svařování**

Bodové svařování je nejčastější svařovací metodou odporového svařování, které se nejvíce aplikuje v automobilovém průmyslu. Běžně se svařují tenké plechy o tloušťce cca 0,4 až 4 mm, včetně plechů s povrchovou úpravou. Osobní automobil obsahuje přibližně 5000 bodových svarů. Příklad uspořádání elektrod při bodovém svařování je vidět na obr.1a. [1] [2]

Bodovým svařováním je často myšleno také tzv. mikro-odporové svařování, které se využívá především pro elektromechanické spojování nejrůznějších součástek, a to nejen v automobilovém průmyslu, ale také v nejrůznějších odvětvích elektrotechniky (náhrada pájení) nebo jemné mechaniky. [3]

- **Švové svařování**

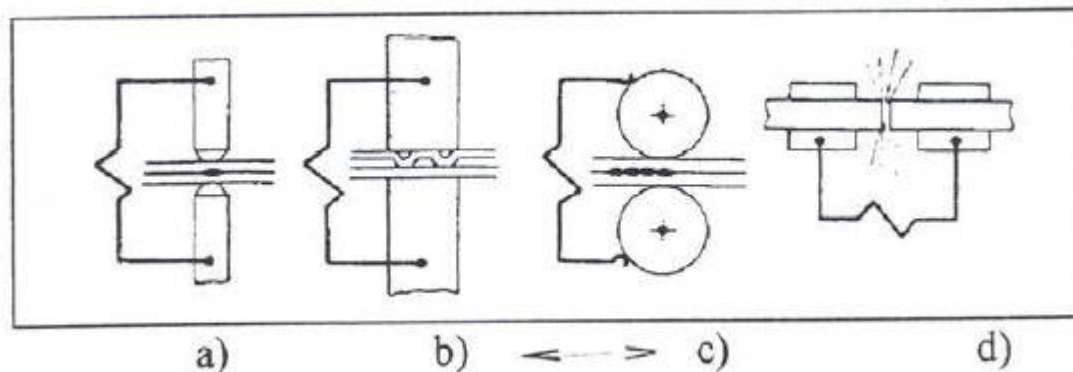
Oproti bodovému svařování se v případě švového svařování používá ještě jeden parametr a tím je modulace proudu. Jedná se o parametr, který určuje dobu sepnutí (a vypnutí) svařovacího proudu, při odvalování vodivého kotouče svařovaných dílech. Tato metoda se většinou používá na výrobu těsnících spojů. Viz obr.1c. [1] [2]

▪ Výstupkové svařování

Výstupkové svařování je prováděno na svařovacím lisu a to způsobem, že svary vznikají v místech přirozených nebo lisováním vytvořených výstupků. Svařovací proud je koncentrován do míst dotyku svařovaných plechů (tedy výstupků), kde se odporovým teplem materiál zahřívá, měkne a tím se bortí pod tlakem přitlačné síly elektrod. Tavná čochka nadále roste z důvodu, že místem nadále prochází proud, který vytváří další odporové teplo, tedy pokračuje ohřev materiálu v místě čochky. Viz obr. 1b. [1] [2]

▪ Stykové svařování

Svar vzniká po celé styčné ploše dílu. Ke svařování dojde odtavením nebo odtavením s pěchováním. Při svařování pěchováním se jako první materiál nahřeje svařovacím proudem a stlačí se k sobě. Při odtavení se nechají oba díly upnout bez vzájemného kontaktu. Díly se k sobě přiblíží a okamžitě zase odtrhnou. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud se obě dvě čelní plochy nepokryjí taveninou a poté se obě části přitlačí k sobě natrvalo. Viz obr. 1d. [1] [2]

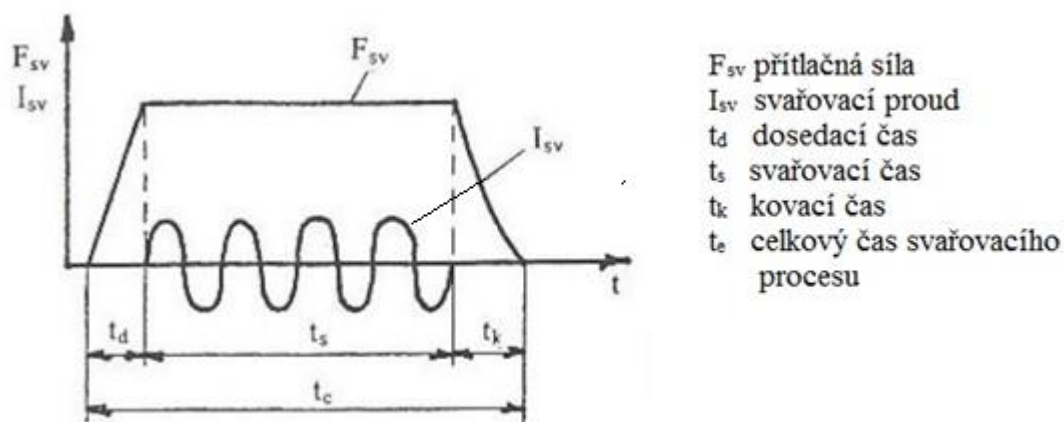


Obr. 1 Metody odporového svařování [2]

2.2 Postupy při odporovém svařování

Odporové svařování je definováno souhrnem nerovnovážných dějů, díky kterým vzniká svarový spoj kombinovaným působením více mechanismů. Za hlavní hnací síly se považují teplotní, deformační i koncentrační gradienty. Okolní atmosféra v podstatě nemá žádný vliv na kvalitu svaru, jelikož přitlačné síly působí během celého procesu svařování. Svařovací síla F_{sv} přiblíží povrchy svařovaných částí a zabezpečí průchod svařovacího proudu

neboli udrží natavený objem základního materiálu v místě spoje. Proud I_{sv} který prochází elektrodami obvykle působí v rozmezí t_s 0,04 – 2 s. [1] [2]



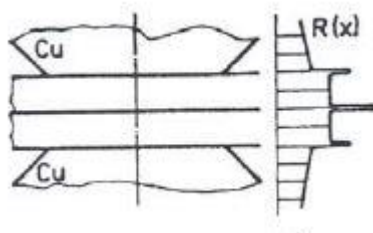
Obr. 2 Průběh svařovací síly a proudu [1]

Konečné množství tepla, které je vyvinuté průchodem svařovacího proudu svařovanými materiály popisuje Joule-Lenzův zákon:

$$Q = \int_0^{t_s} R(t) i^2(t) dt \quad [J] \quad (1)$$

Nejvyšší teplota se nachází v místě dotyku svařovaných částí. Výsledný odpor svařovaných materiálů je dán součtem kontaktních odporů mezi materiálem a elektrodami a měrných vnitřních odporů materiálů a elektrod.

Na začátku bodového svařovacího procesu dochází k velkému vývinu tepla hlavně v místě styku svařovaných plechů. Vzniklé teplo se bezprostředně šíří do přilehlých objemů základního materiálu a zvýšení teploty má za následek nárůst měrného elektrického odporu. Větší nárůst odporu je výrazný hlavně u měkkých ocelí. [1]



Obr. 3 Rozložení elektrického odporu [1]

Svary, které byly provedeny dříve, musí být v dostatečné vzdálenosti od prováděného svaru, protože by mohlo nastat, že se svařovací proud může odklonit (odbočování svařovacího proudu nebo také shuntování). To může mít za následek, snížení proudové hustoty, vzniklý svar tedy nemusí být dostatečně kvalitní. Proto se například u hliníku volí větší mezery mezi svary z důvodu, že hliník je vysoce vodivý.

Aby nedocházelo k shuntování (výše uvedené odbočování svařovacího proudu), je nutné, rozmístit body v dostatečném rozestupu $L = 16 \cdot t$, kde t je tloušťka plechu. Taky je třeba dbát, aby svar nebyl moc blízko okraje, proto se počítá vzdálenost $b = 1,25 \cdot d$, kde d je počáteční průměr svaru. Při svařování plechů do tloušťky 1,5mm má být vzdálenost mezi svary, které se měří od kraje svarů $3 \cdot d$.

Ostatní ztráty, které mohou vzniknout, jsou kvůli vzniku sekundárního svařovacího obvodu. Velikost těchto ztrát závisí na vzdálenosti ramen a na vyložení ramen (jaká bude vzdálenost těla svařovacího stroje a svářečky od bodovacích elektrod). [1] [2]

Odporové svařování můžeme rozdělit do dvou svařovacích režimů:

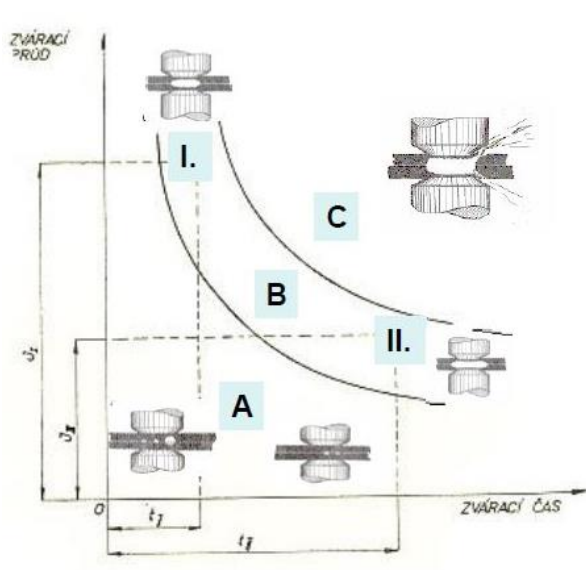
- **Měkký svařovací režim**

Měkký svařovací režim je charakteristický nízkým svařovacím proudem (proudová hustota do 200 A/mm²) a dlouhým svařovacím časem t_s – 0,5 s až 1,5 s a nižší svařovací silou do 1000 N. U měkkého svařovacího režimu dochází ke větším ztrátám tepla do okolí a většímu tepelnému namáhání elektrod, což snižuje jejich životnost. Zrno má hrubozrnnou strukturu, což vede k nižší pevnosti spoje. Proto je tento režim vhodný pro ocel s vyšším obsahem uhlíku, jelikož je tady nízké riziko zakalení. [1] [4]

- **Tvrký svařovací režim**

Tento režim pracuje za vyšších tlaků, které zajišťují snížení přechodového odporu. Díky zkrácení svařovacího času t_s se docílí vyšší produktivity, efektivity a také snížení tepelných ztrát. Ve srovnání s měkkým režimem je tepelně ovlivněná oblast menší. Jelikož je nastavený přítlak elektrod vyšší, dochází ke snížení přechodového odporu, díky tomu se elektrody méně opotřebovávají. Hustota v místě svaru je 200–500 A/mm² a svařovací síla cca 2000 N. Tento svařovací režim, ale pro svou procesní náročnost, vyžaduje vyšší investiční náklady, protože pro zajištění přítlačné síly je třeba hydraulický nebo pneumatický systém. Přesto je tento režim

využíván častěji oproti měkkému režimu. Nejčastěji se používá v automobilovém průmyslu. [1]
[4]



Obr. 4 Měkký a tvrdý svařovací režim [1]

- I. – tvrdý svařovací režim
- II. – měkký svařovací režim

A – pásmo s nedostatečným množstvím energie potřebné pro vznik svaru (oblast difuzních spojů)

B – oblast kombinace parametrů, při kterých dosáhneme dobrých svařových spojů

C – oblast kombinace parametrů, kdy dochází k přetížení tepelnou energií – roztavený materiál vystřikuje

▪ **Vliv čistoty a povrchu elektrod**

Důležité je udržovat povrch elektrod a svařovaných materiálů čistý z důvodu, aby nenastalo popálení povrchu. Povrch svařovaného plechu proto musí být bez oleje, okují, rzi, barev a jiných nečistot. Také elektrody musí být čisté, bez jakýchkoliv otřepů, vrypů a vrubů. Povrch elektrod můžeme upravovat pilníkem, strojním obráběním, nebo speciální frézou. [4]

▪ **Intenzita odporového ohřevu**

Měkký a tvrdý režim svařování už byl definovaný, ale také je možné popsat proces svařování pomocí intenzity odporového ohřevu J_p , která se definuje jako podíl svařovacího proudu a požadované velikosti svarové čochky (2). Bodové svařování má tu výhodu, že požadovaná velikost svarové čochky jde nahradit průměrem elektrody.

$$J_p = \frac{I}{D} \quad [J] \quad (2)$$

Kde I znamená svařovací proud [A] a D je průměr dosedací plochy svařovací elektrody [mm²]. J_p je intenzita odporového ohřevu [J]. [5]

2.3 Druhy elektrod pro bodové svařování

Elektrody lze rozdělit do dvou skupin. První skupina elektrod je vyráběna z mědi a jejích slitin. Výroba je prováděna tvářením za tepla, za studena, nebo jsou dodávány v litém stavu. Mezi druhou skupinu elektrod můžeme zařadit ty, které jsou vyrobené práškovou metalurgií ze žáruvzdorných kovů jako je wolfram a molybden. Nejčastěji používané elektrody jsou z první skupiny. [2]

2.4 Životnost elektrod

Povrchový odpor materiálu je ovlivněn uvolňováním tepla do elektrody. Díky vysoké elektrické vodivosti zinku mají pozinkované plechy nízký povrchový odpor. Zinek se na elektrodu dostane dvojnásobným způsobem.

- Se zvyšující se teplotou se zvyšuje také rychlost difúze Zn do Cu (elektrody), což vede k tomu, že se na kontaktní ploše elektrody tvoří vrstva legovaná zinkem (tedy mosaz). To má za následek změknutí této plochy a tím dochází k její deformaci (zvětšuje se průměr čochky, ale tím se snižuje proudová hustota – stejný proud prochází přes větší plochu = méně tepla).
- Nalegovaná elektroda výše popsaným způsobem má vyšší přechodový odpor, tedy se v tomto místě uvolňuje více tepla a dochází k natavení povlaku i kontaktní plochy elektrody. Vznikají mikro spoje a při oddálení elektrody dochází k vytrhávání materiálu z elektrody v místě těchto spojů. Pro samotný spoj pak zbyde méně tepla a vznikají svary s nedostatečným průměrem čochky.

Celkově to přispívá k snižování životnosti elektrody, jelikož povrch elektrody je neustále namáhán opakovaným ohříváním a chladnutím. Navíc mosaz po vtisku na povrch zanechává zlatě zbarvené skvrny a to je důležité z hlediska designu a pohledových ploch a tedy i z hlediska následných povrchových úprav automobilu. Někteří autoři se shodují v odhadech životnosti elektrod kolem 8 000 až 10 000 bodů, ale při svařování pozinkovaných plechů 600 až 3 500 bodů. [6] [7]

2.5 Geometrie bodových svarů

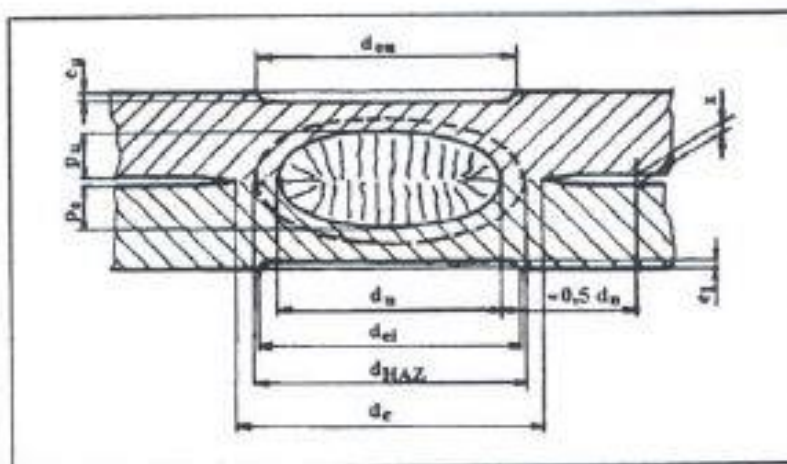
Za nejdůležitější parametry kvality bodového svaru se dle normy ČSN EN ISO 17677-1 považuje velikost svarové čočky, která má přímý vliv na pevnost spoje. Doporučený průměr čočky se určí z tloušťky tenčího plechu a požadavků na bezpečnost. Kde t vyjadřuje tloušťku tenčího plechu.

$\varnothing d_n \approx 4\sqrt{t}$ pro běžné svarové spoje

$\varnothing d_n \approx 5\sqrt{t}$ pro vysoce bezpečnostní svary

$\varnothing d_n \approx 3\sqrt{t}$ pro méně namáhané spoje [6]

Následujícími geometrickými charakteristikami se dá popsat svarová čočka.



Obr. 5 Geometrie bodového svaru [2]

Bodový svar ocelového plechu a jeho geometrie

d_n – rozměr svarové čočky měřený v rovině rozhraní obou svařovaných dílů

d_c – rozměr svaru včetně oblasti, kde ve styčné rovině obou dílů dochází k jejich spojení v pevné fázi

d_{eu} – rozměr vtisku horní elektrody

d_{el} – rozměr vtisku dolní elektrody

d_{HAZ} – rozměr vysokoteplotně ovlivněné zóny

p_u – hloubka nastavení horního plechu

p_e – hloubka nastavení dolního plechu

x – odtlačení plechu (měří se ve vzdálenosti $0,5 \cdot d_n$ od kraje svarové čočky)

e_u – hloubka vtisku horní elektrody

e_e – hloubka vtisku dolní elektrody

3 Další metody bodového spojování v automobilovém průmyslu

3.1 Kombinované spojování

V automobilovém průmyslu se čím dál častěji setkáváme s takzvanými kombinovanými spoji. Jsou velice známé a rozšířené nejen v automobilovém průmyslu, ale také v leteckém a kolejovém průmyslu. Nejpopulárnější jsou v kombinaci dvou různých technologií, a to lepení a jiného mechanického spojování. Hlavním účelem je snížení hmotnosti finálního produktu. Tím splňuje požadavky automobilového průmyslu na snižování spotřeby a emisních limitů. V konečném důsledku se tato technologie odráží v nákladech na výrobu. Pravděpodobně i proto se v moderních konstrukcích jedná o jednu z nejpoužívanějších metod. Existuje velké množství benefitů, pro které je kombinace lepení a jiného spojování využívána. Následující odstavec shrnuje ty nejzákladnější.

Na kvalitu spojů jsou obecně kladeny vysoké nároky, a to nejen v automobilovém průmyslu. Pevnost spoje je za použití lepení nízká. To je v kombinaci dvou technologií u kombinovaného spojování kompenzováno sloučením pevnosti mechanického spoje s pevností spoje lepeného. Pevnost mechanického (svarového) spoje má navíc jednu unikátní vlastnost, je pevný téměř okamžitě. To má výrazný vliv na celý proces vytvrzování, který je nezbytný k dosažení plné pevnosti. Nespornou výhodou je také chování kombinovaného spoje při tepelném působení, které nijak neovlivňuje jeho tvar. Stálost tvaru je tak další výhodou při aplikaci této technologie. Další, konstruktéry často kvitované, vlastnosti kombinovaných spojů jsou korozní odolnost, absence destrukce spojů v odlupu a vyloučení náchylnosti k plastickému tečení. V neposlední řadě je často zmiňována (u kombinace mechanických a svarových spojů) možnost dodatečného zpevnění viskózním lepidlem.

Mezi kombinované spoje se dá zařadit velké množství kombinací metod jako jsou nýtování s lepením, šroubování s lepením, odporové bodové svařování s lepením, laserové a obloukové svařování s lepením a další různé kombinace mechanického spoje s lepením. Vzhledem k zaměření diplomové práce na bodové odporové spoje, bude více pozornosti v následujícím textu věnováno kombinaci lepení s výše zmíněným bodovým svařováním. [8]

3.2 Odporové bodové svařování s lepením

Kromě klasického odporového svařování se používají i kombinované spoje, jako například bodové odporové svařování s lepením. Odporové bodové svařování v kombinaci s lepením má hlavní vliv zejména na rozměr svarové čočky. Dále má na kvalitu takto kombinovaného spoje vliv množství energie dodané do svaru nebo množství a typ přidaného lepidla. Nakonec je třeba také zmínit, že teplo při svařování ovlivňuje typ lepidla. V Tab. 1 je srovnání u jednotlivých značek automobilů, z hlediska množství aplikovaného lepidla u jednotlivých značek v roce 2007 až 2009. Je zde uvedeno porovnání počtu metrů lepidla s počtem kusů bodových svarů. Z dané tabulky jde posoudit, že dražší automobilové značky používají lepených spojů ve 3 krát větší míře než automobilové značky levnější kategorie. Zejména je to patrné u automobilky Opel, která je ze zmíněných značek nejlevnější. Z tabulky je vidět, že na model Insignia z roku 2008 bylo použito skoro o 2000 svarů více než u ostatních značek a lepidlo aplikuje ze všech nejméně. [8]

Tab. 1 Srovnání počtu odporových bodových svarů v kombinaci s lepením u různých značek automobilů [8]

Typ automobilu	Nanesené lepidlo [m]	Počet svarů v kusech
BMW 7 (2009)	90	-
Audi A5 (2008)	89,7	4 975
Opel Insignia (2008)	21,1	6 321
Volvo V70 (2008)	24,9	4 170
Volvo XC60 (2008)	25,4	4 337
Mercedes C-Class (2007)	62,4	5 394

Každá svařovací aplikace v automobilovém průmyslu musí projít minimálně tzv. validačním procesem, což obnáší kompletní proces ověření a validace navrženého svarového spoje. Je to nezávislé na typu technologie (např. laser-hybrid, odporové bodové svařování). Pro kvalifikaci postupu svařování WPQR – Welding procedure qualification record se používají normy řady ČSN EN ISO 15 614. Výsledkem je zmíněný protokol WPQR a WPS – Welding

procedure specification, což je jinak řečeno postup svařování na konkrétní svařovací aplikaci a metodu s validovanými parametry, které se již pak používají při samotné výrobě a jsou permanentně nastaveny na svařovacím zdroji/laseru nebo zdroji svařovací stanice. [9]

4 Přehled výrobců odporového svařování

Tento přehled je zaměřen především na výrobce stacionárních lisů, ručních svařovacích kleští a řídicích jednotek. Samostatná výroba má hluboké kořeny a velkou tradici zejména v Německu, ale najdou se i další výrobci, kteří pronikli na evropský trh.

4.1 TECNA

TECNA je italská firma, která se od samého vzniku zaměřuje výhradně na odporové svařování. Specializují se na oblasti navrhování a výroby nejširší škály bodových a výstupkových svářeček používaných v mnoha průmyslových odvětvích jako jsou například svařovací linky vozidel. Dále se firma soustředí hlavně na automatizaci a robotiku. Přesto se ale věnuje výrobě veškerých komponentů a strojů spadajících do oblasti odporového svařování. Také nabízí jak průmyslové odporové svařovací systémy, tak ruční svařovací kleště, řídicí jednotky a další komponenty spojené s odporovým svařováním.

V současné době jsou jejich nejnovějším patentem svařovací pneumatické kleště. Tyto kleště se speciálně používají na opravu karoserií. Po neustále vyšších nárocích zákazníků vyvinuli nový upínací systém, který je schopen poskytnout větší pohodlí a snadnější používání stroje. Nový systém *push pull* se skládá z patentovaného mechanismu, který přináší několik zásadních výhod. Zaručuje přesnější a plynulejší upnutí (tzn. není nutné požívat různé imbusové klíče), obsahuje izolovaný knoflík, který chrání před zkratem. Tento systém je kompatibilní se všemi typy svařovacích kleští TECNA. [10]



Obr. 6 Pneumatická svařovací kleště [10]

4.2 DALEX

Firma DALEX je původem z Německa a na trhu se pohybuje již přes 100 let. Firma nepůsobí jen v automobilovém odvětví, ale také v elektrotechnice, letectví a kosmonautice, domácí technice a dalších oblastech.

Tato firma vyrábí širokou škálu vysoce výkonných bodových, výstupkových a válečkových svařovacích strojů. Dále se věnují výrobě řemeslných strojů, ručních svařovacích kleští, transformátorům řízení a v neposlední řadě robotických svařovacích kleští. Jsou schopni kromě odporového svařování nabídnout svařovací řešení v oblasti laserového svařování a svařování MAG. Zaměřují se také na průmysl 4.0 a navrhují celé automatizované výrobní linky dle požadavků zákazníka. [11]



Obr. 7 Průmyslové stroje firmy DALEX [11]

4.3 Matuschek

Tato firma původně vznikla v Německu roku 1985. V současné době má díky své expanzi pobočky v Číně a USA. Výroba této firmy se zaměřuje hlavně na systémové komponenty pro odporové svařování jako jsou napájecí jednotky, transformátory, měřící přístroje, spínací skříňky, software, servopohony a také svařovací hlavy. Tyto komponenty se používají zejména v elektronickém průmyslu, lékařské technice, automobilovém průmyslu a další. Výrobou svařovacích průmyslových strojů či svařovacích kleští se firma nezabývá. Velký důraz však klade na systémové komponenty. Zejména pak na jejich adaptabilitu a spolehlivost ve vytváření spojení vysokopevnostních a ultra pevných spojů z oceli a hliníku. [12]

4.4 HARMS and WENDE

Firma HW působí na trhu již přes 70 let a její sídlo se nachází v Německu. Jedná se opět o firmu vyrábějící systémové komponenty pro odporové svařování, které dodává do automobilového průmyslu a dalších průmyslových odvětví. Soustředí se na ovládací prvky, systémy a střídače v kombinaci s funkcemi zabezpečovací kvality. Ty využívají ke stabilizaci a sledování svařovacího procesu. V roce 1998 získali inovační cenu za vývoj vysokorychlostního svařování třením. Výrobou svařovacích průmyslových strojů se nezabývají. [13]

4.5 Design Weld s.r.o.

Je Česká firma, která vznikla v roce 2001. Jejím hlavním zaměřením je projektování a vyrábění svařovací techniky a příslušenství pro automobilový průmysl.

Mezi její hlavní produkty se řadí odporové svařovací lisy 50 Hz a 1000 Hz, včetně svařovacích lisů pro odporové svařování vysoko-pevnostních materiálů (USIBOR), jednoúčelová svařovací zařízení, vysokokapacitní svařovací zařízení s otočným stolem, svařovací zařízení dvou-poziční a také automatické podavače matic, šroubků a destiček. Nabízí také množství náhradních dílů k odporovému svařování a svařovací přípravky pro obloukové svařování, a to jak ruční, tak robotické. Věnují se svařovacím komponentům, kontrolním stanicím a dalším. [14]

4.6 OBARA Corporation

Japonská společnost OBARA se specializuje na celkový svařovací systém zařízení. Na trhu působí již od roku 1955 a postupně expanduje do celého světa. Společnost se rozvíjela zejména v automobilovém průmyslu.

Firma se zaměřuje na výrobu zařízení typu odporového svařování, laserového svařování a obloukového svařování. U problematiky odporového svařování se zaměřuje na různé druhy svařovacích kleští (ruční, robotické), regulátory odporového svařování (také označované jako časovače). Dále se věnuje výrobě transformátorů, elektrod, kabelů, oboustranných elektrod, měničů nástrojů pro kleště, manipulačních jednotek a stacionárních lisů. [15]

4.7 Düring

Düring je německá firma, která na trhu vystupuje již přes 30 let a působí v Brazílii, Mexiku, Číně a v dalších zemích. Své výrobky dodávají převážně do automobilového průmyslu pro známé automobilky jako BMW, Audi, Mercedes-Benz a další.

Necelých 40 let vyvíjí, vyrábí a montují ruční svařovací kleště, robotické svařovací kleště a speciální svařovací zařízení. Poskytují služby v oblasti návrhu, konstrukce, výroby a servisu zařízení. Nabízí různé druhy ručních svařovacích kleští, robotických svařovacích kleští, laserových svařovacích kleští a zkušebních stolic. [16]

4.8 ELMA-Tech GMBH

Tato německá firma vznikla původně po převzetí obchodního zaměření na obloukové svařování od společnosti DALEX v roce 2002. Zpočátku se věnovala pouze obloukovému svařování, poté ve spolupráci s automobilkou Opel v roce 2003 vyvinuli svůj první bodový svařovací systém. Tím pokračovali i v odporovém svařování.

Firma nabízí hliníkové bodové svařovací systémy pro průmyslové použití, systémové bodové svařování s ručně vedenými svařovacími kleštěmi ELMA-Tech, systémy bodového svařování pro svařovací kleště robotů, ručně vedené svařovací kleště a konvenční obloukové technologie. [17]

4.9 Kapkon

Společnost byla založena roku 1980 v Německu. V současné době firma Kapkon úzce spolupracuje s firmou HARMS and WENDE, dokonce si spolu otevřeli testovací centrum spojovací technologie.

Firma vyrábí svařovací stroje KE PrimKoM (bez nebo s vlastním systémem MCS). Dále se věnuje výrobě svařovacích zdrojů pro integraci do stávajících konceptů strojů a svařovacích zařízení, které se dají použít i na strojích od jiných výrobců. Vyrábí také svařovací nástroje a elektrody. [18]

4.10 BOSCH Rexroth

Společnost působí na trhu přes 200 let a nabízí mimo jiné i svařovací technologie. Jejich výroba se zaměřuje na svařovací regulátory a transformátory, u kterých vyzdvihují rychlé uvedení do provozu, optimalizované programování, ovládaní a monitorování, jednoduché ovládání a vysokou flexibilitu. [19]

4.11 Amada Weld Tech

Společnost AMADA WELD TECH je na trhu již 112 let. Za tu dobu se vypracovala z výrobce klasických bodových svářeček na předního výrobce svářeček především pro mikro-odporové svařování. Silnou stránkou této společnosti jsou technologicky nejvyspělejší zařízení a široké portfolio svářeček. Firma vznikla spojením největších mezikontinentálních konkurentů a dnes nabízí své vlastní značky svářeček vyrobené v Německu, USA, Japonsku, či Anglii a jejich týmy mezi sebou úzce spolupracují. Další silnou stránkou je, že firma kromě mikro-odporového svařování nabízí také laserové svařování, mikro-TIG svařování a jiné, což dává zákazníkům vždy objektivní srovnání při výběru nejvhodnější technologie. Firma AMADA WELD TECH je největším výrobcem elektrod pro mikro-odporové svařování. [3]

5 Materiálový koncept automobilů

V automobilovém průmyslu je mnohdy kladeno příliš požadavků na karoserie, a ne vždy jde vyhovět všem. Proto je třeba se zaměřit hlavně na to, aby vnitřní díly karosérie zajistily požadovanou pevnost vnitřního skeletu vozu a měly vysokou korozní odolnost i únavové namáhání. Vnější díly automobilu jsou charakteristické pro náročné designové tvary, to znamená vysokou náročnost na dostatečnou plasticitu. Další důležitá vlastnost je hmotnost, která patří mezi hlavní aspekty ovlivnění spotřeby paliva.

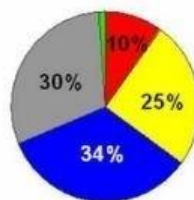
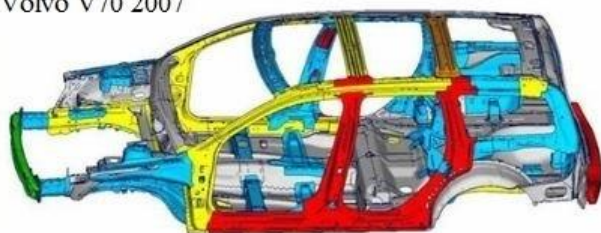
Karoserie se vyrábí z různých variací ocelových plechů, které mají vždy speciální vlastnosti, aby splňovaly požadovaný cíl. Při robotizovaném spojování dílů je jednou z nejpoužívanějších technologií právě bodové svařování. Pro představu, kolik je potřeba bodových svarů u jedné karosérie, byla uvedena Tab. 1 v předchozí kapitole. [20]

5.1 Vývoj materiálu automobilu v čase

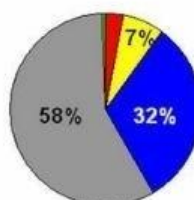
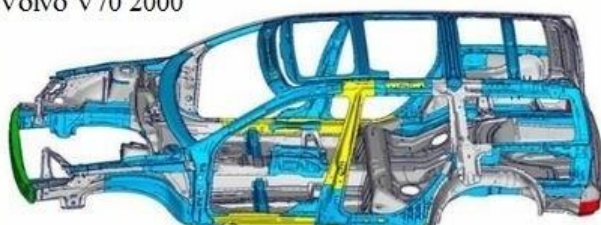
Pro porovnání, jak se neustále vyvíjí a kombinují materiály, aby se dosáhlo vyšší kvality a snížila hmotnost karoserie, je znázorněn na obrázku vývoj jednotlivých modelů od automobilky Volvo. Jako příklad je zvolen model V70, který automobilka vyráběla od roku 1997 až do roku 2016. V roce 2010 již vyvinula nástupní model V60, který posléze zastoupil model V70 na trhu. V dnešní době je tedy možné pořídit pouze novou verzi V60, nebo zvětšenou verzi V90. [21]

Na Obr. 8 jde vidět model Volva V70 druhé a třetí generace. První generace modelu V70 vyšla v roce 1997, ale hned v roce 2000 ji nahradila druhá generace. Z toho důvodu nevznikla tak výrazná změna karoserie. Třetí generace modelu V70 vyšla po 7 letech na trh, tedy v roce 2007. Za tuto dobu jde vidět celá řada změn, nejen ve tvaru karoserie. Velká změna nastala hlavně v použitém materiálu, kde objem použité nízkopevnostní oceli klesl skoro na polovinu. Nahradila jí vysokopevnostní ocel a ultra vysokopevnostní ocel. Tyto vysokopevnostní oceli měli nárůst více jak o dvojnásobek. Díky tomu lze posoudit, že automobilka Volvo stále klade větší důraz na bezpečnost uživatelů, jelikož dopravní rychlost se neustále zvyšuje. [21]

Volvo V70 2007



Volvo V70 2000



- Ultravysokopevnostní oceli
- Extravysokopevnostní oceli
- Oceli velmi vysokých pevností
- Vysokopevnostní oceli
- Měkké oceli
- Hliník

Obr. 8 Materiálový koncept V70 značky Volvo (2. a 3. generace)

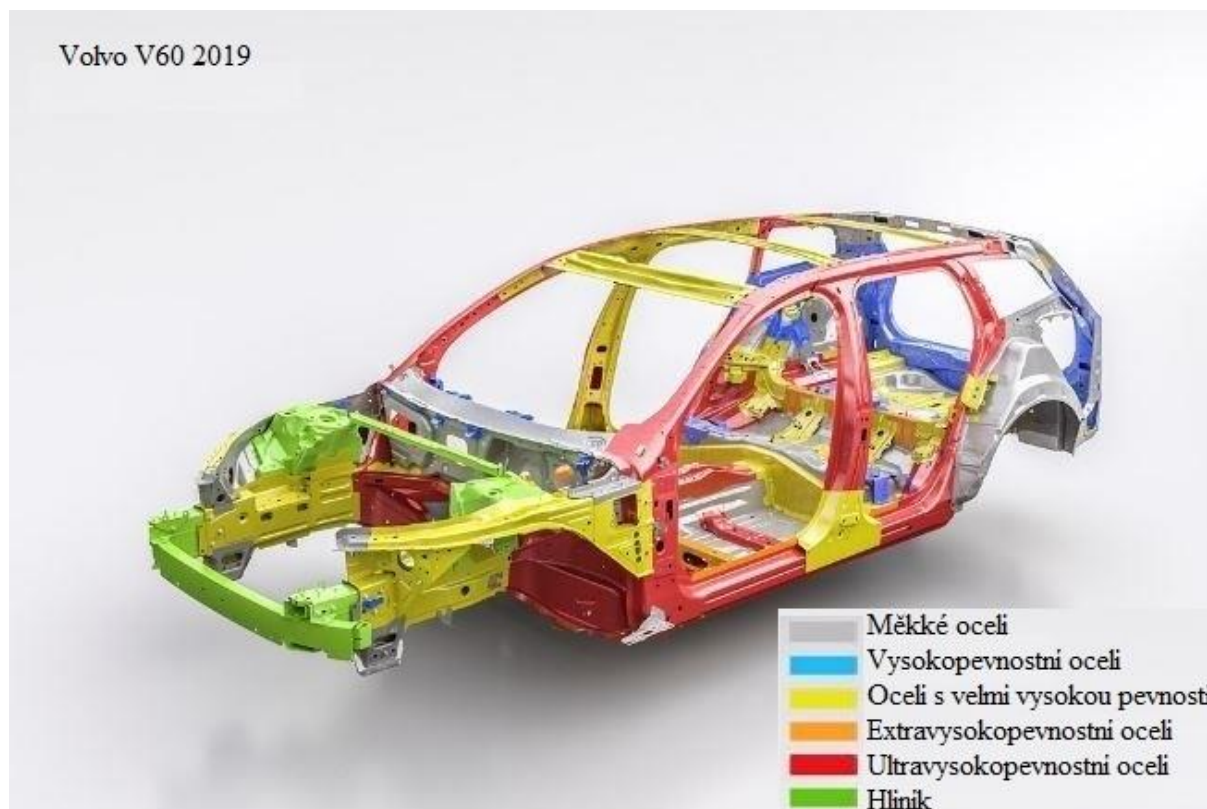
U modelu V60 první generace je vidět, že sloupky a boční rám je výhradně z ultravysokopevnostní oceli a střecha je také vyrobena pouze z oceli s velmi vysokou pevností. Střešní sloupky jsou výrazně tenčí oproti předešlým modelům V70. To je z toho důvodu, že už se tolik nesvařují, protože docházelo k častému propálení materiálu, tím byl materiál více náchylný na korozi. Proto se přešlo hlavně na lepení, díky kterému bylo dosaženo vyšší pevnosti a úspory objemu materiálu. [21]

Volvo V60 2010



- Ultravysokopevnostní oceli
- Extravysokopevnostní oceli
- Oceli velmi vysokých pevností
- Vysokopevnostní oceli
- Měkké oceli
- Hliník
- Hořčík

Obr. 9 Materiálový koncept Volva V60 2010



Obr. 10 Materiálový koncept Volvo V60 2019

U nejnovějšího modelu V60 lze vidět, že materiál je více nakombinován a celkově se karoserie zdá méně robustní a na první pohled lehčí. Přesto je celá konstrukce pevnější než u předešlé generace. Přední část automobilu je tvořena z větší části ze slitiny hliníku a přední podběhy kola jsou tvořeny z oceli s velmi vysokou pevností. Nově příčky nárazníku se na konstrukci nesvařují, ale jen připevní čtyřmi šrouby. Proto, že po nárazu a následné deformaci je možné díl vyměnit velice rychle a efektivně, aniž by bylo nutné konstrukci složitě brousit a poté svařovat.

Ze zkušenosti personálu opravárenské firmy s výhradním zastoupením značky Volvo v České republice vyplývá, že nehodovost v poslední době klesá, proto se provádí častěji spíše drobné úpravy vozu. V případě větších nehod, při nichž dochází k velkým deformacím karoserie, se vozy již neopravují, protože často hodnota vozu převýší hodnotu opravy a tím pádem pojišťovna označí tuto havárii za totální a raději vyplatí cenu vozu zákazníkovi. Proto se například střechy z větší části lepí a nesvařují, protože pokud se stane nehoda s přetočením vozu na střechu, tak je docela běžné, že oprava automobilu mnohonásobně převýší cenu vozu.

Díky tomu automobilka Volvo dbá hlavně na bezpečnost posádky než na výsledný stav vozu po nehodě. Nejen díky tomu Volvo patří k nejbezpečnějším automobilům na trhu. [21]

5.2 Nejčastější oceli využívané v automobilovém průmyslu

Dle metalurgie rozdělujeme ocelové plechy do různých skupin. Tyto skupiny jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Rozdělení ocelí dle metalurgie [20]

Skupina	Název	Druhy
LSS	Nízkopevnostní oceli	IF a Mild oceli
HSS	Vysokopevnostní oceli	IF-HS, BH, CMn, HSLA oceli
AHSS	Pokročilé vysokopevnostní oceli	DP, CP, TRIP, TWIP, MS oceli
PHS (HF)	Vysokopevnostní, za tepla tvářené oceli	Manganoborové oceli

5.2.1 Nízkopevnostní oceli

▪ IF (Interstitial Free) oceli

Dominantou těchto ocelí je extrémně nízký obsah uhlíku, který zajišťuje vysoký stupeň tažnosti. Jelikož v ocelích nejsou skoro žádné intersticiální atomy, které by ocel zpevnily, mají tak vysokou tažnost, díky které jsou vhodné na tvarově složitější hlubokotažné díly karoserií. Oceli IF mají feritickou matici a jsou mikrolegovány Nb nebo Ti. Tyto dva prvky disponují funkcí karbonitridačních stabilizátorů. To znamená, že sníží obsah C a N pod velmi nízké hodnoty, a tím docílíme vynikajících plastických vlastností. IF oceli můžeme svařovat tavným i tlakovým svařováním. [22] [20]

▪ **Mild oceli**

Obvyklé nízkouhlíkové oceli s feritickou strukturou mají nižší pevnost, a proto je stabilizujeme mikrolegujícími prvky Nb nebo Ti. Jako hlavní zástupce těchto ocelí jsou Commercial Steel (komerční ocel), Drawing Steel (tažná ocel) a další. Tyto oceli můžeme bez problému svařit všemi metodami svařování. [20]

5.2.2 Vysokopevnostní oceli

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

V podstatě se jedná o výše uvedené oceli IF, ale navíc se do nich ještě přidává Mn, Si a P, protože ocel zpevní. Tvarově složité součásti, které vyžadují vysokou pevnost, docílíme vynikající hluboko tažností, protože má vysoký exponent deformačního zpevnění. Tyto oceli můžeme svařovat tavným i tlakovým svařováním. [22] [20]

▪ **BH (Bake Hardenable) oceli**

Zpevnění této ocele je docíleno pomocí kontrolovaného žíhání. Technologie BH je proces nízkotepeelného statického napěťového stárnutí. To zahrnuje interakci mezi rozpuštěnými uhlíkovými atomy a dislokacemi generovanými během tváření. Kolem 10 % dílů na karoserii je z těchto ocelí využíváno například jako panelové díly, vnější díly bočních dveří, nebo kapoty. U těchto komponentů nedochází k tak velkému zpevnění materiálu během procesu tváření a díky tomu BH efekt dodává vyšší tuhost a stabilitu těchto komponent. BH oceli se dají snadno svařit všemi konvenčními druhy svařování. [22] [20]

▪ **HSLA (High Strength Low Alloy) oceli**

Oceli mají opět nízký obsah uhlíku, který podporuje vysokou plasticitu. Vyrábí se pomocí válcování za studena i za tepla. Jelikož má nižší obsah uhlíku, musí se doplnit o mikrolegujícími prvky jako jsou Nb, Ti a V. Prvky jako Nb, Ti, V tvoří mikrolegující prvky nitridy, karbidy, karbonitridy, které přispívají k jemné precipitaci karbidů, zjemnění zrna a zpevnění matrice, navíc se přidávají buď samostatně nebo v kombinacích. Jelikož se zrno zjemní, tak dojde ke snížení tranzitní teploty přechodu křehkého a tvárného lomu, zvýšení pevnosti a lepší svařitelnosti. Při svařování nedochází k zhrubnutí zrna v oblasti svaru. Často slouží k vyztužení karoserie. [22] [20]

5.2.3 Pokročilé vysokopevnostní oceli

▪ **DP (Dual Phase) oceli**

DP oceli mají oproti výše zmíněným ocelím vyšší obsah uhlíku až o 0,1 % a také zvýšené obsahy prvků, které jsou schopny stabilizovat austenit jako například Mn. Také se jedná o oceli se základní feritickou maticí, která zajišťuje vyšší plasticitu. Patříčné pevnostní úrovně se dosahuje transformací zbytkového, stabilizovaného austenitu ve formě martenzitických ostrůvků. Tyto oceli mají velkou schopnost mechanického zpevnění, což vede ke zvýšení meze kluzu po tváření. Mez kluzu zvýšíme také díky BH efektu při vytvrzování laku. Tyto oceli jsou vhodné pro automobilové konstrukční a bezpečnostní díly jako jsou například různé výztuhy, nosníky. Dosahují meze pevnosti mezi 500 až 1 200 MPa. Oceli se snadno svařují a při správně nastavených parametrech u svařování laserem lze dosáhnout vysokých pevností svaru. [22] [20]

▪ **CP (Complex Phase) oceli**

Jsou to vícefázové oceli, které obsahují malé množství martenzitu, někdy také i zbytkového austenitu ve feriticko-bainitické matici. Zjemnění zrna se docílí pomalou rekrytalizací, nebo precipitací mikrolegujících prvků jako jsou Ti nebo Nb. Hlavní výhoda CP ocelí je vysoká mez kluzu při zachování hodnoty meze pevnosti v tahu. CP oceli jsou velmi dobře svařitelné jak odporově, tak laserově. [20]

▪ **TRIP (Transformation Induced Plasticity) oceli**

TRIP oceli mají feritickou maticí, kde jsou pevné fáze austenitu (min 5 %), martenzitu a bainitu. Také má velký obsah uhlíku. Při plastickém namáhání se austenit přeměňuje na martenzit. Jak velká bude transformace, ovlivňuje hlavně obsah uhlíku, ale také jiné prvky. Tenhle druh transformace může nastat například při tvarování plechu. V případě stabilnějšího austenitu může transformace nastat až při nárazu vozidla. Dobrá vlastnost TRIP oceli je, že se výborně tváří, a to je výhoda při komplexnějších tvarech karoserií. Hlavní nevýhoda je praskání na hranách karoserií, když se potřebují vytvořit různé designové prvky. [23]

- **TWIP (Twining Induced Plasticity)**

Jedná se o druhou generaci vysoko-pevnostních ocelí. Základem jsou opět austenitické matrice. Vysoký obsah manganu dokáže udržet austenitickou strukturu při pokojové teplotě. Z názvu lze vyvodit, že k deformaci dochází mechanismem dvojčatění, jak to u austenitických ocelí bývá. Hranice dvojčat se chovají velmi podobně jako hranice zrn, v tom smyslu, že omezují pohyb dislokací. Druhá generace vysoko-pevnostních ocelí byla vyvinuta tak, aby měla hlavně vysokou pevnost ve spojení s dobrou tažností, která se hodí pro různé tvary karoserií hlavně s ostrými hranami. [23]

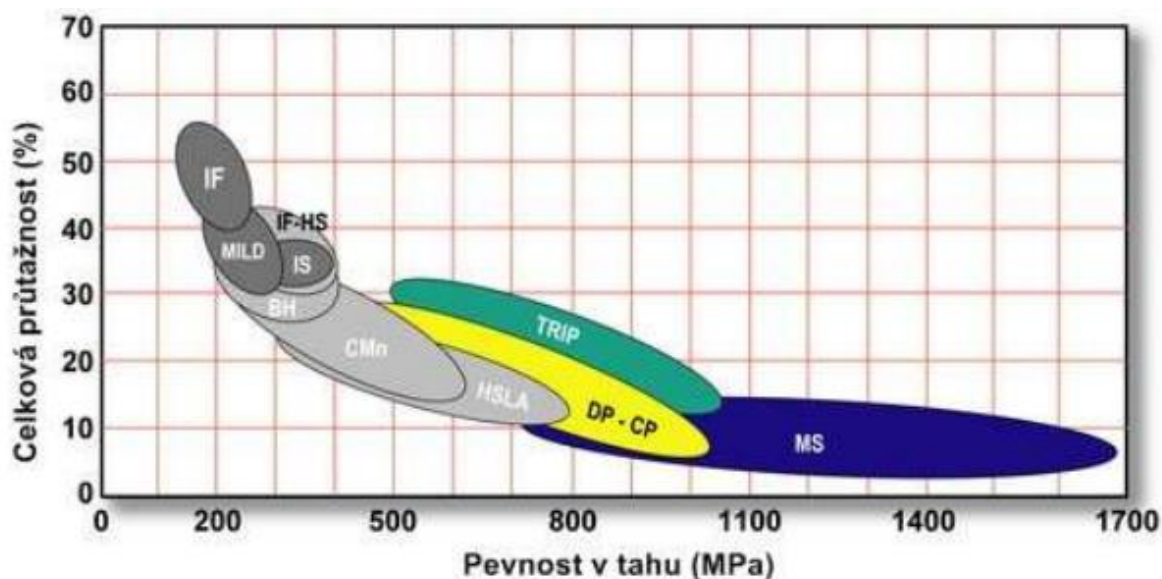
- **MS (Martensitic Steel) oceli**

Jedná se o částečně nebo plně martenzitické oceli. Doplní ji malé množství feritu a bainitu. Vykazuje vysokou pevnost na úkor plastické. Martenzitické mikrostruktury se dosáhne transformací austenitu při válcování za tepla a následném zakalení. Po zakalení ocel nažeháme a poté znovu zakalíme. Stejně struktury se dosáhne tepelným zpracováním po tváření. MS oceli se řadí mezi oceli nejvyšší úrovně meze pevnosti v tahu kde dosahuje hodnoty až do 1 700 MPa. Jelikož mají skvělé mechanické vlastnosti jako jsou již zmíněná vysoká mez pevnosti v tahu, jsou tyto oceli vhodné pro bezpečnostní prvky se zvýšenou odolností proti nárazům, jako například přední nebo zadní nárazník. MS oceli se také dobře svařují jak odporově, tak laserově. [22] [20]

- **Manganborové oceli**

Tyto oceli se tváří za tepla a jsou určeny hlavně pro konstrukční nosné a bezpečnostní části karoserie, které vyžadují vysokou odolnost proti nárazu. Díky vysoké mechanické pevnosti, se dá dosáhnout po tváření snížení hmotnosti daného dílu o 30 % až 50 % oproti konvenčním ocelím tvářeným za studena. Po tváření mají tyto oceli pevnost $R_m = 1\,400$ až $1\,600$ MPa. Ocel se nejčastěji dodává s povrchovou vrstvou na bázi Al-Si, která ji ochraňuje v průběhu ohřevu před vysokoteplotní oxidací. [20]

Pro představu mechanických vlastností materiálů aplikovaných v automobilovém průmyslu je přiložen Obr. 11.



Obr. 11 Souhrn mechanických vlastností materiálu aplikovaných v automobilovém průmyslu [35]

5.3 Plechý ze slitiny hliníku

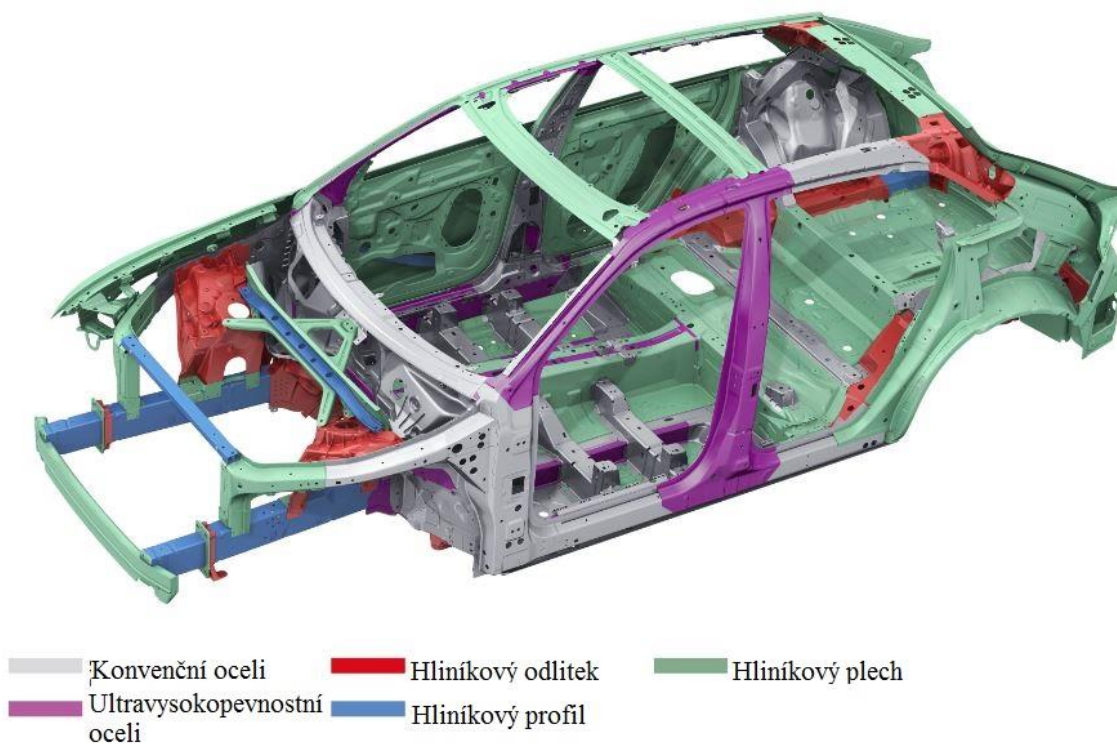
Kvůli stále přísnějším podmínkám vůči životnímu prostředí, je evropskou legislativou vyžadována stále lehčí konstrukce automobilu, protože například úspora 100 kg hmotnosti sníží spotřebu paliva již o 0,3 l a o 7,5 g emisí CO₂ na 100 km. Díky tomu se automobiloví výrobci již od sedmdesátých let 20. století snaží snižovat hmotnost automobilů všemi různými kombinacemi materiálů. Proto začali nahrazovat stále častěji ocel za lehčí díly ze slitiny hliníku. Nové a pevnější díly hliníku jsou schopné kompletně nahradit ocel. Využívají to pouze někteří výrobci, například Škodovka do roku 2030 na hliník nepřejde, z toho důvodu, že je to pro ně moc velká investice. [24]

S tímto výrazným novým trendem využívání hliníku v karoserii začala automobilka Audi přibližně před deseti lety. Audi však nejde pouze cestou prosté záměny těžší oceli za lehčím hliníkem. Převratným krokem bylo představení prototypu s prostorovým hliníkovým rámem ASF (Audi Space Frame) a integrovanými velkoplošnými hliníkovými panely, které přebírají nosnou funkci. Jednotlivé segmenty rámu ASF, vyrobené metodou protlačování, jsou pospojovány odlévanými komponenty. Pro výrobu hliníkových modelů zavedla automobilka

Audi postupně celou řadu unikátních technologií a začala využívat do té doby neobvyklé materiály. [25]

Na obrázku lze vidět, kde na nejnovějším voze Audi Q8, již aktivně používají slitiny hliníku při stavbě karoserie.

**Audi Q8
2018**



Obr. 12 Konstrukce karoserie Audi Q8 s použitím materiálů označených barevně podle pevnosti [33]

6 Povrchové úpravy plechů pro karoserie automobilů

Ještě před tím, než karoserie dorazí do lakovny, provedou se různé předúpravy jako je odmaštění a fosfátování. Odmaštěním se odstraní nečistoty na povrchu materiálu, které jsou vázány buď fyzikální absorpcí (tuk) nebo adhezními silami (prach, kovové třísky).

Následující text je zaměřen na konkrétní povrchové úpravy, které se používají u vozu Škoda Superb.

Fosfátování se provede ponorem celé karoserie do lázně. Tím se ošetří povrch chemicky vyloučenou 5 μm vrstvou krystalického zinkofosfátu, který přispěje ke korozní odolnosti a zajistí lepší přilnavost dalších vrstev antikorozi a povrchové ochrany.

Následujícím krokem je vytvoření kataforézního laku, který je proveden také ponořením do lázně. Vyloučení ochranné vrstvy tloušťky 15 až 20 μm je dosaženo elektrochemickou reakcí, kterou se zajistí velmi dobrá antikorozi ochrana spojů, hran a dutin karoserie. Je důležité zmínit, že komplexní povrchová ochrana karoserie začíná již při jejím svařování, protože pro výrobu jsou používány výhradně pozinkované plechy. Povrch plechů se elektronicky pozinkuje do tloušťky povlaku 8 μm , vnitřní plechy potom do tloušťky 10 μm , ovšem žárovým zinkováním. [26]

U elektrolytického, neboli galvanického zinkování, se první musí plech odmastit a poté očistit mořením. Plech se následně zavěsí do vodného roztoku zinečnaté soli (elektrolyt) a zapojí se jako katoda ke zdroji stejnosměrného proudu. Jako anoda se zapojí deska z čistého zinku. Jakmile se spustí elektrický proud, zinek se začne z anody rozpouštět ve formě zinečnatých iontů a poputuje ke katodě, kde se připojí na povrchu plechu.

Postup při žárovém zinkování je podobný. Nejprve se plech odmastí, potom se moří a opláchne. Nakonec se plech ponoří do tavidlové lázně, což je vlastně vodný roztok chloridu zinečnatého a chloridu amonného. Teplota zinkování je mezi 440–470 °C. Nakonec se plech usuší v pecích při teplotě 150–200 °C. Ponořením plechu do tavidla se získá tenká vrstva tavidla na povrchu, která brání oxidaci. [27]

Po kontrole kataforetické vrstvy, dojde k utěšňování spojů, které se provede ve dvou krocích. Hrubé a jemné pomocí těsnících materiálů na bázi polyvinylchloridu. To zajistí voděodolnost, a také to přispěje k odhlučnění karoserie. U automobilu je také důležité vedle

korozní ochrany i důkladné ošetření podlahy a podvozku, které se provede PVC plastizoly na bázi polyvinylchloridu po utěsnění. Tato vrstva ochrání spodní část vozu před poškozením odlétávajícími kamínky.

Aplikace se provádí oproti předešlým povrchům ve velké vrstvě několik desetin milimetru. Díky speciálnímu vozíku, putuje takto připravená karoserie do další kabiny, kde se automaticky nanáší elektrostaticky vodou ředitelný plnič, který má za úkol vyrovnat drobné nerovnosti pro dokonalý vzhled vrchního laku. Tloušťka plniče se pohybuje kolem 35 μm . Jakmile vše zaschne a proběhne kontrola kvality se začne nanášet barevný podklad, který určí barevný odstín karoserie. Jeho tloušťka se pohybuje o kolo 15 až 25 μm podle typu použitého materiálu.

Barevný podklad má za úkol chránit konvenční bezbarvý vypalovací lak, jehož sušení se provádí za teploty 140 °C. Díky této vrstvě o tloušťce 35 až 45 μm má karosérie vysoký lesk a lepší odolnost proti vnějším vlivům okolního prostředí jako jsou emise z ovzduší, ultrafialové záření a další.

Vrchním lakem ale ještě celá povrchová úprava karoserie nekončí. Při poslední kontrole se ještě zjišťuje, jestli je vůz dokonale nalakován a v případě vady se provedou menší opravy.

Konečná operace zajistí kompletní antikorozi ochranu. Je to konzervace dutin, která se provede zaplavením karoserie horkým voskem o teplotě 120 °C. Tento vosk neobsahuje žádná organická rozpouštědla, snaží se být šetrný k životnímu prostředí a doplňuje tak ekologickou koncepci lakovny. Z lakovny nakonec karoserie putují do konečné montážní haly. [26]

6.1 New Inorganic Treatment (NIT)

NIT neboli nová anorganická úprava povrchu, byla vyvinuta ve spolupráci mezi Škodou Auto a.s. a společností Arcelor Mittal již v roce 2005, kdy také zahájili výrobu. Základní chemické složení NIT se skládá z hydratované soli, která je tvořena zinkem ve formě oxidu nebo hydroxidu ve sloučenině se sulfátem. Metoda NIT je vlastně tenká vrstva ležící na vrstvě zinku. Jednotlivě nanesené vrstvy na povrch jsou zobrazeny v Obr. 13. Přestože na povrchu plechu vrstva NIT není patrná, přináší velmi užitečné vlastnosti jako je nízký koeficient tření

nebo menší elektrický odpor při svařování a další. Rovnoměrný povlak získáme postřikem, vytlačáním, nebo chemickým povlakováním. Pozinkované plechy s povrchovou úpravou NIT se nejčastěji používají při výrobě bočních dveří u Fabie a dalších modelů. [28]



Obr. 13 Ocelový pozinkovaný plech s NIT ochranou v příčném řezu [28]

Mezi další užitečné vlastnosti uváděné výrobcem, u povrchové úpravy NIT jsou [28]:

- Menší znečištění tvářecích nástrojů
- Zlepšuje tažnost díky sníženému koeficientu tření
- Minimální závislost na množství oleje
- Nízká citlivost na druh oleje

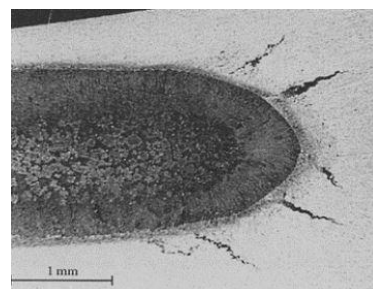
7 Vady bodových svarů

Při tvorbě bodových svarů občas dochází ke vzniku vad. Vady mají potom velký vliv na kvalitu svaru a jeho další použití vzhledem k jeho požadovanému přenosu namáhání. Jako nejčastější příčinou vad je špatná funkce stroje, nevhodné nastavení svařovacích parametrů, nebo kvalita povrchů a kvalita elektrických kontaktů. Vady bodových odporových svarových spojů se dělí na vnější a vnitřní, ale většinou se oba tyto typy vyskytují společně, nebo se stává, že vnější vada může indikovat vadu uvnitř svarové čočky. Proto důležitou roli představuje vizuální kontrola ve výrobě. [7]

Klasifikací geometrických vad kovových materiálů se řídí normou ČSN EN ISO 6520-2 *Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 2: Tlakové svařování*. Podle které rozdělujeme následující typy vad, které dále norma rozvádí do větších detailů. [1]

▪ P1 Trhliny

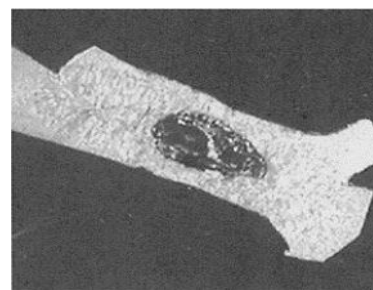
Trhliny mohou vznikat díky špatně svažitelnému materiálu, protože může dojít k jeho zakalení. Jeho účinek snižuje únosnost spoje, což je nejvíce nebezpečné při dynamickém namáhání svaru. Trhliny lze potlačit použitím měkkého svařovacího režimu, nebo nechladit elektrody. [1] [7]



Obr. 14 Trhliny [7]

▪ P2 Dutiny

Důvod vzniku dutin jsou nevhodně nastavené svařovací parametry. Nejčastěji to bývá z důvodu měkkého svařovacího režimu a dlouhého ohřevu. Za následek to má menší únosnost spoje. K zamezení tvorbě dutin se zvolí správně přítlačnou elektrodovou sílu. [1] [7]



Obr. 15 Dutiny [7]

▪ P3 Pevné vměstky

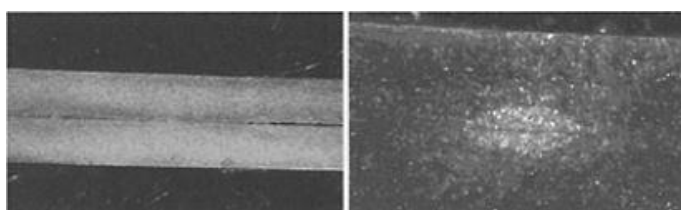
Pevné vměstky vznikají kvůli špatnému skladování, nekvalitní přípravě materiálu, která vede k znečištění povrchu. Vzniku vměstků lze zabránit správným čištěním svařovaného materiálu a elektrod. [1] [7]



Obr. 16 Pevné vměstky [1]

▪ P4 Studené spoje

Tato vada vzniká kvůli nedostatku energie vnesené do svaru, použitím opotřebovaných elektrod, ztrátami bočních proudů nebo znečištěným povrchem. Vady se eliminují, když se nastaví správné svařovací parametry. [1] [7]



Obr. 17 Studené spoje [7]

▪ P5 Vady tvaru a rozměru

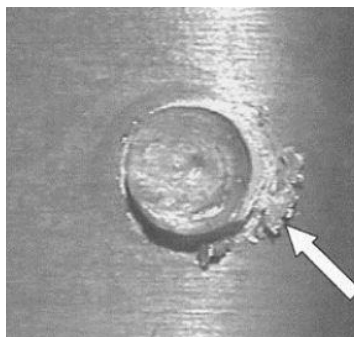
Mezi tyto vady se zařazují vady s nízkou čoučkou (malý průměr svaru), vysokou čoučkou, nesymetrickým tvarem, hlubokými otisky, nebo deformací při svařování. [1]



Obr. 18 Vměstek a výstřik [1]

- **P6 Ostatní vady**

K P6 se řadí vady, které nejsou zařazeny ve skupinách P1 až P5. Mezi P6 dá zařadit například výstřik. [1]



Obr. 19 Výstřik [7]

8 Zkoušky životnosti elektrod

8.1 Kritéria pro ukončení zkoušky životnosti elektrod

Životnost elektrod je definována jako počet svarů, které mohou být provedeny bez výměny elektrod v požadované jakosti svaru před úpravou dotykové plochy elektrod.

Elektroda dovrší své životnosti v daný okamžik, kdy provedené svary dosáhnou průměru minimálního svaru při odlupovací zkoušce tedy průměru menšího než $3,5 \sqrt{t}$ (kde t je tloušťka plechu v mm) u tří svarů na zkušebním vzorku pěti po sobě následujících svarů. Prstencové nebo slepené svary jsou nepřípustné, jelikož prstencové svary se vyskytují dříve u ocelí s povlakem.

Alternativní kritéria, která jsou určena pro ukončení konce životnosti elektrod mohou být uvedena v konstrukčních specifikacích. Řídí se podle požadavků na výrobek. [29]

Typické příklady:

- Dohodnuté snížení pevnosti ve stříhu například o 30 %, podle ČSN EN ISO 14273
- Dohodnutá kritéria pro provedení zkoušky krutem
- Kritéria založena na povrchových trhlinách
- Dohodnutá kritéria založená na přilepování elektrod ke svařovaným dílům
- Dohodnuté kritérium založené na metalografických výbrusech [29]

Životnost elektrod značně závisí na typu svařovacího lisu nebo svařovacích kleštích. Proto je nutné stanovit různé požadavky na svařovací stroj. Všechny vlastnosti stroje musí být specifikovány podle ISO 669. [29]

8.2 Svařovací elektrody

Tvar a rozměr elektrod bývá uveden v konstrukční specifikaci, každopádně vždy musí souhlasit s rozměry a tolerancemi uvedenými v ISO 5184. Volba průměru pracovní plochy elektrody se určí podle tloušťky plechu vztahem $d=5\sqrt{t}$ (d je pracovní průměr plochy elektrody v mm a t je tloušťka plechu v mm)

Před celým zahájením experimentu musí být horní a spodní elektroda správně vyrovnány. Dosedací plocha horní elektrody musí být rovnoběžná s pracovní plochou spodní elektrody.

V průběhu zkoušky se musí dodržet následující body:

- Materiál elektrod musí být podle ISO 5182:1991, podle dohody třídy A2/2. Způsob výroby elektrod musí být předepsán. Pokud je to možné, elektrody by se měly volit z jedné šarže, abychom zachovali srovnatelnost výsledků.
- Jestli se elektroda předem připravuje na zkoušku zaběhnutím, je nutné, aby to bylo uvedeno v konstrukční specifikaci. Všeobecně by se elektrody neměly předem připravovat na zkoušku životnosti. Zkouška zaběhnutím znamená, že se před zkouškou provede určitý počet svarů.
- Elektrody by neměly být upravovány během zkoušky životnosti. [29]

8.3 Postup zkoušky životnosti elektrod

Pokud není předmětem zkoušení svařovaný materiál, zvolíme jeden z následujících materiálů:

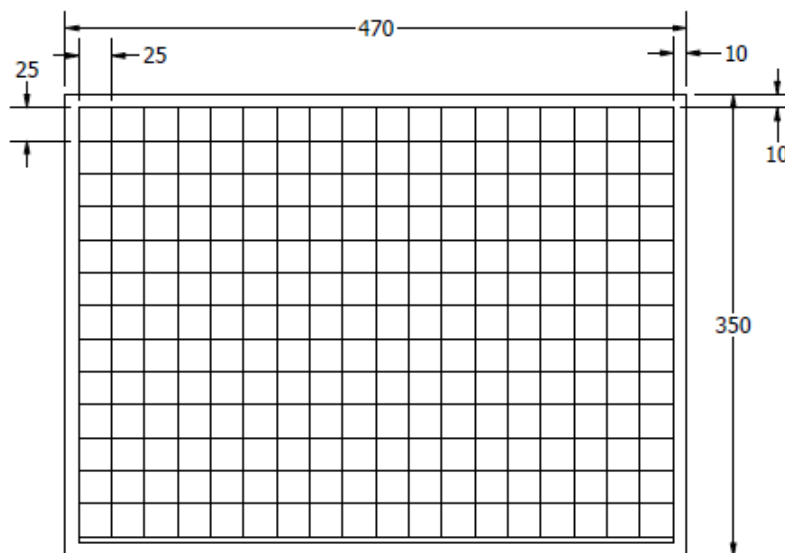
- Ocel válcovaná za studena – plech v jakosti ke zvlášť hlubokému tažení o tloušťce 0,8mm
- Ocel žárově pozinkovaná – tloušťka povlaku 7 μm až 12 μm na každé straně. Tloušťka plechu musí být 0,8 mm nebo 2,0 mm
- Vysokopevnostní ocel, tloušťka plechu 0,8 mm

Ostatní plechy a tloušťky nebo druhy povlaků mohou být použity podle určení v konstrukční specifikaci.

Svařovat by se mělo nejméně 10 mm od kraje a s roztečí svarů nejméně 30 mm. Rozměry zkušebních plechů by měly být zvoleny tak, aby se na plech umístilo nejméně 192 svarů, například 12 řad po 16 svarech. [29]

8.4 Rozměry zkušebních plechů

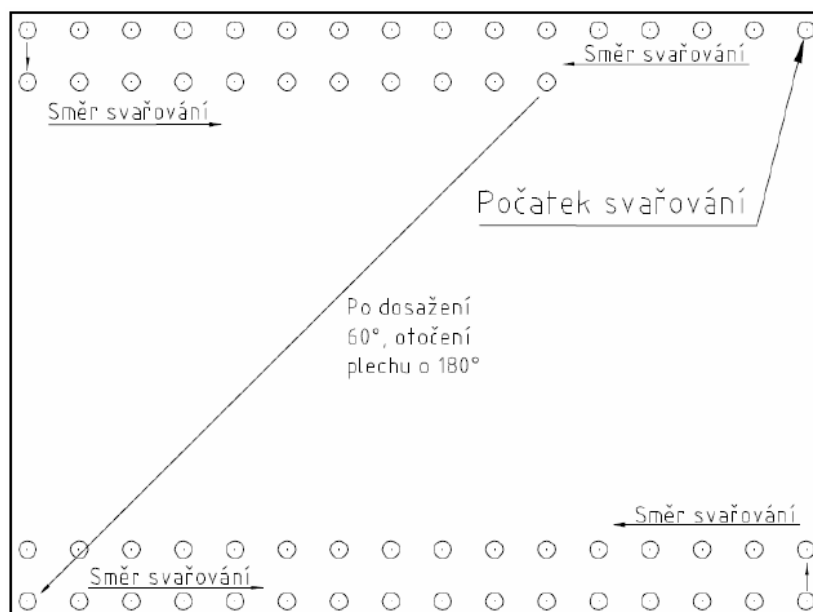
Plech na zkoušku musí být nejméně 470 mm dlouhý a 350 mm široký. Vzhledem k malému množství materiálu, byla minimální vzdálenost mezi jednotlivými body zkrácena na 25 mm (viz Obr. 20).



Obr. 20 Schéma zkušebního plechu [29]

Svary se podle normy musí provést v následujícím pořadí:

Svary se provádí z jedné strany na druhou. Začne se v rohu plechu a postupuje v požadovaném intervalu podél kraje plechu. Po dokončení řady se plech obrátí a v obráceném sledu se dokončí druhá řada. Poté se plech otočí vodorovně o 180° a postup se opakuje (viz Obr. 21). [29]

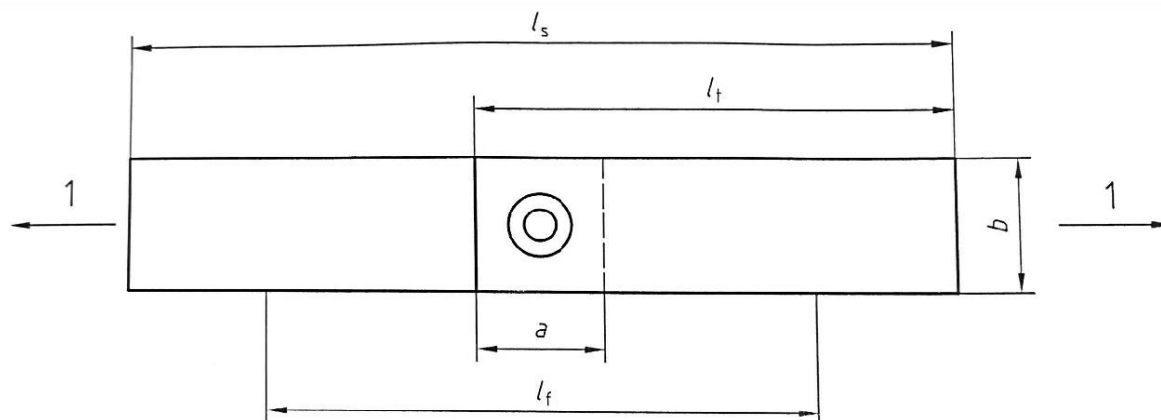


Obr. 21 Znárodnění postupu svařování [29]

Na každých 192 svarů musí být provedeno osm zkušebních svarů. Zkušební svary se musí ale provést na samostatném plechu při použití stejného materiálu. Tyto zkušební plechy se poté vyhodnotí zkouškou tahem ve smyku a to znamená, že musí odpovídat rozměry zkušebního vzorku podle ČSN EN ISO 14273 nebo ČSN EN ISO 17653. [30]

Tab. 3 Doporučené rozměry zkušebního vzorku dle normy ČSN EN ISO 14273 [30]

Tloušťka plechu t [mm]	Šířka vzorku b [mm]	Délka vzorku l_t [mm]	Délka vzorku l_s [mm]
$0,5 \leq t \leq 1,5$	45 (30)	105	175
$1,5 \leq t \leq 3$	60 (30)	138	230



Obr. 22 Rozměry zkušebního vzorku [30]

Zkušebních svarů bylo oproti normě provedeno pouze 7, opět z důvodu malého množství zkoušeného materiálu. Na sedmi zkušebních svarech byly provedeny tyto analýzy: mechanizovaná střížná zkouška, měření průměru svarové čočky, zkouška makrostruktury.

8.5 Volba svařovacích podmínek

Pro zvolený ocelový plech bez povlaku nebo s povlakem, tvar a materiál elektrod musí být podle výrobních požadavků. Zvolená elektrodová síla a doba svařování se volí dle pokynů uvedených v ČSN EN ISO 14373.

Ve všech případech musí být počáteční průměr svaru přibližně roven počátečnímu průměru pracovní plochy elektrody, která je v případě komolého kuželu elektrod rovna $5\sqrt{t}$.

V případě, že elektrody mají vypouklý tvar, měly by být rozměry a svařovací podmínky zvoleny k vytvoření počátečního průměru svaru mezi $5\sqrt{t}$ a $5,5\sqrt{t}$. [29]

9 Experimentální část

9.1 Svařovací parametry a jeho nastavení

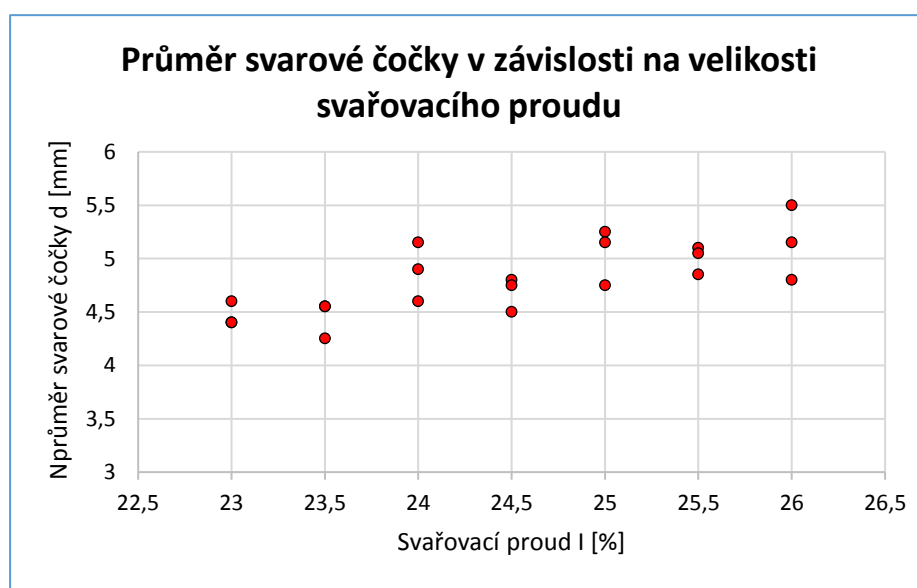
Nastavené svařovací parametry vychází z optimalizace parametrů provedené v rámci předchozích bakalářských a diplomových prací. Vzhledem k upgradu řídicí jednotky svařovacího lisu, bylo potřeba zkontrolovat, zda nastavené parametry stále odpovídají těm před upgradem. Proto byla úvodním experimentem sestavena kalibrační křivka (závislost nastavovaných % maximálního svařovacího proudu na naměřeném [kA]). Vzorky svařené během úvodního experimentu byly roztrhány sekáčovou metodou a byl na nich změřen průměr svarové čočky, viz Graf 1. Na základě výsledků byly zvoleny svařovací následující parametry:

$I = 7 \text{ kA}$ (což odpovídá 24 %, max svařovacího proudu)

$t = 240 \text{ ms}$

$P = 24 \text{ N}$.

Z grafu je patrné, že všechny svary svařené proudem v rozsahu 23 % (odpovídá hodnotě 6,5 kA) až 26 % (odpovídá hodnotě 7,5 kA) splňují podmínku minimálního průměru svarové čočky. Ze závislosti je také vidět, jak s nárůstem proudu roste také průměr svarové čočky, což odpovídá teorii tepelné bilance.



Graf 1 Průměr svarové čočky v závislosti na velikosti svařovacího proudu

9.2 Svařovaný materiál

Pro zkoušku opotřebení elektrod byl zvolen materiál HX180BD ZM100 s tloušťkou 0,7 mm. Tento materiál se nejčastěji používá s povrchovou úpravou ZnMg (EG). V rámci experimentu byly porovnány 2 varianty povrchových úprav. První materiál byl použit pouze s povrchovou úpravou ZnMg (EG) a druhý materiál byl použit s povrchovou úpravou ZnMg (EG) a s vrstvou NIT. Chemické složení materiálu je popsáno v Tab. 4. Mechanické vlastnosti materiálu jsou zapsány v Tab. 5.

Tab. 4 Chemický rozbor materiálu HX180BD ZM100 [31]

Hmotnostní složení [%]	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti
Tab. Hodnoty HX180BD	≤ 0,06	≤ 0,5	≤ 0,7	≤ 0,06	≤ 0,025	≥ 0,015	≤ 0,09	≤ 0,12

Tab. 5 Hodnoty tahové zkoušky materiálu HX180BD ZM100 [31]

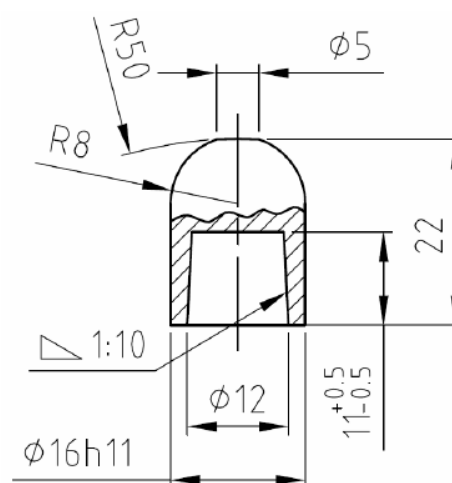
Rp 0,2 [MPa]	Rm [MPa]	Tažnost A80 [%]
180-240	290-360	34

9.3 Svařovací elektrody

Pro svařování byly použity elektrodové čepičky určené pro automobilový průmysl s označením 39D 1978-1. provedení 2, které se využívají také ve společnosti Škoda Auto a.s.

Materiál: DIN ISO 5182 - A2/2 CuCr1Zr

Průměr elektrody: \varnothing 5 [mm]



Obr. 23 Obr. 23 Odporová čepička 39D 1978-1

9.4 Použité metody a zařízení

Pro svařování byl použit svařovací odporový lis PMS 11-4 od firmy Dalex.

Pro svařování byl použit svařovací odporový a výstupkový lis s výměnou armaturou, pneumaticky poháněný. Jedná se o středo-frekvenční [1000 Hz] inventar. Svařovací lis disponuje 13-ti dobou řídicí jednotkou s 64 svařovacími programy. Typ jednotky je MEGA 1 MF 13Z64P QSF/S.

Chlazení stroje bylo zajištěno oběhovým uzavřeným chladícím zařízením PL 80/100 Cool 3, o chladícím výkonu 2,7 kW. Oběhové chladící zařízení bylo vybaveno digitální kontrolou teploty chladící kapaliny.

Údaje jsou odpovídající ISO 669 a DIN 44753.



Obr. 24 Svařovací lis DALEX SM 677 66 1

LabTest 5.100 SP1

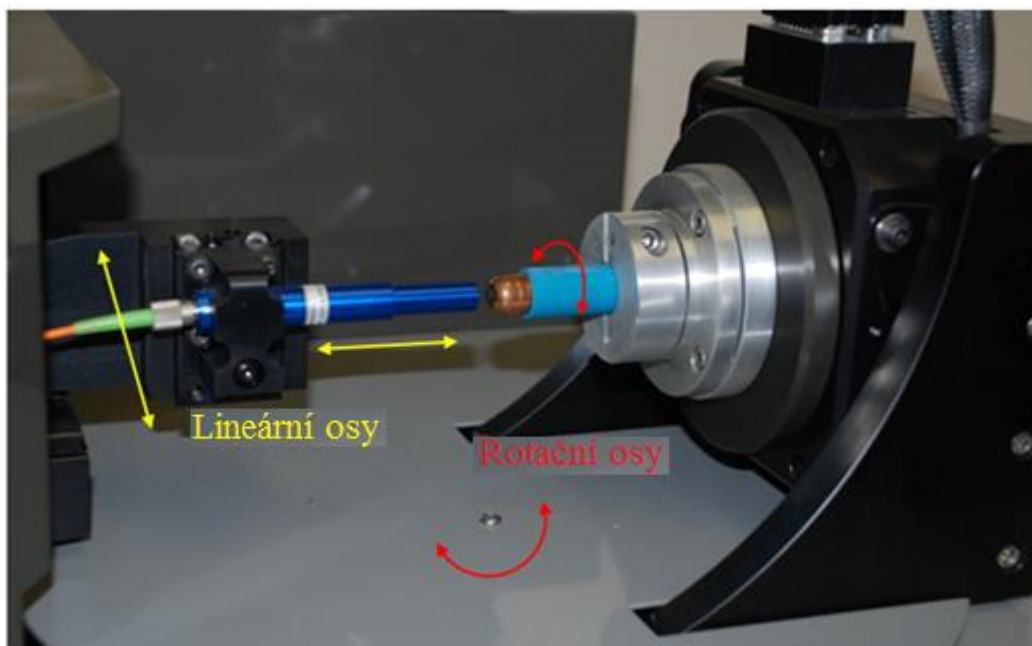
Mechanizovaná zkouška stříhem byla provedena na elektromechanickém testovacím stroji LabTest 5.100 SP1. Jmenovité zatížení stroje bylo 100 kN.



Obr. 25 Elektromechanický testovací lis LabTest 5.100 SP1.

RedLux (RedLux Ltd., Southampton, UK)

Skládá se ze dvou kluzných a dvou rotačních os, které používají vzduchová ložiska k dosažení vyšších přesností pohybu. Otočné osy se pohybují se vzorkem a posuvné osy se pohybují se senzorem. Všechny osy používají optické snímače polohy a lineární motory. Senzor je konfokální bodový. Jeho princip, který je založen na barevné vadě čočky se používá k velmi přesnému měření vzdálenosti od měřenému objektu. Podle hodnot stanovených výrobcem mají lineární osy rozlišení 100 nm. Profilometr zaznamenává polohu jednotlivých povrchových bodů s jistotou frekvence. Frekvence bodového skenování lze nastavit jak v obvodovém, tak v podélném směru. [32]



Obr. 26 RedLux

Mitutoyo Surftest SJ-301

Pro měření drsnosti byl použit měřič drsnosti Mitutoyo Surftest SJ-301.



Obr. 27 Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ-301

9.5 Návrh experimentu

Pro ověření vlivu NIT na životnost elektrod, svařovací proces a na kvalitu spoje byl navržen následující experiment. Během zkoušky opotřebení dle normy ČSN EN ISO 8166 byly svařeny 2 série vzorků (s NIT a bez NIT). Sady zkušebních vzorků byly následně podrobeny mechanizované zkoušce stříhem, na roztrhaných vzorcích byly změřeny průměry svarových čoček. Na jednom vzorku z každé sady byla provedena metalografická makroskopická zkouška. Během svařování byly monitorovány svařovací parametry. Nakonec byla na kontaktních plochách elektrodových čepiček změřena drsnot, nejprve v linii a poté i plošná. Opotřebované čepičky byly postupně vyráběny po 1; 10; 25; 50; 75; 100; 150; 200; 250; 300 svarech.

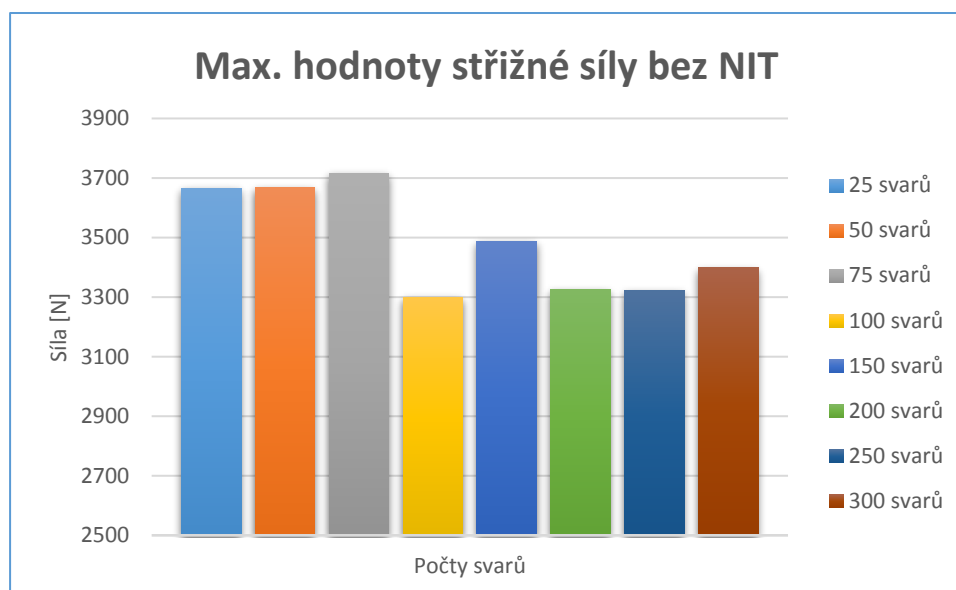
9.6 Vyhodnocení zkušebních bodových svarů

9.6.1 Střížná zkouška

Hodnoty maximální střížné síly bez povrchové úpravy NIT jsou uvedeny v Tab. 6. V Graf 2 lze porovnat vliv počtu svarů na maximální hodnotu střížné síly bez povrchové úpravy NIT. Z grafu lze jednoznačně vyvodit, že s narůstajícím počtem svaru má maximální střížná síla tendenci klesat, ale pouze v rozmezí kolem 100 N. Tato klesající tendence se začíná projevovat od 100 svaru.

Tab. 6 Naměřené hodnoty střížné síly bez NIT

číslo vzorku BEZ NIT	25 svarů [N]	50 svarů [N]	75 svarů [N]	100 svarů [N]	150 svarů [N]	200 svarů [N]	250 svarů [N]	300 svarů [N]
1	3751,9	3754,1	3804,3	3463,7	3483,4	3150,7	3368,5	3332,4
2	3574,5	3623,3	3756,2	-	3551,3	3168,8	3220,2	3479,6
3	3707,5	3768,3	3628,2	3167,7	3446,2	3398,1	3227,4	3479,1
4	3548,8	3524,7	3745,3	3388,2	3454,4	3450,6	3241	3342,3
5	3704,7	3604,6	3669,3	3199,4	3425,4	3375,6	3385,5	3452,8
6	3705,4	3736,6	3693,3	3278,2	3564,4	3409,6	3490,5	3301,2
Průměrná hodnota	3665,5	3668,6	3716,1	3299,4	3487,5	3325,6	3322,2	3397,9



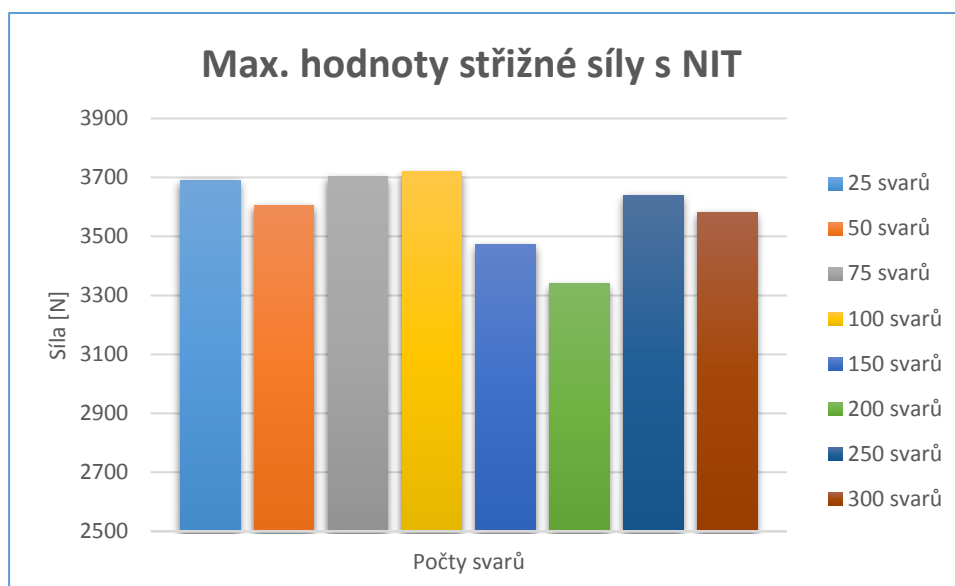
Graf 2 Počty provedených svarů bez NIT na maximální hodnotu sřížné síly

V Tab. 7 jsou uvedeny hodnoty max. sřížné síly vzorků s povrchovou úpravou NIT. Výsledky mechanizované sřížové zkoušky jsou znázorněny v Graf 3. Je zde porovnán vliv počtu svarů na maximální hodnotu sřížné síly. Podle grafu lze posoudit, že hodnoty mají mírnou tendenci se zvyšujícím počtem svarů klesat v závislosti se sřížnou silou.

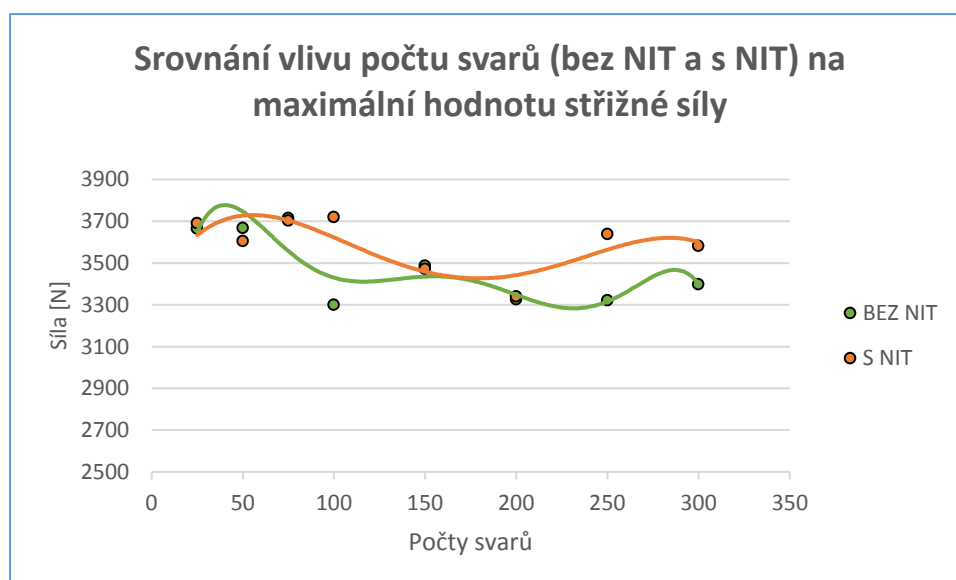
V Graf 4 jsou zobrazeny jednotlivé křivky (bez NIT a s NIT), kde lze konstatovat, že u nejvyššího počtu svarů je křivka s NIT vyšší cca o 200–300 [N] než křivka bez NIT.

Tab. 7 Naměřené hodnoty sřížné síly s NIT

číslo vzorku S NIT	25 svarů [N]	50 svarů [N]	75 svarů [N]	100 svarů [N]	150 svarů [N]	200 svarů [N]	250 svarů [N]	300 svarů [N]
1	3689,5	3724	3709,1	3827,9	3477,1	3310,8	3639,6	3721,8
2	3764,4	3701	3673	3545,5	3643,5	3373,1	3891,4	3686,2
3	3680,2	3305,3	3849,8	3667	3748,6	3009,8	3800,6	3404,9
4	3635,3	3647,4	3547,7	3588,2	3589,3	-	3419,2	3604,1
5	3631,5	3713,5	3677,5	3982,7	3229,2	3444,3	3392,9	3651,7
6	3744,2	3538,4	3761,1	3709,1	3143,3	3563,5	3693,3	3425,1
Průměrná hodnota	3690,9	3604,9	3703,0	3720,1	3471,8	3340,3	3639,5	3582,3



Graf 3 Počty provedených svarů s NIT na maximální hodnotu střížné síly



Graf 4 Srovnání vlivu počtu svarů na maximální hodnotu střížné síly

9.6.2 Velikost svarových čoček

V Tab. 8 až Tab. 11 jsou uvedené hodnoty svarových čoček, které byly změřeny na roztržených vzorcích po vyhodnocení maximální střížné síly. Po naměření hodnot d_1 a d_2 se vypočítaly průměrné hodnoty a z těch byl poté určen aritmetický průměr ke každé sadě zkušebních vzorků. Z výsledků velikosti průměru svarových čoček lze posoudit, že průměry u jednotlivých kategorií se mění velice nepatrně. Dále lze konstatovat, že pouze u vzorků s NIT jde vidět, že průměry svarových čoček mírně klesají s rostoucím počtem svarů (viz Graf 5).

Nejmenší hodnota byla naměřena u počtu 200 svarů, kde se ale nepovedlo naměřit veškeré hodnoty z důvodu špatného vytvoření čochky.

Tab. 8 Průměry svarových čochek

Počet svarů bez NIT	25			50			75			100		
číslo vzorku	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]
1	5,5	5,2	5,35	5,7	5,3	5,5	5,1	5,2	5,15	5,8	6,2	6
2	5,2	5	5,1	6,7	5,4	6,05	5,4	5,5	5,45	5,2	5,5	5,35
3	5,8	5,9	5,85	6	6,2	6,1	6	4,8	5,4	6	6,2	6,1
4	5,8	5,2	5,5	5,8	5,2	5,5	5,9	6,3	6,1	5,7	5,9	5,8
5	5,6	5,7	5,65	5,5	5,9	5,7	5,2	6,2	5,7	6,6	5	5,8
6	6,3	5,7	6	5,3	5,4	5,35	6,1	6	6,05	5,2	6,7	5,95
Průměrné hodnoty	5,70	5,45	5,58	5,83	5,57	5,70	5,62	5,67	5,64	5,75	5,92	5,83

Tab. 9 Průměry svarových čochek

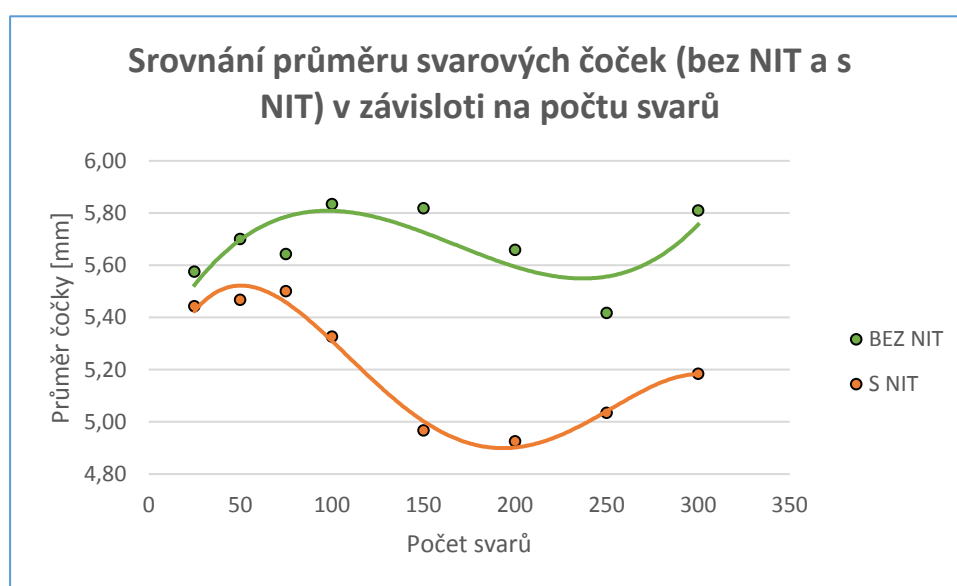
Počet svarů bez NIT	150			200			250			300		
číslo vzorku	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]
1	5,4	6	5,7	5,2	5	5,1	5,6	5,2	5,4	5,7	5,8	5,75
2	6	5,9	5,95	5,1	6,1	5,6	4,9	5,3	5,1	5,7	5,8	5,75
3	5,7	5,8	5,75	6	5,4	5,7	5,8	5,1	5,45	6	6	6
4	5,8	5,5	5,65	6,3	6,5	6,4	6,2	4,5	5,35	5,7	6,2	5,95
5	5,7	5,8	5,75	5,5	6,1	5,8	4,4	6,6	5,5	5,8	5,6	5,7
6	6,2	6	6,1	4,5	6,2	5,35	6,2	5,2	5,7	5,6	5,8	5,7
Průměrné hodnoty	5,80	5,83	5,82	5,43	5,88	5,66	5,52	5,32	5,42	5,75	5,87	5,81

Tab. 10 Průměry svarových čochek

Počet svarů s NIT	25			50			75			100		
číslo vzorku	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]
1	5,3	5,6	5,45	5,8	5,7	5,75	5,9	5,4	5,65	5,9	4,8	5,35
2	4,6	5,4	5	5,8	5,2	5,5	5,3	5,6	5,45	5,5	5,3	5,4
3	5,6	5,6	5,6	5,4	5,1	5,25	5,5	5,6	5,55	5,4	5,5	5,45
4	5,8	5,5	5,65	5,5	5,5	5,5	5,9	5,1	5,5	5,3	5,2	5,25
5	5,2	5,7	5,45	4,8	5,9	5,35	5,4	5,2	5,3	5,6	5,2	5,4
6	5,4	5,6	5,5	4,9	6	5,45	5,5	5,6	5,55	5,2	5	5,1
Průměrné hodnoty	5,32	5,57	5,44	5,37	5,57	5,47	5,58	5,42	5,50	5,48	5,17	5,33

Tab. 11 Průměry svarových čoček

Počet svarů s NIT	150			200			250			300		
číslo vzorku	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _p [mm]
1	5,5	4,7	5,1	4,4	5,2	4,8	4,4	5,2	4,8	5,5	5,3	5,4
2	5,7	5,3	5,5	5,1	5,6	5,35	6	4,4	5,2	5,4	5	5,2
3	5,6	5,2	5,4	-	-	-	5,8	5,6	5,7	5,3	4,9	5,1
4	4,8	4,6	4,7	-	-	-	5,2	4,2	4,7	5,1	5,2	5,15
5	4,7	4,8	4,75	5,5	4	4,75	5,1	4,2	4,65	5,3	5,2	5,25
6	4,1	4,6	4,35	5,2	4,4	4,8	5,2	5,1	5,15	4,9	5,1	5
Průměrné hodnoty	5,07	4,87	4,97	5,05	4,80	4,93	5,28	4,78	5,03	5,25	5,12	5,18

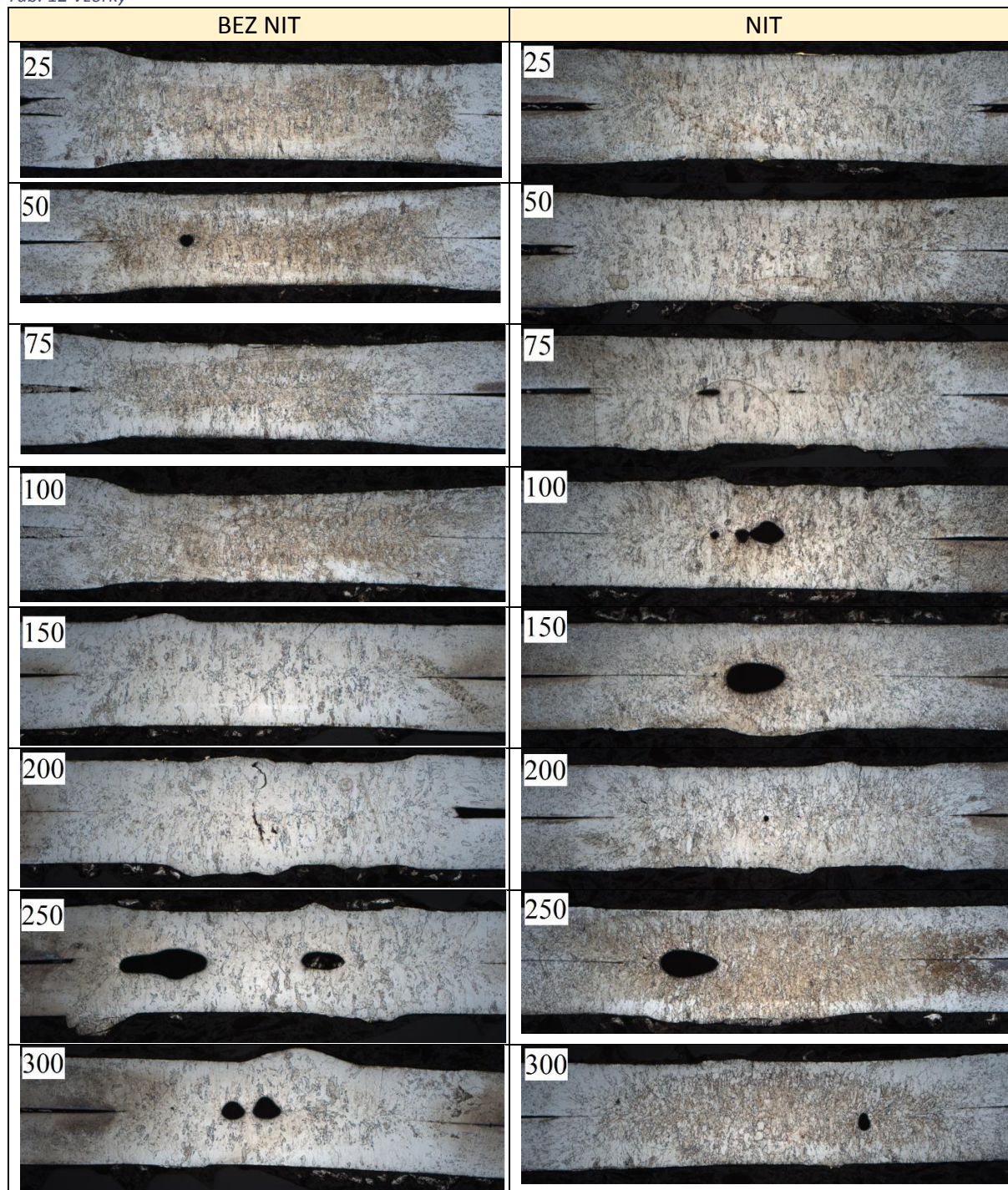


Graf 5 Srovnání průměru svarových čoček v závislosti na počtu svarů

9.6.3 Metalografie

Z obrázků lze odhadnout a porovnat kvalitu svaru, kde na levé straně se nachází materiál bez NIT povrchové úpravy (označeno HX) a na pravé straně s NIT povrchovou úpravou (označeno NHX). Z obrázku lze vyhodnotit, že nejčastější vady, které se ve svarovém spoji vytvářely byly dutiny. U vzorku bez NIT se vnitřní vady ve svarovém spoji začínají tvořit od 250 provedených svarů, zatímco v případě vzorků s NIT povrchovou úpravou se dutiny tvoří již od 75 svarů.

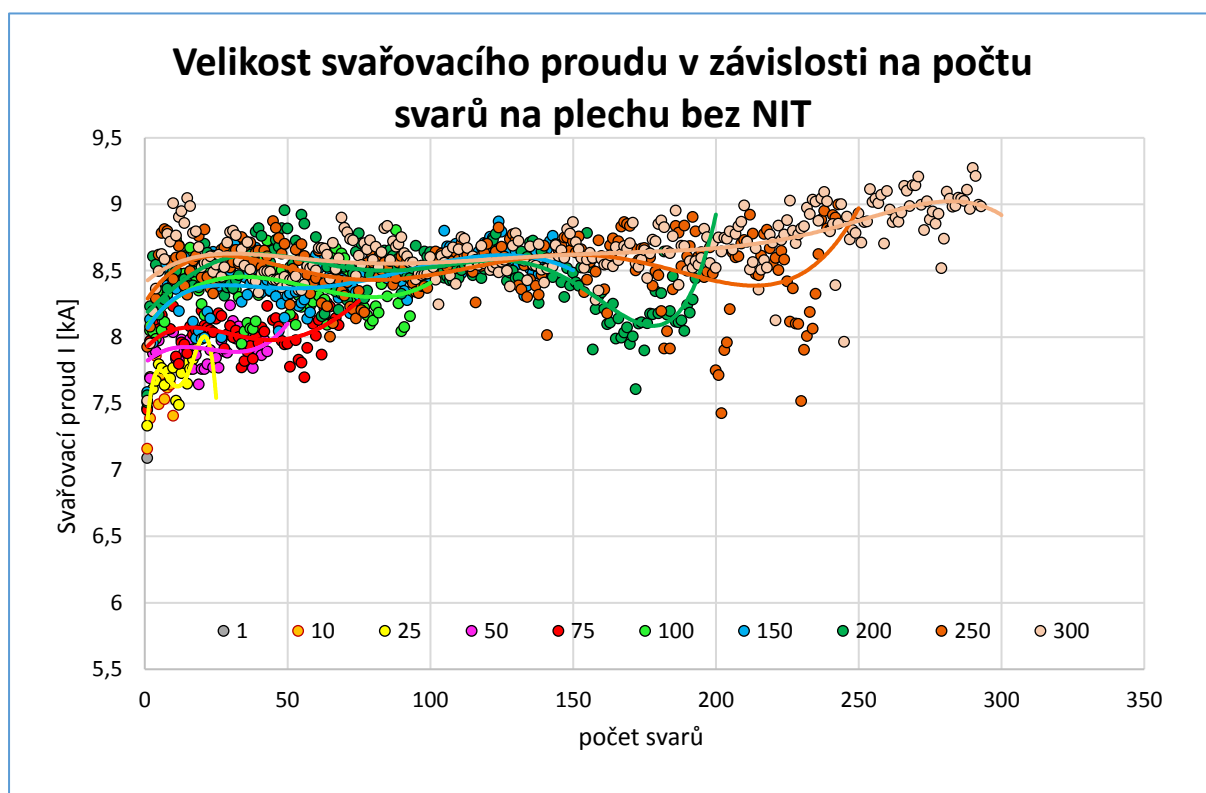
Tab. 12 Vzorky



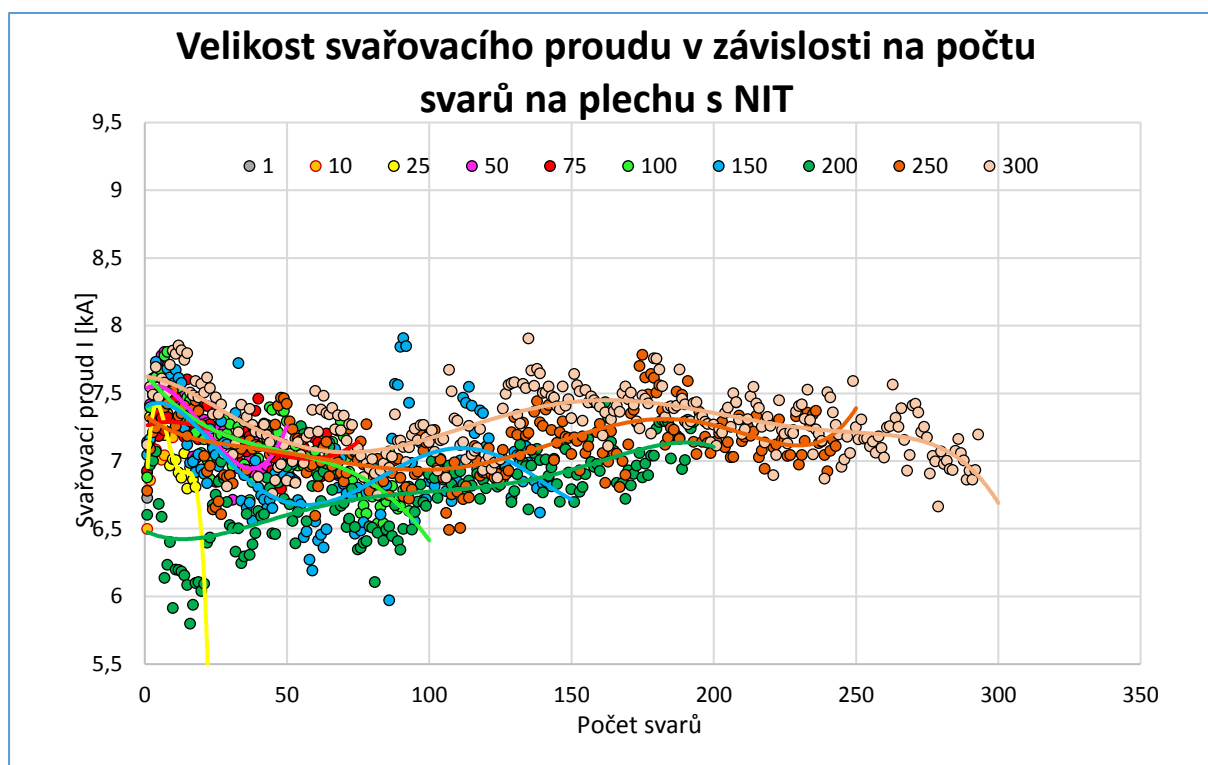
Čísla v obrázcích znamenají počet provedených svarů.

9.6.4 Vyhodnocení vlivů velikosti opotřebení na svařovací parametry

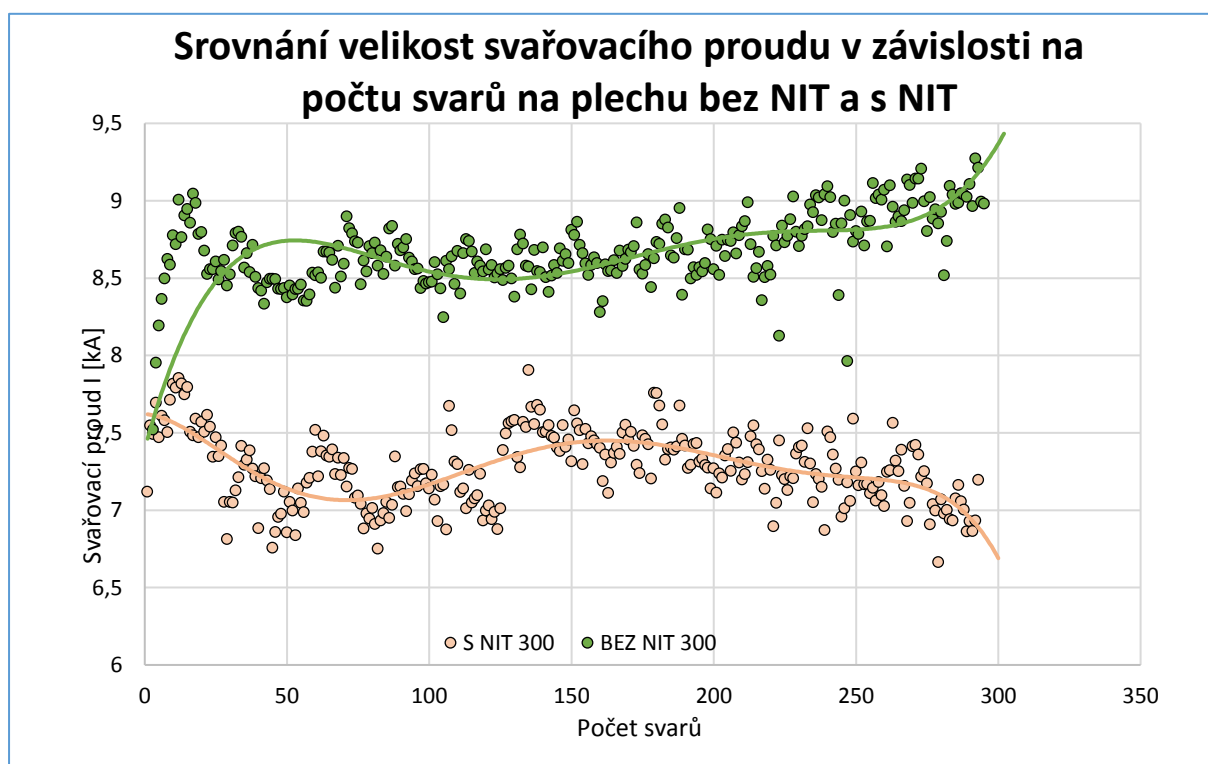
V grafu jsou vyznačené jednotlivé body svařovacího proudu v závislosti na počtu svarů. Tyto body byly následně proloženy jednotlivými křivkami, které umožňují znázornit průběh svařovacího proudu. Při porovnání Graf 6 a Graf 8 jde vidět, že Graf 8 se nachází podstatně níže s naměřenými hodnotami proudu až o 1,5 kA. Toto tvrzení jde jednoznačně potvrdit na Graf 7, kde jsou křivky bez NIT a s NIT porovnány. Rozptyl hodnot u Graf 8 je také o něco větší.



Graf 6 Velikost svařovacího proudu na počtu svarů na plechu bez NIT



Graf 8 Velikost svařovacího proudu na počtu svarů na plechu s NIT



Graf 7 Srovnání velikosti svařovacího proudu v závislosti na počtu svarů na plechu bez NIT a s NIT

9.6.5 Drsnost a optická profylometrie

Měření drsnosti čepiček bylo velice obtížné, protože plocha pro naměření drsnosti byla velice krátká. Z tohoto důvodu byly kontaktní plochy čepiček ještě plošně opticky skenovány zařízením RedLux.

Drsnost byla měřena na opotřebovaných kontaktních oblastech elektrod. Každá opotřebovaná čepička byla měřena celkem 5krát po celé kontaktní ploše. Mezi jednotlivými měřeními byl vzorek vždy otáčen asi o 30°. Pro oblast vyhodnocení byl vybrán průměr měřené délky 7 mm, který zahrnuje celou oblast. V této oblasti byla vyhodnocena ztráta a nárůst materiálu, která stanovila výslednou drsnost čepičky.

Závislost drsnosti kontaktních ploch hrotu elektrody na počtu provedených svarů je vidět u Graf 9, kde se jedná o hodnoty vzorku bez NIT povrchové úpravy. Graf ukazuje trend zvyšování drsnosti z hodnot kolem $R_a = 1,5 \mu\text{m}$ na hodnoty přesahující $R_a = 2,5 \mu\text{m}$ po 150 svarech. S větším počtem svarů se drsnost stabilizuje při průměrné hodnotě $R_a = 2,5 \mu\text{m}$. Naměřené hodnoty v Graf 10 jsou o dost větší než u předešlého grafu. Jedná se o materiál s povrchovou úpravou NIT. Graf ukazuje trend zvyšování drsnosti z hodnot kolem $R_a = 2 \mu\text{m}$ na hodnoty přesahující $R_a = 6 \mu\text{m}$ po 100 svarech. S větším počtem svarů se drsnost následně stabilizuje při průměrné hodnotě $R_a = 6 \mu\text{m}$.

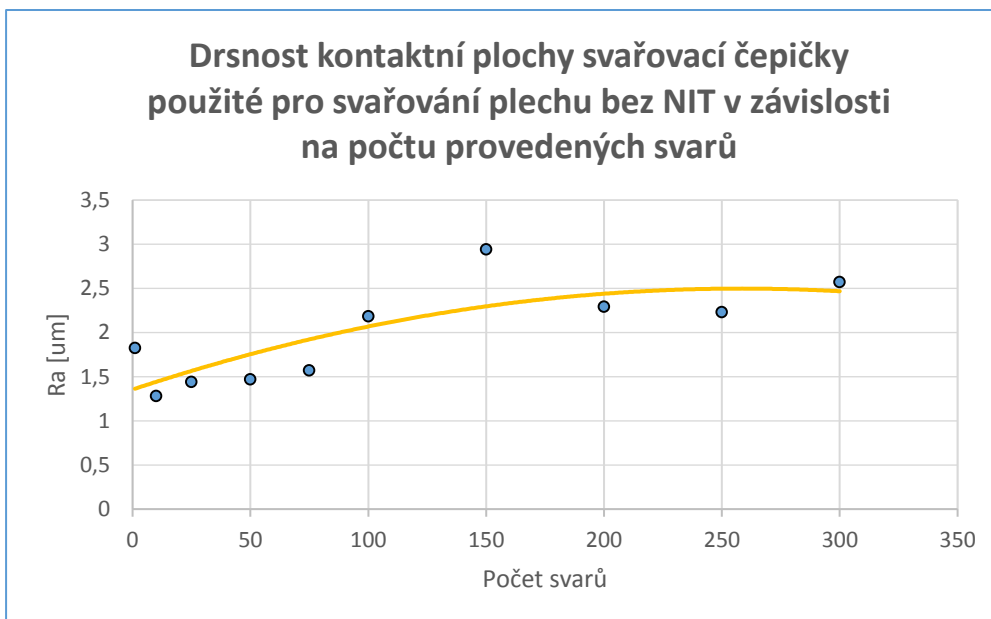
U některých čepiček převážně u vzorku bez NIT nebylo možné zaznamenat všech 5 hodnot u každého vzorku z toho důvodu, že povrch byl až moc opotřebovaný a senzor nedokázal zaznamenat požadované hodnoty. Opotřeбенí můžeme vidět na následujících obrázcích Obr. 28 a Obr. 29.



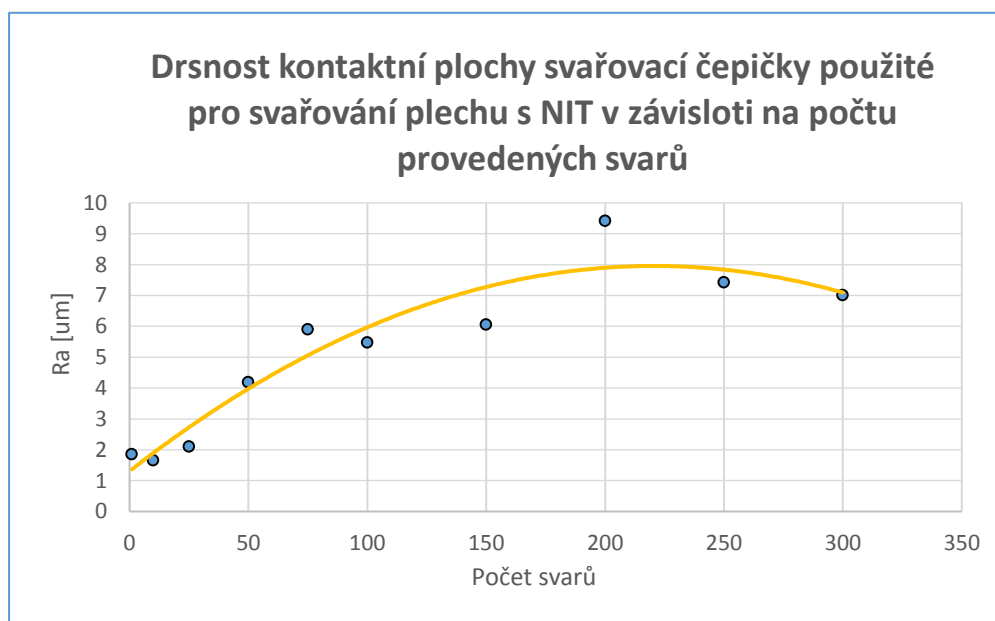
Obr. 29 Horní opotřebovaná čepička HX 300



Obr. 28 Horní opotřebovaná čepička HX 200



Graf 9 Drsnost kontaktní plochy svařovací čepičky použité pro svařování plechu bez NIT (průměr z 5ti hodnot) v závislosti na počtu provedených svarů



Graf 10 Drsnost kontaktní plochy svařovací čepičky použité pro svařování plechu s NIT (průměr z 5ti hodnot) v závislosti na počtu provedených svarů

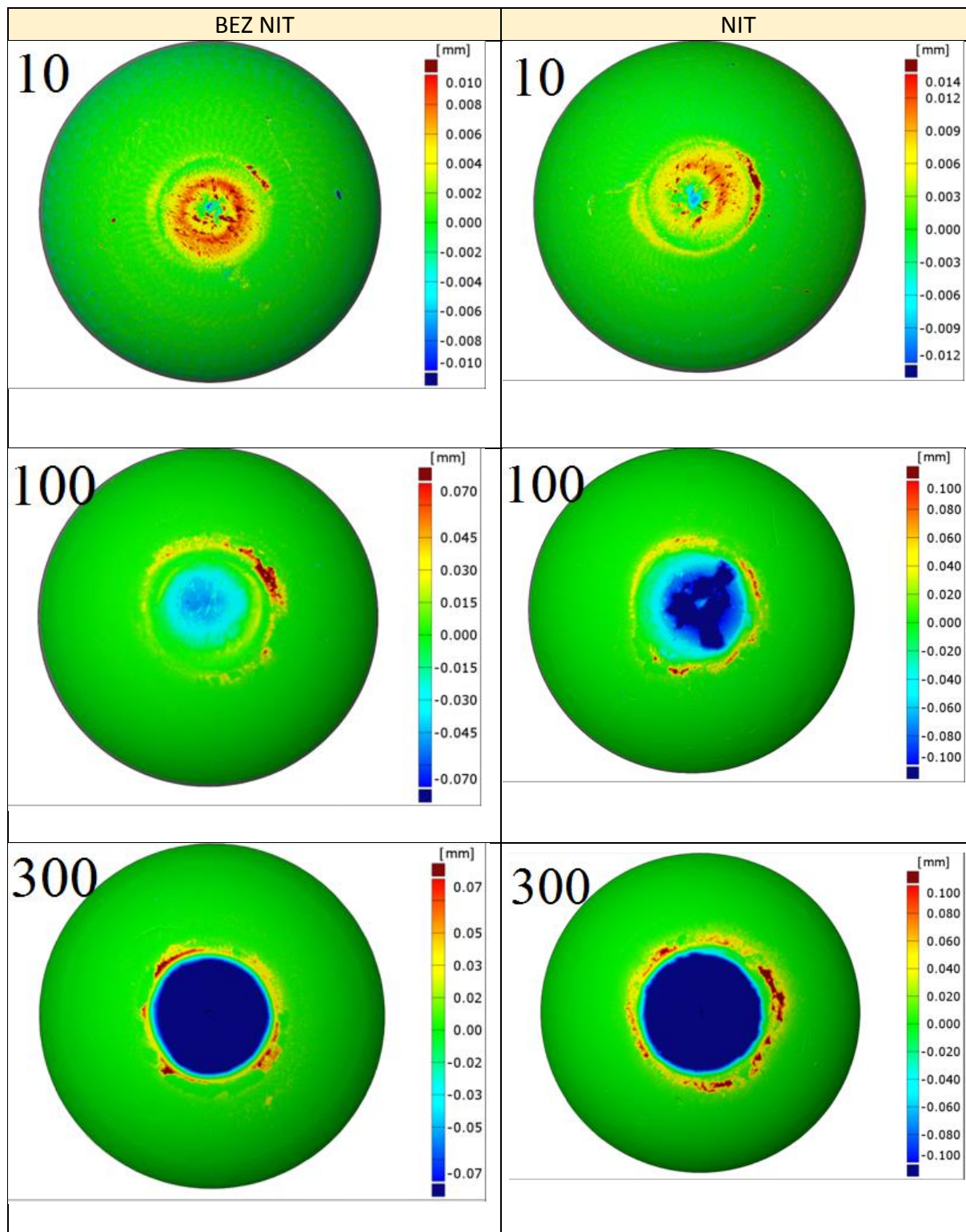
Tab. 13 ukazuje barevnou mapu odchylek jednotlivých opotřebovaných kontaktních ploch čepiček elektrod. Zelená plocha značí, že nenastal žádný nárůst ani úbytek materiálu. Modrá znamená, že data jsou pod původním povrchem (deformovaný nebo vytržený materiál), červená barva znamená, že měřené hodnoty jsou nad původním povrchem (lepený materiál z povrchu plechu, je tvořen směsí materiálu povrchové úpravy Zn + případně NIT a elektrody Cu).

Po prvních 10 svařech došlo v obou případech k menšímu zvýšení objemu. Po 100 svařech se již vytváří kráter ve střední oblasti kontaktní plochy po vytrženém materiálu. Kolem kráteru dochází ke zvýšení objemu, který lze zaznamenat na povrchu elektrody (kvůli vyšší teplotě Zn difunduje do materiálu elektrody a na kontaktní ploše se začíná tvořit Cu a Zn). Se zvyšujícím počtem svarů se zvětšuje kráter ve střední oblasti i prstenec naneseného materiálu kolem obvodu je výraznější. Tyto poznatky také potvrzuje výzkum od paní Kolaříkové Marie a spol. [32]

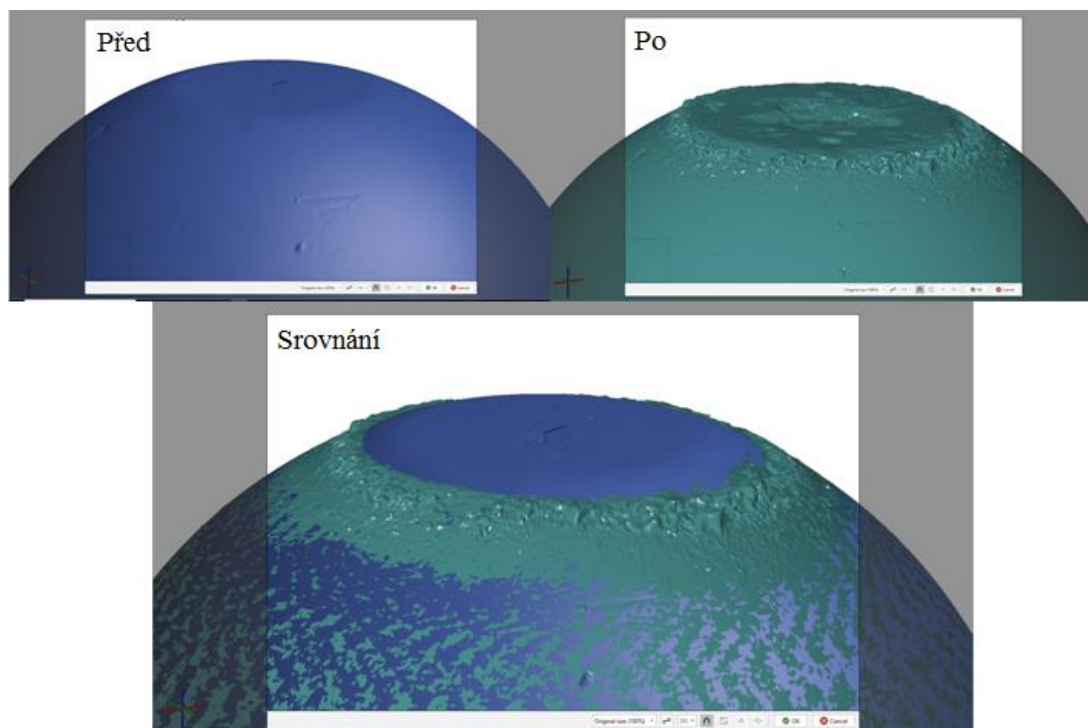
Při procesu samotného svařování plechů bylo zaznamenáno, že plechy s NIT více lepí. To způsobuje vytrhávání většího objemu materiálu, což lze porovnat v Tab. 13 při 100 svařech. Díky tomuto procesu vytrhávání odpovídá i samotný pokles svařovacího proudu, který lze vidět v předešlém grafu Graf 7. U počtu 300 svarů v Tab. 13 lze konstatovat, že průměr kontaktní plošky je u NIT větší než bez NIT. V Obr. 30 je také srovnání naskenované čepičky před svařováním a po svařování 300 svarů s povrchovou úpravou NIT, kde lze vidět detailní nárůst materiálu.

Původně byly naskenovány všechny čepičky, ale z důvodu časové náročnosti vyhodnocování a nedostatku času v rámci opatření Covid-19, byly v práci uvedeny pouze 3 naskenované čepičky.

Tab. 13 Barevná mapa odchylek dat s a bez NIT



Čísla v obrázcích znamenají počet provedených svarů.



Obr. 30 Srovnání vzorku s NIT 300

10 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo porovnat vliv povrchových úprav typu NIT na kvalitu spojů při odporovém bodovém svařování. Za tímto účelem byl navržen experiment, který je popsán v kapitole 8.

Z provedených experimentů bylo zjištěno:

- Z mechanizované zkoušky stříhem bylo zjištěno, že hodnoty maximální síly potřebné na přetržení vzorku mají mírnou tendenci se zvyšujícím se počtem svarů klesat.
- Z měření velikosti svarové čočky bylo zjištěno, že průměr svarové čočky má mírnou klesající tendenci pouze u metody NIT.
- Jako nejčastější vady byly vyhodnoceny dutiny. Jiné vady se ve svarových spojkách nevyskytovaly.
- Dále bylo zjištěno, že křivka závislosti svařovacího proudu na počtu svarů je výrazně nižší u materiálu s NIT (cca o 1,5 kA) než u materiálu bez NIT, přičemž svařovací parametry byly v obou případech nastaveny stejně. Rozptyl hodnot velikosti svařovacího proudu je u materiálu s NIT naopak větší než u materiálu bez NIT.
- Drsnost kontaktní plochy elektrodové čepičky se zvyšuje s počtem provedených svarů, kde u materiálu s povrchovou úpravou NIT se drsnost s počtem narůstajících svarů stabilizuje u hodnoty $R_a = 6 \mu\text{m}$ a u materiálu bez NIT povrchové úpravy se stabilizuje okolo hodnoty $R_a = 2,5 \mu\text{m}$.
- Z optické profilometrie svařovacích čepiček bylo zjištěno, že u povrchové úpravy s NIT se již při 100 provedených svarech vytrhává větší objem materiálu, což má za následek i zmenšení kontaktní plochy než u vzorků bez NIT (což koresponduje s výsledky z monitorování svařovacích parametrů).

11 Seznam použité literatury

- [1] KOLARÍK, Ladislav. *Svařování elektrickým odporem* [online]. Praha: ČVUT, Ústav strojírenské technologie [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz>
- [2] NEUMANN, Heinz. *Odporové svařování: Podklady pro kurz IWE*. Praha: ČVUT, Ústav strojírenské technologie, , 29.
- [3] *AMADA WELD TECH* [online]. [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.amadaweldtech.eu/>
- [4] *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [5] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování*. Praha: SNTL, 1975.
- [6] MATOUŠEK, Jan. *Nedestruktivní kontrola bodových svarů v automobilovém průmyslu*. Praha: Advanced Technology Group s.r.o., 2016.
- [7] ZHANG, Hongyan a Jacek SENKARA. *Resistance welding: Fundamentals and Applications*. London: Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-203-61639-1.
- [8] KUBÍČEK, Jaroslav, Pavla HANÁČKOVÁ a Libor MRŇA. *Hybridní spojování* [online]. In: . Tesydo, 2018 [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=580>
- [9] KUBNÝ, Jan. *Firemní materiály Continental*. Dostupné také z: <https://www.continental.com/cs-cz>
- [10] *TECNA* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.tecna.net/en/>
- [11] *DALEX* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.dalex.de/>
- [12] *MATUSCHEK* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: https://www.matuschek.de/index_en.htm
- [13] *Harms and Wende* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.harms-wende.de/en/>

- [14] *Design Weld s.r.o.* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <http://www.designweld.cz/>
- [15] *OBARA* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <http://www.obara.co.jp/en/index.html>
- [16] *Düring* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.during-welding.com/en>
- [17] *ELMA-Tech GMBH* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.elmatech-gmbh.de/index.php/en/>
- [18] *KAPKON* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.kapkon.de/en/index.html>
- [19] *Rexroth BOSCH* [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/welding-technology/index>
- [20] FOREJTOVÁ, Lucie, Ladislav KOLAŘÍK, Jan SUCHÁNEK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Tomáš PILVOUSEK. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MMSpektrum* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>
- [21] *Firemní materiály Volvo Sven Car s.r.o.* In: . Dostupné také z: <https://www.svencar.cz/>
- [22] MAZÁNCOVÁ, Eva. *Technické materiály I: Kovové materiály*. První. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.
- [23] TAMARELLI, Carrie. *AHSS 101: The evolving use of advanced high-strength steels for automotive applications*. 2011. Dostupné z: www.autosteel.org. University of Michigan.
- [24] ABUŠINOV, Alexandr. Technologie pro lehké automobilové konstrukce. *MMSpektrum* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-pro-lehke-automobilove-konstrukce.html>
- [25] MACHÁČOVÁ, Dana a Pavel MACHÁČ. *Stavba karoserií a skříní* [online]. VOŠ, SOŠ A SOU KOPŘIVNICE [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U27_Stavba_karoserii_a_skrini.pdf

- [26] ČUMPELÍK, Jiří. Povrchové úpravy v autoprůmyslu - Škoda Superb. *MMSpektrum* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-v-autoprumsly-skoda-superb.html>
- [27] KUDLÁČEK, Jan. *Úvod do navrhování povrchových úprav* [online]. Praha: ČVUT, Ústav strojírenské technologie [cit. 2020-06-19].
- [28] *New Inorganic Treatment: Product and thickness measurements* [online]. Škoda Auto a.s. and Arcelor Mittal [cit. 2020-06-19].
- [29] *ČSN EN ISO 8166: Odporové svařování - Způsob hodnocení životnosti bodových svařovacích elektrod při konstantním nastavení stroje*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [30] *ČSN EN ISO 14273: Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [31] *ESB: Žárově zinkovaná mikrolegovaná ocel podle DIN EN 10346*. Dostupné také z: <https://www.esb-group.com/en/products-din-en/hot-dip-galvanized-microalloyed-steel/>
- [32] KLAŘÍKOVÁ, Marie, Ladislav KOLAŘÍK, Vlastimil KRÁLÍK a Jan SOVA. THE TOPOGRAPHY CHANGE OF ELECTRODE TIPS AT RESISTANCE WELDING OF DEEP DRAWN STEEL DC05+ZE. *Metal*. CTU - Czech Technical University of Prague, 2020.
- [33] *Karoserie Audi Q8* [online]. In: . [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.autotecnica.org/wp-content/uploads/2018/06/A186323_large.jpg
- [34] SHEIKHI, Mohsen, Shaghayegh JADERIAN, Yousef MAZAHERI a Majid POURANVARI. *Prediction of the failure mode of automotive steels resistance spot welds* [online]. [cit. 2020-06-19]. ISSN 1362-1718. Science and Technology of Welding and Joining. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/13621718.2020.1747765>
- [35] KAPSA, Vlastimil. *Analýza parametrů kvality svarových spojů vysokopevných ocelí při stavbě karoserií*. Pardubice. 2009. Dostupné také z: http://dSPACE.upce.cz/bitstream/10195/35312/1/disertacni_prace_cz_Kapsa_2009.pdf

Disertační práce. UNIVERZITA PARDUBICE DOPRAVNÍ FAKULTA JANA
PERNERA.