



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Opotřebení elektrod při
odporovém svařování v
závislosti na typu povrchové
vrstvy svařovaných plechů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Vladislav Vorobeč

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: N 2301 Strojní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 3911T035 Výrobní a materiálové
inženýrství

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Vorobev Jméno: Vladislav Osobní číslo: 423338
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávací katedra/ústav: Ústav strojírenské technologie
Studijní program: Výrobní inženýrství
Specializace: Bez specializace

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Opotřebení elektrod při odporovém svařování v závislosti na typu povrchové vrstvy svařovaných plechů

Název diplomové práce anglicky:

Electrode wear during resistance welding depending on the type of surface layer of welded sheets

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je rozbor problematiky použití povrchových úprav v automobilovém průmyslu. Ověření vlivu vrstvy pro zlepšení tvářecích vlastností na povrchu svařovaného plechu na svařovací parametry, velikost opotřebení a na kvalitu spoje.

- Popis technologie svařování elektrickým odporem se zaměřením na výrobu automobilových karosérií
- Přehled povlaků a vrstev používaných v automobilovém průmyslu, nové trendy
- Návrh experimentu pro ověření vlivu typu finální vrstvy na svařovací parametry, opotřebení elektrod a kvalitu spoje
- Svaření zkušebních vzorků a vyhodnocení experimentu
- Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Plíva, L.: Odporové svařování. SNTL, Praha, 1975
- [2] Zhang, H., Senkara, J.: Resistance Welding: Fundamentals and Applications, CRC Press, 2nd. Edition, 2011
- [3] J. Matusiak, J. Wyciślik: resistance welding of coated steel plates in the aspect of environmental conditions. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА, No. 5-6 (753), pp 166-172, 2016
- [4] databáze WoS a Scopus

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

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

Datum zadání diplomové práce: 15.04.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 06.08.2021

Platnost zadání diplomové práce: 31.12.2021

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

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

V Praze dne: 06.08.2021

.....

Podpis autora

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat své vedoucí diplomové práce Ing. Marií Kolaříkové, Ph.D., která vždy má lidský, ochotný a vstřícný přístup, je oporou pro studenty, je úžasná docentka a férový člověk.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítu Novákovi a Ing. Františkovi Tatíčkoví, Ph.D. za provedení střižné zkoušky a cenné připomínky.

V neposlední řadě děkuji své rodině, zejména mamince a určitě rád bych srdečně poděkoval své manželce Darje za neocenitelnou podporu během celého studia.

Anotace

Speciální povrchové vrstvy jako je např. anorganický povlak na bázi sirných sloučenin, anorganický povlak na bázi solí Zn nebo na bázi kyselé vodné sloučeniny (polyelektrolyt, silan, vosk) na oceli HX180BD+ZM100 jsou určeny k zlepšení tažnosti, adhezních vlastností materiálu a zároveň k snížení znečištění nástroje během procesu lisování, zatímco vliv na následující proces odporového bodového svařování byl měl být minimální či zanedbatelný. Práce se zabývá zkoumáním vlivu speciálních povrchových úprav na svařovací proces a životnost elektrod při svařování plechů používaných v automobilovém průmyslu. Kontroluje se změna svařovacích parametrů s rostoucím opotřebením elektrod a vyhodnocuje se výsledná kvalita spoje. Práce byla realizována za finanční podpory v rámci řešení projektu SGS č. OHK2-013/19 s názvem „Výzkum, optimalizace a inovace výrobních procesů“.

Název diplomové práce: Opotřebením elektrod při odporovém svařování v závislosti na typu povrchové vrstvy svařovaných plechů

Autor práce: Bc. Vladislav Vorobeč

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

Akademický rok: 2020/2021

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 - Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

Rozsah práce: 80 stránek, 10 tabulek, 48 obrázků

Klíčová slova: automobilový průmysl, odporové bodové svařování, opotřebením svařovacích elektrod, povrchová úprava, svarová čočka

Annotation

Special surface treatments such as inorganic coating based on sulfur compounds, inorganic coating based on zinc salts and acidic aqueous compound (polyelectrolyte, silane, wax) on HX180BD+ZM100 steel are designed to improve ductility, adhesion properties of the material and at the same time to reduce tool pollution during stamping, while the impact on the following process of resistance spot welding should be minimal or unaffected. The study deals with the investigation of the special surface treatments influence on the welding process and electrode's durability during metal sheets welding in the automotive industry. With increasing electrode's wear the welding parameters change is monitoring and final quality of the welds is evaluating. This study was carried out with the financial support of the SGS project № OHK2-013/19 titled "Research, optimization and innovation of production processes".

Title of the final thesis: Electrode wear during resistance welding depending on the type of surface layer of welded sheets

Author: Bc. Vladislav Vorobev

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

Academic year: 2020/2021

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 - Department of Manufacturing Technology

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

Extent: 80 pages, 10 tables, 48 pictures

Keywords: automotive industry, resistance spot welding, wear of welding electrodes, surface treatment, weld nugget

Obsah

1	Úvod a Cíl práce	13
2	Odporové svařování	14
2.1	Odporové bodové svařování	15
2.1.1	Parametry svařování	16
3	Elektrody pro bodové svařování	17
3.1	Materiál elektrod.....	17
3.2	Rozdělení elektrod podle tvaru.....	18
3.3	Značení elektrodových čepiček	20
3.4	Opotřebenění elektrod	20
3.5	Životnost elektrod.....	21
3.6	Povrchové úpravy svařovacích elektrod.....	23
3.6.1	Použitím metody ESD (Electrospark deposition).....	23
3.6.2	Použitím pyrolytického povlaku z karbidu chrómu (PCC)	25
4	Svařovací stroje pro bodové svařování.....	26
4.1	Odporové svařovací lisy	27
4.2	Závěsné bodové svařovací zdroje.....	27
4.3	Ruční svařovací kleště	28
5	Materiály karoserií v automobilovém průmyslu	29
5.1	Oceli pro automobilový průmysl	30
5.2	Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu	35
5.3	Materiálové trendy v automobilovém průmyslu	37
6	Povlaky a povrchové úpravy oceli v automobilovém průmyslu.....	40
6.1	Žárové zinkování	41
6.2	Elektrolytické zinkování.....	42
6.3	Povlaky na bázi siluminu (Al-Si)	43
6.4	Organické a anorganické vrstvy	44

6.5 Vliv povrchových úprav na životnost svařovacích elektrod	45
7 Experimentální část.....	46
7.1 Návrh experimentu	46
7.2 Vlastnosti použitého materiálu	47
7.3 Vlastnosti elektrodové čepičky.....	50
7.4 Svařovací lis	51
7.5 Zkušební stroj	52
8 Provedení experimentu	53
8.1 Vyhodnocení výsledků z monitorování svařovacího procesu	53
8.1.1 Materiál s označením Zn	53
8.1.2 Materiál s označením SS	54
8.1.3 Materiál s označením SZ	55
8.1.4 Materiál s označením PSV	56
8.2 Porovnání výsledků testovaných materiálů	57
8.3 Výsledky z mechanizované zkoušky stříhem	59
8.4 Výsledky metalografie.....	62
8.5 Výsledky posuzování opotřebení svařovacích elektrod	63
9 Závěr	65
Seznam použité literatury	66
Přílohy	72

Seznam zkratek

ABS	Anti-lock Brake System	Anti-Blokovací Systém
Al	Aluminium	Hliník
ASF	Audi Space Frame	Audi prostorový rám
B	Borium	Bor
B	Bake hardening	Zakalená v péči
Be	Beryllium	Beryllium
BH	Bake Hardenable	Kalená ocel
C	Carbonium	Uhlík
Cd	Cadmium	Kadmium
Co	Cobaltum	Kobalt
CP	Complex Phase	Vícefázová ocel
Cr	Chromium	Chrom
CS	Commercial Steel	Nízkouhlíková ocel
Cu	Cuprum	Měď
ČSN		České technické normy
ČVUT		České vysoké učení technické v Praze
D	Hot-dip coatable	Žárově pozinkovaná
DIN	Deutsches Institut für Normung	Německý institut pro normy a standardizace
DP	Dual Phase	Dvoufázová ocel
DS	Drawing Steel	Nízkouhlíková ocel
EN	European norm	Evropská norma
EN AW	European aluminum standards	Evropské hliníkové normy
ESD	Electrospark deposition	Elektroerozivní depozice

Fe	Ferrum	Železo
FS	Forming Steel	Nízkouhlíková ocel
GT	Grand Touring	Gran Turismo
GTs01YuT		Ocel, český ekvivalent - S185
HDG	Hot Dip Galvanized	Žárové zinkování
HSLA	High Strength Low Alloy	Vysokopevnostní nízkolegovaná ocel
HSS	High Strength Steel	Vysokopevnostní ocel
HV	Vickers Hardness	Tvrdości podle Vickerse
IF	Interstitial Free	Interstitial Free ocel
IF-HS	Interstitial Free – High Strength	Interstitial Free – High Strength ocel
ISO	International Organization for Standardization	Mezinárodní organizace pro normalizaci
LSS	Low Strength Steel	Nízkopevnostní ocel
Mn	Manganum	Mangan
MS	Martensitic Steel	Martenzitická ocel
Nb	Niobium	Niob
Ni	Niccolum	Nikl
NIT	New Inorganic Treatment	Novy anorganický povlak
P	Phosphorus	Fosfor
PCC	Pyrolytic chromium carbide coating	Pyrolytický povlak z karbidu chrómu
RWMA	Resistance Welder Manufactures Association	Asociace Výrobců Odporového Svařování
S	Sulphur	Síra
Si	Silicium	Křemík
Ti	Titanium	Titan

TRIP	Transformation Induced Plasticity	Transformation Induced Plasticity ocel
TWIP	TWinning Induced Plasticity	Twinning Induced Plasticity ocel
VHSS	Very-High-Strength Steel	Pokročilá vysokopevnostní ocel
UHSS	Ultra-High-Strength Steel	Ultravysokopevnostní ocel
X	Roll condition	Válcovaná ocel
ZM		Základní Materiál
ZM	Zinc-Magnesium-Alloy	Zinko-hořčíkový povlak
ZnSO4	Zinc sulfate	Síran zinečnatý
Zr	Zirkonium	Zirconium
08 kp		Ocel, český ekvivalent - DC01

Seznam použité symboliky

A₈₀	Tažnost	[%]
d	Průměr	[mm]
Ø	Průměr	[mm]
F_{max}	Maximální síla	[kN]
I_s	Svařovací proud	[A]
ΔI	Rozdíl svařovacího proudu	[kA]
n	Počet	[-]
p	Svařovací tlak	[N.mm ⁻²]
P_s	Přítlačná síla	[N]
R	Celkový odpor	[Ω]
R_a	Drsnost	[μm]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
t	Tloušťka	[mm, μm]
t_s	Svařovací čas	[s]

1 Úvod a Cíl práce

V dnešní době karoserie automobilu běžně obsahuje kolem 5 000 bodových svarů spojujících plechy různé tloušťky. Kvůli vysokým nárokům na mechanické a pevnostní vlastnosti, neustále probíhá zlepšení kvality používaných materiálů. Výsledná kvalita odporových bodových spojů je ovlivňována také povrchovými úpravami. Než materiál s novou povrchovou úpravou bude zaveden do běžné výroby, musí být řádně prozkoumán v laboratorních podmínkách. Je potřeba se věnovat povlakům a vrstvám i z hlediska svařitelnosti a jejich vlivu na svařovací proces. Speciální povrchové vrstvy jsou v mnoha směrech prospěšné, proto se dále vyvíjejí a zmapování jejich chování a vlastností je důležité.

Cílem diplomové práce je nejenom popsání současného stavu v oblasti použití povrchových úprav v automobilovém průmyslu. Ale také určení a vyhodnocení, jak typ finální povrchové vrstvy materiálu ovlivní svařovací parametry, opotřebení elektrod a výslednou kvalitu spoje.

Diplomová práce se věnuje zmapování vlastností několika zástupců těchto povrchových vrstev, a to konkrétně: anorganický povlak na bázi sirných sloučenin, anorganický povlak na bázi solí Zn nebo na bázi kyselé vodné sloučeniny (polyelektrolyt, silan, vosk) na oceli HX180BD+ZM100. Nové moderní povlaky jsou vyvíjeny za účelem zlepšení tažnosti, adhezních vlastností materiálu a zároveň k snížení znečištění nástroje během procesu lisování. Cílem vývoje těchto nových vrstev je pozitivně ovlivnit tvářecí vlastnosti a neovlivnit svařitelnost materiálu.

Z praktického hlediska vysvětlení důležitosti tohoto měření je následující: svařovací elektrody jsou jednou z nejméně spolehlivých součástí svařovacího stroje, které mají zásadní vliv na proces svařování. Průběžná výměna elektrod, případně frézování, je častým, nežádoucím a nezbytným zásahem do výrobního procesu. Obvykle je výměna svařovacích elektrod realizována po určitém počtu svarů na známém a vyzkoušeném materiálu. Nadměrné opotřebení elektrod vede k výslednému zhoršení svarových spojů, případně je zdrojem zmetkovitosti výrobků. Proto je důležité znát vzájemné působení materiálu, zejména jeho povlaku, a svařovacích elektrod. Od tohoto výzkumu očekáváme řešení této úlohy pro výše uvedené kombinace materiál – povrchová vrstva.

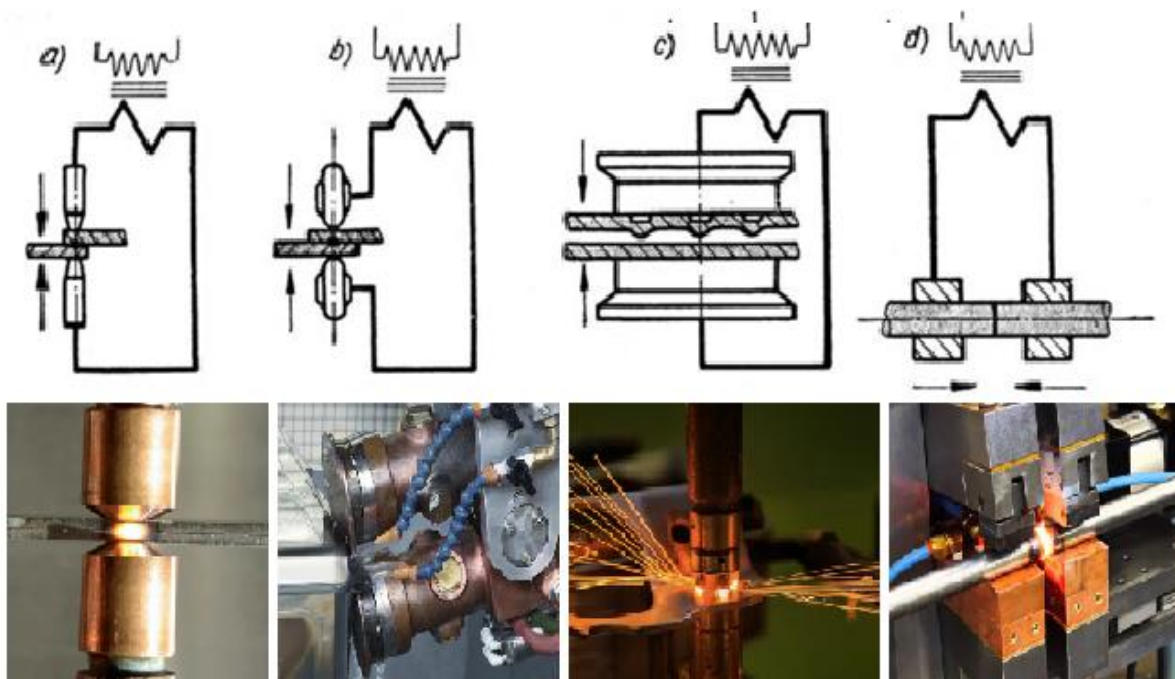
2 Odporové svařování

Elektrické odporové svařování je svařování tlakové, tzn. pro vznik svaru se působí tlakem nebo tlakem a teplem. [1] Průtokem elektrického proudu svařovaným místem se materiál svařovaných součástí ohřeje odporovým teplem, stane se tvárným, nebo se lokálně nataví, načež se materiály stlačí a tím se spojí. Zdrojem tepla je elektrický odpor v místě styku svařovaných materiálů (přechodový odpor). [2]

Mezi metody odporového svařování patří bodové a švové svařování, svařování výstupkové (bradavkové), stykové svařování a stykové svařování odtavením. Odporově lze svařit prakticky všechny druhy ocelí, a to i pozinkované nebo jinak pokovené, které se používají např. na: karosérie automobilů, plechovky konzerv nebo drátěná pletiva. Svařovat lze i plechy z hliníku a jeho slitin, ale i materiály méně používané, jako titan nebo v jaderných aplikacích zirkon. [4]

Hlavní metody odporového svařování jsou uvedené na obr. 1:

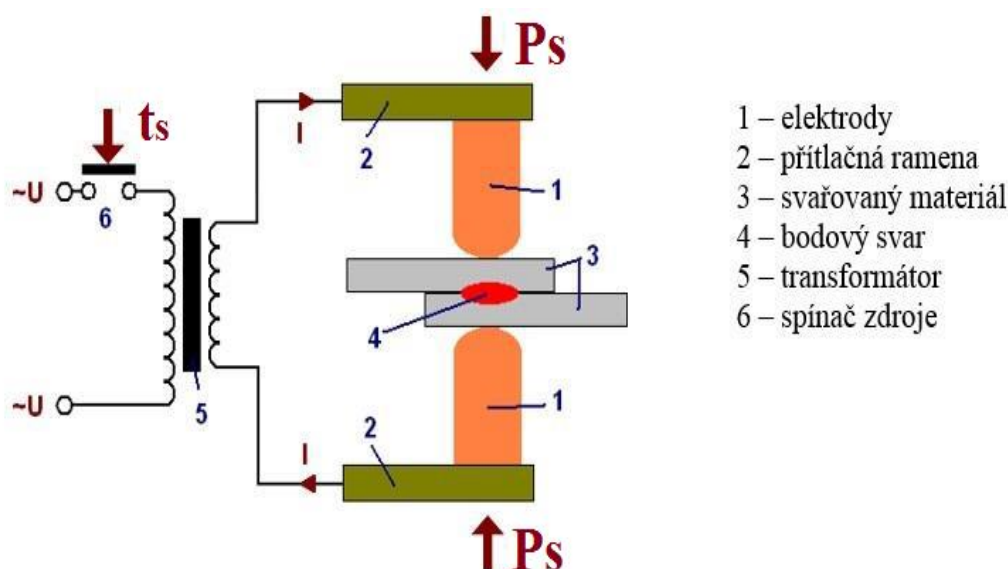
- a) bodové svařování;
- b) švové svařování;
- c) výstupkové svařování;
- d) stykové odporové svařování s odtavením.



Obr. 1 Rozdělení metod odporového svařování [5,6]

2.1 Odporové bodové svařování

Odporové bodové svařování je nejznámějším a nejvíce používaným způsobem odporového svařování. Spoj překládaných plechů je tvořen jedním nebo několika bodovými svary. Pro svařování se používají válcové duté elektrody většinou s vyměnitelnou čepičkou. Ke svaření materiálů dojde po sepnutí zdroje spínačem na dobu t_s . Nejdříve musí dojít k silnému stlačení ramen svařovacího stroje. Svařovanými stlačenými materiály začne procházet elektrický proud I_s o velké intenzitě (hodnoty řádově v kA), vzniká tak odporové teplo a části se svaří. Kovací síla působí déle než svařovací proud. Proto se jedná o metodu zařazenou do skupiny „tlakového svařování“. V místě styku materiálů se tak vytvoří bodový svar. [4]



Obr. 2 Schéma odporového bodového svařování [7]

Odporové bodové svařování se používá především pro svařování tenkých plechů v rozsahu tloušťky od 0,4 do 10 mm, ale v některých případech je možné svařovat i silnější plechy. Bodové svařování je vhodné pro automobilový průmysl díky levné výrobě spojů, vysokému podílu automatizace, menším nárokům na obsluhu a v neposlední řadě proto, že dokáže do určité míry eliminovat nepřesnosti svařovaných výlisků. Hlavní výhody bodového svařování jsou vysoká rychlost a adaptabilita pro automatizaci ve velkoobjemové a/nebo velkosériové výrobě. [3]

2.1.1 Parametry svařování

Velký význam při všech způsobech odporového svařování mají parametry svařování.

Při bodovém odporovém svařování jsou to:

- svařovací proud $I_s = 10^3$ až 10^5 A
- přítláčná síla $P_s = 500$ až $10\,000$ N
- svařovací čas $t_s = 0,04$ až 2 s

“Stejného množství tepla dodaného do svaru můžeme dosáhnout vysokým proudem a krátkým časem nebo nižším svařovacím proudem dodaným v delším čase. Prvá kombinace parametrů svařování se nazývá tvrdým režimem a vyžaduje současně i vyšší přítláčnou sílu. Druhá kombinace se pak nazývá režimem měkkým a pracuje se s nižší přítláčnou silou”. [2]

Výhody měkkého režimu: [2]

- ⊕ není potřeba stroj s velkým příkonem;
- ⊕ je možné používání elektrických vodičů s menším průměrem průřezu.

Nevýhody měkkého režimu:

- strojový čas je delší;
- svarové spoje mají větší deformace;
- struktura výsledného spoje je méně pevná;
- svařovací elektrody vyžadují častější úpravu.

Výhody tvrdého režimu:

- ⊕ krátké strojní časy;
- ⊕ jemnější struktura svarového spoje;
- ⊕ minimální napětí a deformace;
- ⊕ nižší spotřeba energie;
- ⊕ prodloužená životnost elektrod díky menšímu opotřebení.

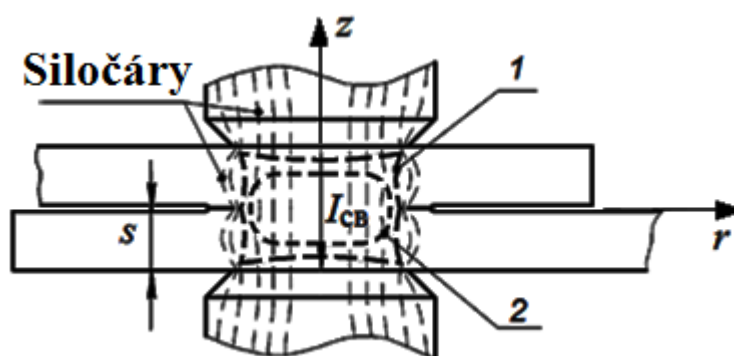
Nevýhody tvrdého režimu:

- stroje větších příkonů a silnějších konstrukcí.

Tab. 1 Svařovací parametry tvrdého a měkkého režimu [8]:

	Měkký režim	Tvrdý režim
Svařovací tlak – p	do 50 N.mm ⁻² +/-	~1000 N. mm ⁻²
Přítlačná síla – P _s	do 1000N	~2000 N
Proudová hustota	do 250 A. mm ⁻² do	~500 A. mm ⁻²
Svařovací proud – I _s	5000A	~10000 A
Svařovací čas – t _s (v periodách)	nad 0,5 s nad 25 per	~0,16 s ~8 per

Na zvoleném režimu svařování následně závisí tvar svarové čočky, viz. obr. 3.



Obr. 3 Tvar svarové čočky pro tvrdý (1) a měkký (2) režim [8]

3 Elektrody pro bodové svařování

3.1 Materiál elektrod

V současné době nejpoužívanějším materiálem elektrod pro odporové svařování je měď, respektive její slitiny. Podle RWMA (Resistance Welder Manufactures Association) materiály jsou rozdělené do dvou základních skupin A i B, které následně mají svoje podskupiny: [9, 11]

- **Skupina A – Měď a slitiny mědi:** [9]

- 1) Tepelně nezpracované slitiny mědi s vysokou elektrickou vodivostí a střední tvrdostí;
- 2) Tepelně zpracované/tvářené za studena slitiny mědi s vyšší tvrdostí;
- 3) Tepelně zpracované slitiny mědi s vylepšenými mechanickými vlastnostmi, ale s menší elektrickou vodivostí než u typu 1 a typu 2;
- 4) Speciální slitiny mědi.

- Jsou vhodné pro svařování standardních ocelových materiálů.

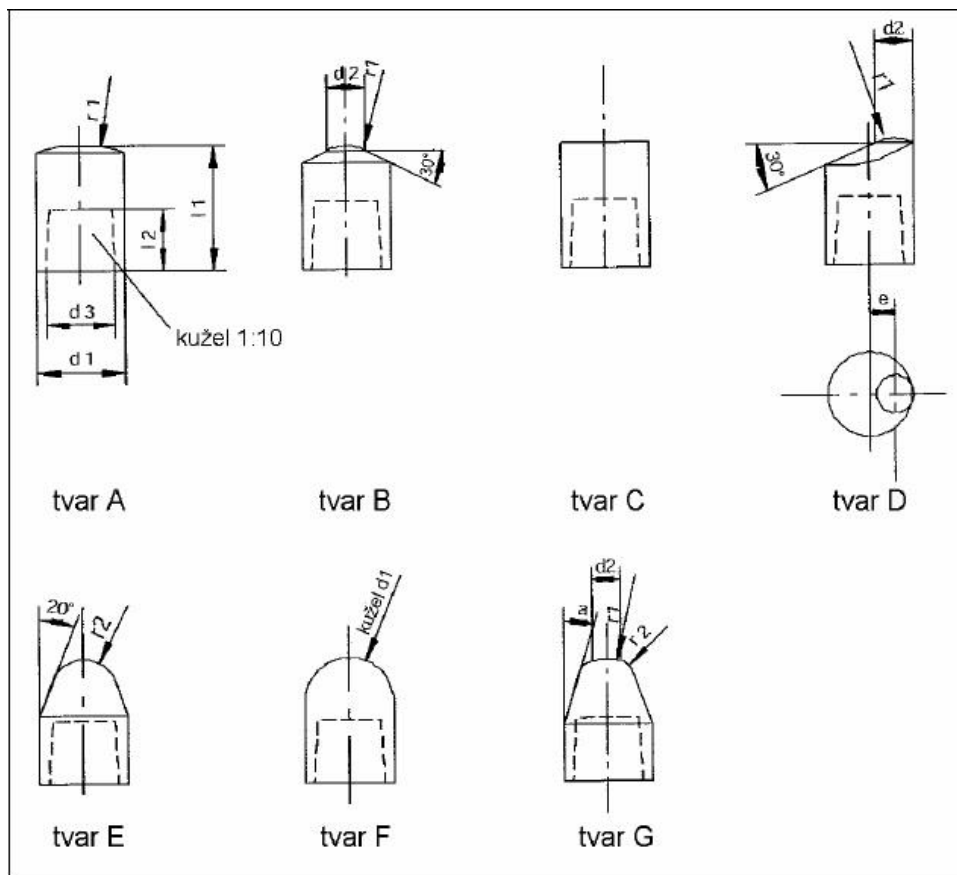
- **Skupina B – Slinuté materiály:** [9]

- 1) Slinuté materiály wolframu;
- 2) Slinuté materiály mědi a wolframu;
- 3) Slinuté materiály wolframu a stříbra;
- 4) Slinuté materiály molybdenu.

➤ Jsou vhodné pro svařování hliníku.

3.2 Rozdělení elektrod podle tvaru

Podle normy ČSN EN ISO 5182 (052678) elektrody pro odporové svařování jsou rozdělené podle tvaru A až G (obr. 4). Navíc elektrody tvaru E, F a G je možné frézovat při dosažení určitého opotřebení. Opětovným frézováním lze zvýšit životnost elektrod a také snížit ekonomické náklady. [10]



Obr. 4 Výměnné čepičky elektrod podle ČSN EN ISO 5821 [10]

Tvar elektrody musí zohledňovat použití, svařovaný materiál a proces odporového svařování (obr. 5).



Tvar A: elektroda s velkým poloměrem používaná často na svařování hliníku. Velký poloměr elektrody vytváří ideální bod na prolomení oxidů hliníku a zároveň svojí dostatečně velkou plochou dokáže regulovat velikost čochky svaru.



Tvar B: v průmyslu často využíván typ elektrody, který svým tvarem snižuje množství materiálu, který se v procesu svařování zachycoval na ploše elektrody, čímž se zpomaluje její opotřebení.



Tvar C: elektroda s plochým povrchem se využívá i při výstupkové svařování. Tvar elektrody poskytuje velkou plochu působení svařovacího tlaku a proudu při výrobě kosmetických svarů na pohledové straně plechu a vyrovnaného rozložení tepla.



Tvar D: elektroda s vyosením se používá při svarech na těžko dostupných místech blízko ohybu plechu, na svařování falců plechových boxů apod. Při instalaci elektrody třeba brát ohled na správnou orientaci špičky elektrody.



Tvar E: elektroda se zaoblenou špičkou kombinuje v sobě výhody oblé F a špičaté G elektrody, i když na menší svařovací ploše.



Tvar F: půlkulatá elektroda s velkou efektivitou, která je díky svým tvarovým vlastnostem nejoblíbenější volbou. Její zaoblení dokáže korigovat nerovnosti v nastaveních svařovacích ramen, neboť svařovací plocha se vytváří na libovolném kontaktním bodě těchto elektrod. Tento tvar se často používá na manuálních a robotických svařovacích kleštích, kde půlkulatost umožňuje svařovat plechy v různých úhlech bez přesného nastavení polohy elektrod.

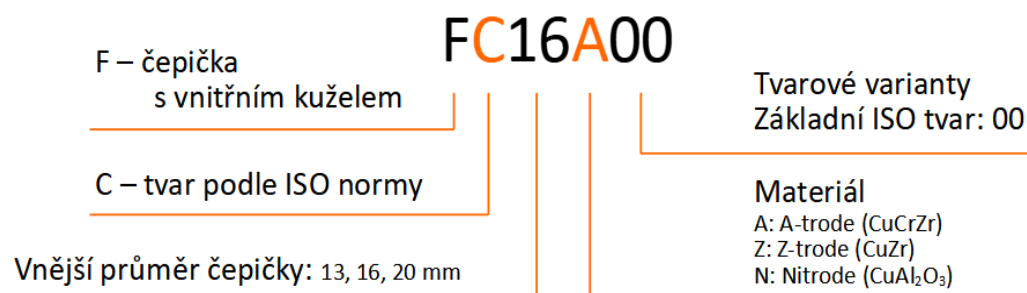


Tvar G: špičatá elektroda s všestranným využitím. [11]

Obr. 5 Přehled tvarů elektrod [11]

3.3 Značení elektrodových čepiček

Zavedené označení elektrodových čepiček je znázorněno na obr. 6.



Obr. 6 Značení elektrodových čepiček [11]

3.4 Opotřebení elektrod

Mechanismus opotřebování svařovacích elektrod při odporovém bodovém svařování je složitý vícefaktorový proces. Působením mechanického, elektrického, tepelného a metalurgického namáhání postupně dochází ke změnám tvaru kontaktní plochy elektrody, ke změně drsnosti a znečištění pracovních ploch, ke změnám mechanických i fyzikálních vlastností materiálu elektrod. V důsledku “nalepování” elektrody na svařovaný materiál a následným utržením po skončení svařovacího procesu také dochází k mechanickému poškození kontaktní plochy elektrody. Nalepená vrstva materiálu na elektrodě se vytváří již po několika prvních svarech a následně ovlivní podmínky pro průchod svařovacího proudu, kvůli čemuž dochází ke změně svařovacích parametrů celého procesu, což ve výsledku ovlivní kvalitu konečného spoje. Kvalita svarů s rostoucím opotřebováním postupně klesá, svary již nejsou symetrické a může nastat případ, že velikost svarové čočky bude menší, než je předepsaná podle normy. V takovém případě výsledný spoj je nevyhovující. Aby k takovému extrémnímu případu nedošlo během procesu výroby, je důležité vědět limitující počet svarů po kterém svařovací elektroda má projít procesem frézováním nebo musí dojít k výměně svařovacích elektrod. [12]

“Hlavní funkcí elektrod při bodovém svařování je zabezpečit spolehlivý průchod elektrického proudu svařovanými díly. „Ideální“ elektrodový materiál by měl mít tyto vlastnosti: [49]

- *vysokou elektrickou a tepelnou vodivost za normální i zvýšené teploty;*
- *dostatečnou mechanickou pevnost, aby se elektroda ani při vysokém svařovacím tlaku nedeformovala;*
- *co nejvyšší teplotu měknutí;*
- *co nejmenší sklon k legování svařovaným materiálem;*
- *velkou odolnost proti oxidaci, se zřetelem k žádoucímu malému odporu mezi elektrodou a svařovaným dílem;*
- *dobrou odolnost proti otěru za vyšších teplot;*
- *dobrou obrobiteľnosť;*
- *nízké výrobní náklady.”*

3.5 Životnost elektrod

Pod pojmem životnost elektrod se rozumí jejich schopnost udržet v určitých mezích původní rozměry a tvar kontaktní plochy; v tomto případě by kvalita svařovaných spojů neměla být nižší než přípustná podle normy.

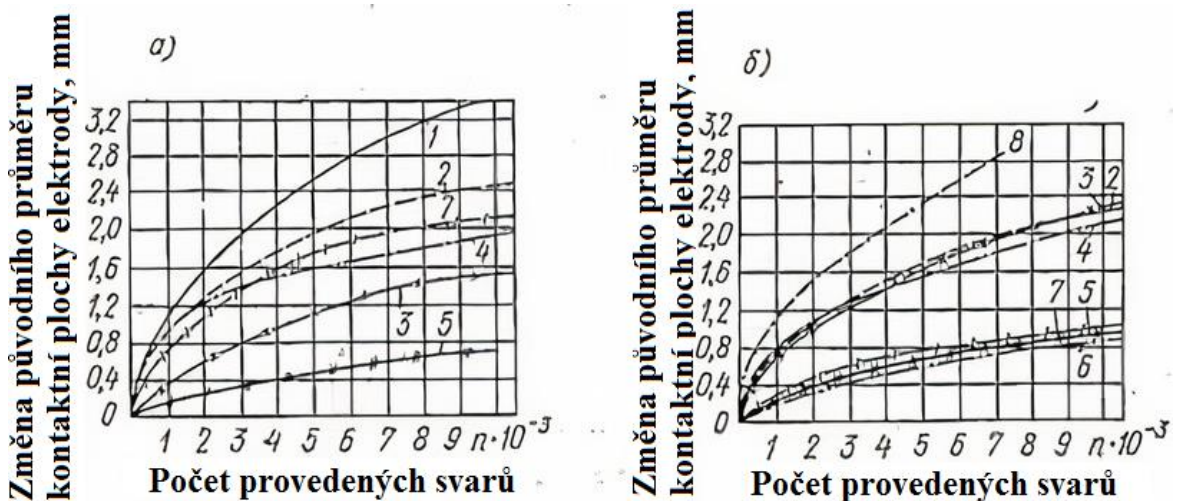
Životnost elektrod je dána mnoha faktory, z nichž hlavní jsou:

- Vlastnosti materiálu elektrod;
- Vlastnosti nanesené povrchové úpravy svařovaného materiálu;
- Teplota tání materiálu svařované součásti;
- Režim a rychlost svařování;
- Konstrukce elektrod (tvar, rozměry);
- Chlazení elektrod.

Životnost elektrod lze vyhodnotit počtem vyhovujících spojů, které lze provést bez frézování nebo výměny elektrod. Existují také studie o stanovení kritéria životností elektrod na základě změny pevnosti svařovaných bodů. Provedené experimenty ukázaly, že změna pevnosti svařovaných bodů je nedostatečně citlivá metoda, protože v daném případě ke zvětšení průměru elektrody a značnému

poklesu pevnosti výsledného spoje dojde jenom při výrazném zvětšení kontaktní plochy elektrody. [12]

Na obr. 7 jsou znázorněny závislosti změny původního průměru kontaktní plochy elektrod na provedeném počtu svarů při svařování **a) nízkouhlíkových** a **b) nerezových ocelí**. Zkouška byla provedena na stroji MTP-75 při svařování vzorků o tloušťce 1,5+1,5 mm. Režimy svařování zajišťovaly výrobu spojů vyhovující kvality, jejichž pevnost byla periodicky kontrolována zkouškou stříhem.



Obr. 7 Závislost změny průměru kontaktní plochy elektrody na počtu svarů pro různé chemické složení elektrod při svařování a) nízkouhlíkové oceli, b) nerezové oceli [13]

Na grafech jsou označeny elektrody s následujícím chemickým složením:

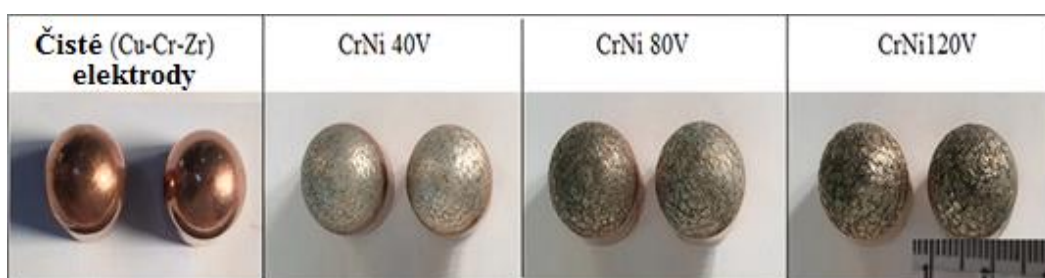
- | | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| 1) Cu; | 5) Cu — 0,21%Cr — 0,2%Zr; |
| 2) Cu — 1,1%Cd; | 6) Cu — 1,5% Ni — 0,35%Be — 0,06%Ti; |
| 3) Cu — 0,4%Cr; | 7) Cu — 2,58%Co — 0,5%Be; |
| 4) Cu — 0,31%Cr — 0,3%Cd; | 8) Cu — 0,75%Cr — 0,28%Be. |

Výsledky zkoušek ukázaly, že při svařování nízkouhlíkové oceli byly nejodolnější elektrody ze slitiny mědi s chromem a slitiny mědi s chromem a zirkonem. Při svařování nerezové oceli nejvyšší odolnost ukázaly měděné elektrody s Ni a Be a také elektrody ze slitin mědi s chromem a zirkonem. Ve výzkumu "Životnost elektrod u bodového odporového svařování" autor došel k tomu, že tato data plně souhlasí s vlastnostmi uvedených slitin při zvýšených teplotách. [13]

3.6 Povrchové úpravy svařovacích elektrod

3.6.1 Použitím metody ESD (Electrospark deposition)

Nejenom svařovaný materiál může mít povrchovou úpravu pro zlepšení vlastností, ale také i samotné svařovací elektrody. Autoři EMRE H. E. a BOZKURT B. ve svém výzkumu "Vliv Cu-Cr-Zr elektrod s povrchovou úpravou Cr-Ni na mechanické vlastnosti svarových spojů při odporovém bodovém svařování oceli TRIP800" uvádí, že vlastnosti a životnost elektrod s chemickým složením **Cu-Cr-Zr** lze zlepšit i povlakováním, při kterém se na povrch elektrod nanáší kov **Cr-Ni** metodou **ESD** (Electrospark deposition) při 40, 80 a 120V, viz obr. 8.

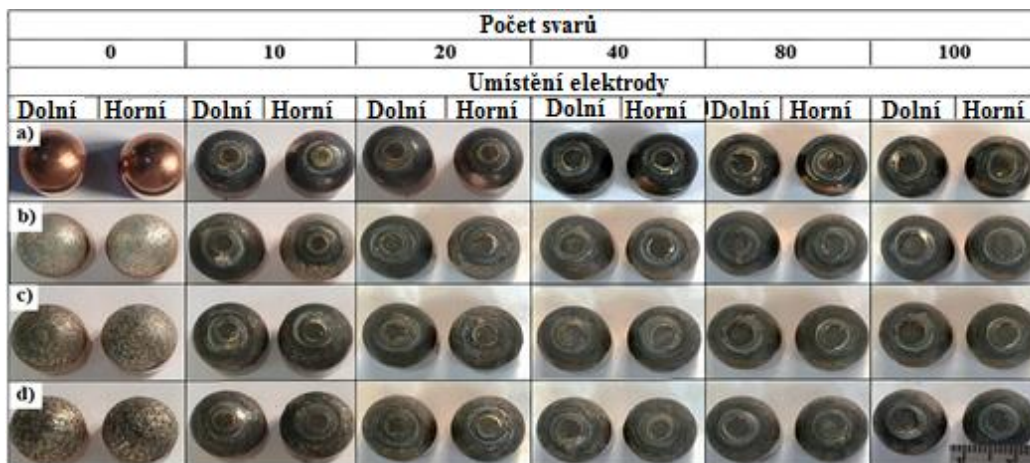


Obr. 8 Přehled elektrodových čepiček v závislosti na typu povrchové úpravy [14]

Tloušťka nanesené vrstvy metodou ESD se pohybovala v rozmezí 62 až 93 μ m, s tím, že vrstva nanesená za vyššího napětí 120V byla o něco tenčí.

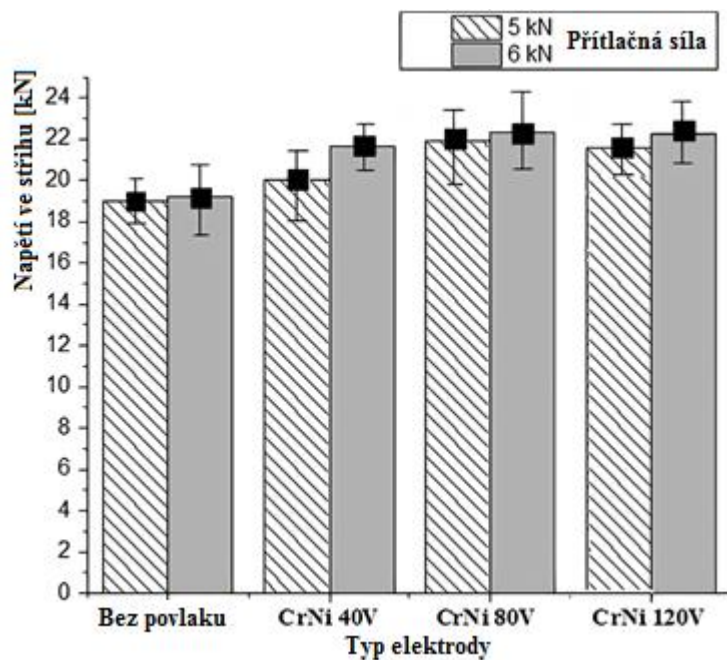
Elektrický odpor čistě měděné elektrody byl velmi nízký, blíží se k 0. Odporu měděných elektrod potažených vrstvou Cr- Ni při 40, 80 a 120V, byly stanoveny jako 2,406 m Ω , 2,922 m Ω , respektive 2,874 m Ω . Vyšší elektrický odpor povrchové úpravy způsobil zvýšení celkového odporu sestavy během následujícího procesu odporového bodového svařování.

Následně pro každý typ elektrod byl proveden určitý počet svarů na oceli TRIP800, přehled opotřeбенých elektrodových čepiček je na obr. 9.



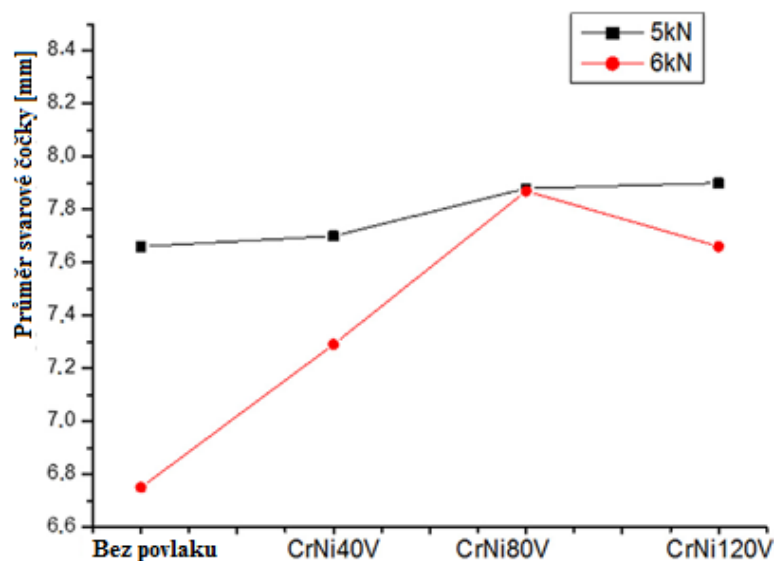
Obr. 9 Opotřeбенé elektrody: a) Čisté Cu-Cr-Zr elektrody, b) Elektrody ESD 40V, c) Elektrody ESD 80V, d) Elektrody ESD 120V [14]

Pevnost ve stříhu svarů spojených měděnými elektrodami s úpravou ESD Cr-Ni byla stanovena jako větší než u svarů spojených čistými měděnými elektrodami. Tento výsledek byl způsoben povrchovou úpravou elektrod, která zvýšila přechodový odpor. Na kontaktní ploše elektrody se vytvořilo více tepla. Větší tepelný příkon zvýšil průměr svarové čočky a výsledný spoj byl pevnější, viz. obr.10.



Obr. 10 Výsledky střížné zkoušky [14]

Spoje svařované měděnými elektrodami s úpravou ESD mají větší průměr svarové čočky. Průměr svarové čočky se zvětšuje s vyšším napětím použitým během nanášení povrchové vrstvy.



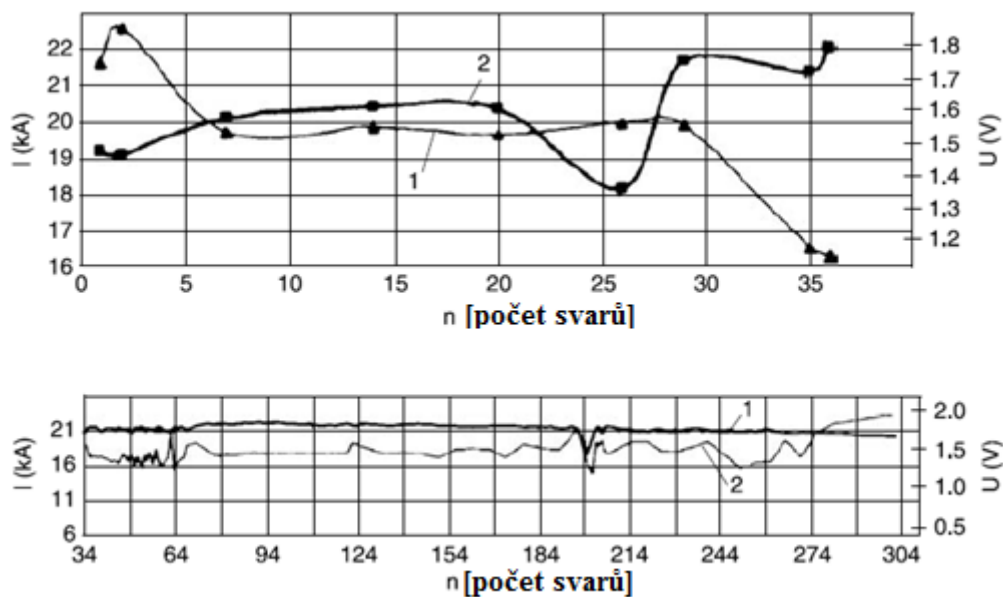
Obr. 11 Závislost průměru svarové čočky na typu finální povrchové úpravy svařovací elektrody pro přítlačnou sílu 5 a 6 kN [14]

3.6.2 Použitím pyrolytického povlaku z karbidu chrómu (PCC)

Pyrolytický povlak z karbidu chrómu (PCC) je technologie pro ochranu rychle opotřebitelných částí výrobních zařízení pracujících v extrémních podmínkách. PCC povlaky výrazně snižují adhezi materiálů i při zvýšených teplotách. Například při tvorbě kaučukových součástí se horká guma nelepí na litinové matrice s PCC povrchovou úpravou. [15]

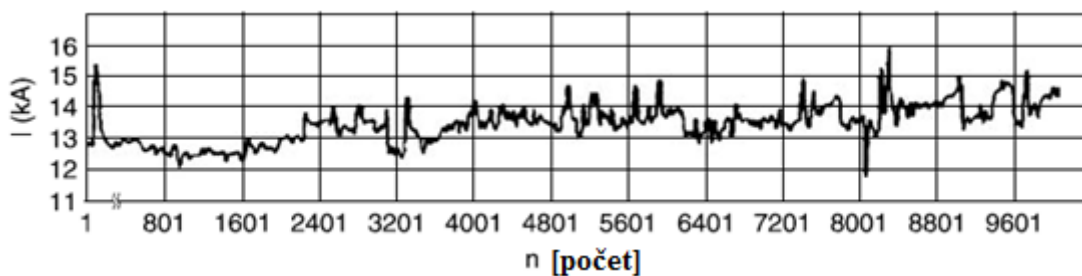
Životnost elektrod s pyrolytickým povlakem z karbidu chrómu byla zkoumána na vzorcích z pozinkované oceli **GTs01YuT** (český ekvivalent – **S185**) 0,7+0,7mm, a oceli **08 kp** (český ekvivalent - **DC01**) 0,8+0,8mm od firmy NLMK.

Následně experimentálně byla zjištěna závislost svařovacího proudu a poklesu napětí na počtu svarů pro ocel GTs01YuT s použitím svařovací elektrody (1) s povlakem z karbidu chrómu, (2) bez povlaku (obr. 12).



Obr. 12 Závislost svařovacího proudu a poklesu napětí na počtu svarů pro ocel GTs01YuT s použitím svařovací elektrody (1) s povlakem z karbidu chrómu, (2) bez povlaku [16]

A následně pro ocel **08 kp** s povlakem z karbidu chrómu byla zjištěna závislost svařovacího proudu na počtu svarů pro až 10 000 jednotlivých bodových spojů (obr. 13).



Obr. 13 Závislost svařovacího proudu na počtu svarů pro ocel 08 kp s použitím svařovací elektrody s povlakem z karbidu chrómu [16]

Autoři MEN'SHIKOV G.A., VLÁSENKO A.N., NEVROVSKII V.A. & VASIN V.A. ve svém výzkumu došli k tomu, jak je patrné z výše uvedených grafů, že elektrody s povlakem z karbidu chromu na povrchu mají výrazně vyšší odolnost proti opotřebení a difúznímu přenosu hmoty. Závislost svařovacího proudu na počtu svarů je rovnoměrně narůstající. Pro materiál 08 kp s použitím svařovací elektrody s povlakem z karbidu chrómu do počtu svarů 1500 závislost proud – počet svarů je téměř konstantní a po překročení oblasti 1500 svarů má mírně rostoucí průběh a to až do konce životnosti elektrody.

4 Svařovací stroje pro bodové svařování

V současné době stroje pro odporové bodové svařování je možné rozdělit na tři základní kategorie:

- Odporové svařovací lisy;
- Závěsné bodové svařovací zdroje;
- Ruční svařovací kleště.

Existuje celá řada výrobců, které nabízí široký sortiment strojů a příslušenství pro odporové bodové svařování, např. :

- DALEX;
- TECNA;
- OBARA Corporation;
- Düring;
- Kapkon;
- HARMS and WENDE;
- Matuschek;
- Amada Weld Tech.

4.1 Odporové svařovací lisy

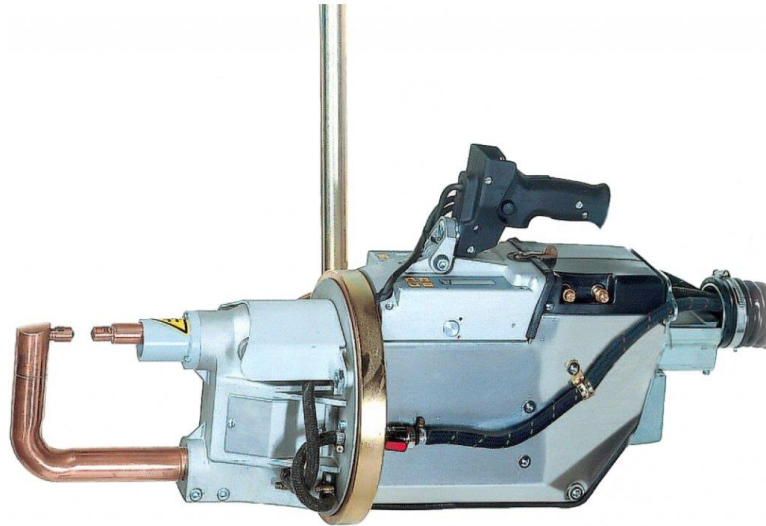
Odporové svařovací lisy jsou vhodné pro použití ve všech výrobních podnicích, kde je požadován vysoký výkon při svařování oceli, hliníku či jiných kovů. Jsou vhodné pro plechy a páskový materiál celkové tloušťky až 12 mm. Na obr. 14 je uveden příklad odporového svařovacího lisu firmy DALEX.



Obr. 14 Lis svařovací bodovací DALEX PL 40 [17]

4.2 Závěsné bodové svařovací zdroje

Závěsná bodovka je kompaktní svařovací zařízení, ke kterému lze připojit jednu nebo dvojici svařovací kleště. Je určena ke svařování dílů, které jsou rozměrné a nejsou svými tvary vhodné pro svařování běžnými stabilními odporovými svařovacími stroji. Široké uplatnění nachází především v automobilovém průmyslu. [18] Příklad daného zdroje je znázorněn na obr. 15.



Obr. 15 Závěsná bodovka TECNA 3323 16kVA TE300 typ C bez ramen [19]

Vzduchem ovládané závěsné bodovací kleště s integrovanou řídicí jednotkou jsou určeny pro náročné nasazení ve výrobních provozech. Má vysoký výkon, kompaktními rozměry a nízkou hmotností, což umožňuje svářet i komplikovanější díly na menším pracovním prostoru, Díky tomu s nimi lze snáze manipulovat a tím je i práce přesnější a produktivnější. [19]

4.3 Ruční svařovací kleště

Lehké přenosné ruční bodovací svařovací kleště jsou vhodné pro autoopravárenství, drobné zámečnické práce a montáž tenkých ocelových plechů, jako je například montáž kovového nábytku. Silnější ruční bodovací kleště dokážou spojit plechy do tloušťky až 2,5+2,5mm (obr. 16).



Obr. 16 Ruční bodovací kleště TECNA 7900 [20]

5 Materiály karoserií v automobilovém průmyslu

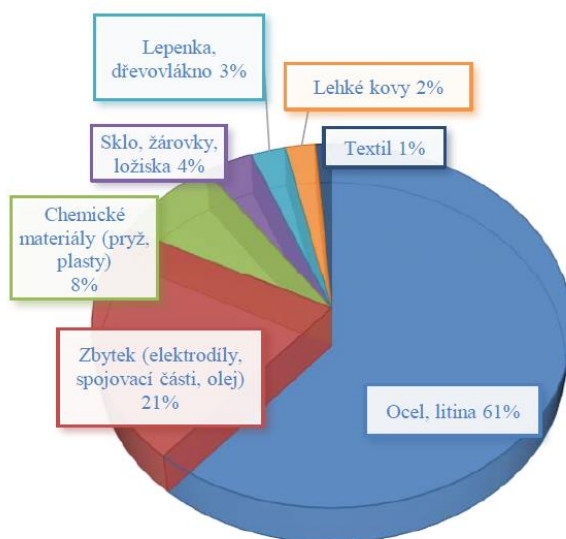
Při výrobě automobilů je bezpečnost jedním z nejdůležitějších požadavků. Z jedné strany karoserie vozu musí být pevná pro ochranu zdraví řidiče a cestujících v případě dopravní nehody, avšak z druhé strany z hlediska spotřeby paliva a ekologičnosti preferujeme karoserii lehkou. Kombinace těchto dvou uvedených faktorů musí zahrnovat moderní a inovativní materiály.

Další požadavky na karoserii jsou [21]:

- nízký aerodynamický odpor;
- odolnost proti korozi a opotřebení;
- nízké výrobní náklady;
- maximální unifikace dílů;
- nízké náklady na opravu;
- univerzální přizpůsobení dílů stávajícím technologickým postupům (lisování, svařování atd.);
- dlouhá životnost;
- atraktivní vzhled a design.

Nejčastěji se používají nepovlakované ocelové plechy, pozinkované ocelové plechy, hliníkové plechy a plasty. Výběr materiálu tak výrazně ovlivňuje především cena a měrná hmotnost materiálu. Hliníková karoserie je sice ekonomicky méně výhodná, technologicky náročnější na zpracování, ale je stále až o 43 % lehčí než karoserie ocelová. I proto se vyvíjejí moderní vysokopevnostní ocelové materiály, aby automobilová karoserie měla co nejnižší možnou hmotnost a mohla konkurovat karoserii hliníkové. Na svařitelnost mají také vliv různé povrchové úpravy, konverzní povlaky i různé typy procesních maziv, která ve svarovém kovu vytvářejí póry v důsledku vypařování, takže svařovací proces je nutné vhodným způsobem upravit. [22]

Následující graf znázorňuje zastoupení jednotlivých materiálů v současném automobilovém průmyslu (obr. 17). Z hlediska odporového bodového svařování jsou zajímavé zejména materiály kovové.



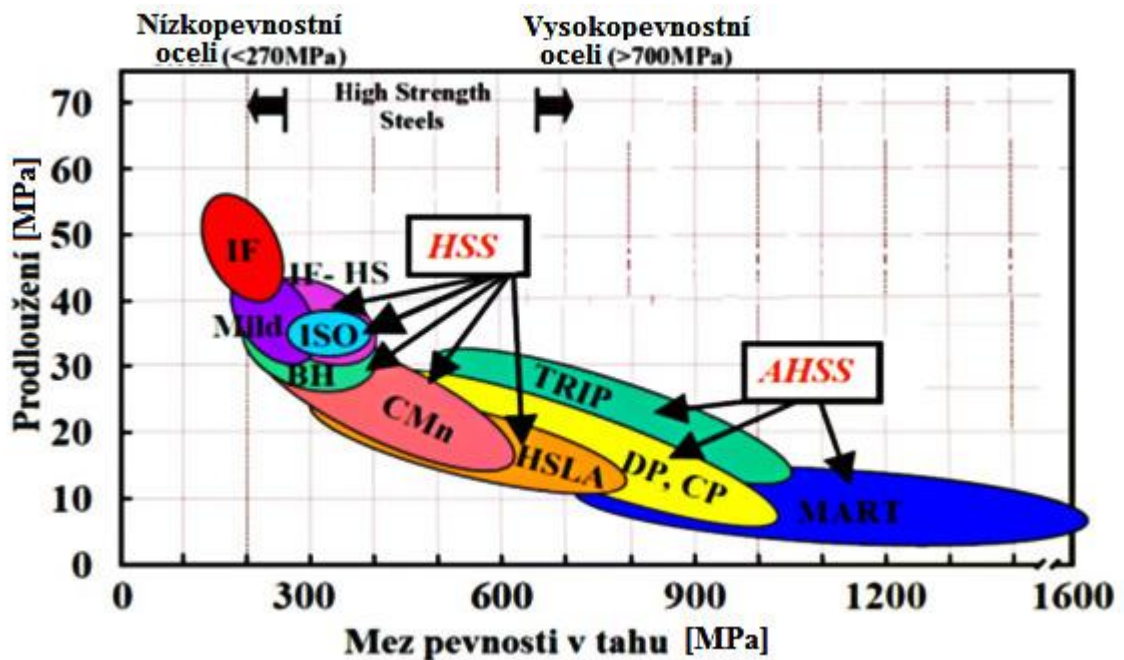
Obr. 17 Materiálový podíl karoserii [23]

5.1 Oceli pro automobilový průmysl

Stále nejpoužívanějším materiálem pro výrobu karoserií je **ocel**, protože má následující vlastnosti:

- vysokou pevnost;
- dobrou tažnost (tvárnost);
- jednodušší svařitelnost než u slitin a lehkých kovů;
- nižší výrobní náklady.

Z hlediska automobilového průmyslu je především důležité rozdělení ocelí podle pevnosti (obr. 18). Ještě na konci minulého století největší zastoupení v konstrukci vozů měla nízkopevnostní ocel (LSS). Zatímco v dnešní době se používají především vysokopevnostní a pokročilé vysokopevnostní oceli. Přehled ocelí, jejich specifické vlastnosti a oblasti použití v karoserii automobilu jsou uvedené v tab. 2.



Obr. 18 Rozdělení ocelí dle mezi pevnosti tahu [24]

Tab. 2 Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl [22, 25, 26, 27, 28]:

Skupina, podskupina a označení	Specifické vlastnosti	Použití
1) Nízkopevnostní oceli (Low Strength Steel- LSS):		
➤ IF (Interstitial Free) oceli	extrémně vysoká tažnost; $R_m = 120-290$ MPa	nárazníky, blatníky, dveře, kapota, víko kufru a střecha
➤ Mild Steels (CS, DS, FS) (nizkouglikové oceli)	velká hmotnost; $R_m = 310$ MPa	dříve karosářské plechy
2) Vysokopevnostní oceli (High Strength Steel - HSS):		
➤ IF-HS (Interstitial Free – High Strength) oceli	zpevněné přísadou Mn, Si a P; vynikající hlubokotažnost; $R_m = 340-400$ MPa	složité součásti vysoké pevnosti
➤ BH (Bake Hardenable) oceli	zpevnění žháním; $R_m = 300-360$ MPa	panelové díly: vnější díly bočních dveří, střecha, víko kufru, nárazníky, kapota

<p>➤ HSLA (High Strength Low Alloy) oceli</p>	<p>velmi nízký obsah uhlíku C= max 0,08%; vysoká plasticita; o 20-30% lehčí než běžné uhlíkové oceli; R_m =420-490 MPa</p>	<p>konstrukční, výztužné díly dveří, nárazníků a nosných částí karoserie; dynamicky namáhané díly podvozku; náročné výlisky</p>
<p>3) Pokročilé vysokopevnostní oceli (Very-high-strength steels- VHSS):</p>		
<p>➤ DP (Dual Phase) oceli</p>	<p>výborná pevnost a tažnost; vysoký koeficient zpevnění; vynikající odolnosti proti iniciaci a šíření únavových lomů; nedochází k teplotnímu stárnutí; R_m =600-700 MPa</p>	<p>automobilové konstrukční a bezpečnostní díly (podélné nosníky, A, B, C, D sloupky, prahy dveří, výztuhy střech a podlah, boční rámy karoserie, přední nárazníkové konstrukce, příčné nosníky)</p>
<p>➤ CP (Complex Phase) oceli</p>	<p>vysoká hodnota meze kluzu při zachování hodnoty meze pevnosti; R_m = >780 MPa</p>	<p>díly jednoduchých tvarů, kde má ocel pouze malou deformaci (dveřní lišty, příruby sedadel)</p>
<p>➤ TRIP (Transformation Induced Plasticity) oceli</p>	<p>vynikající pevnost a tažnost; nízký stupeň legování; vysoká absorpční energie a únavová pevnost; R_m = 690-800 MPa</p>	<p>konstrukční a bezpečnostní díly (příčné a podélné nosníky, výztuhy pro B sloupky a nárazníky)</p>
<p>➤ TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli</p>	<p>velmi jemná mikrostruktura; vysoký obsah Mn (17-</p>	<p>pro deformační zóny karoserie (B sloupek a boční výztuhy</p>

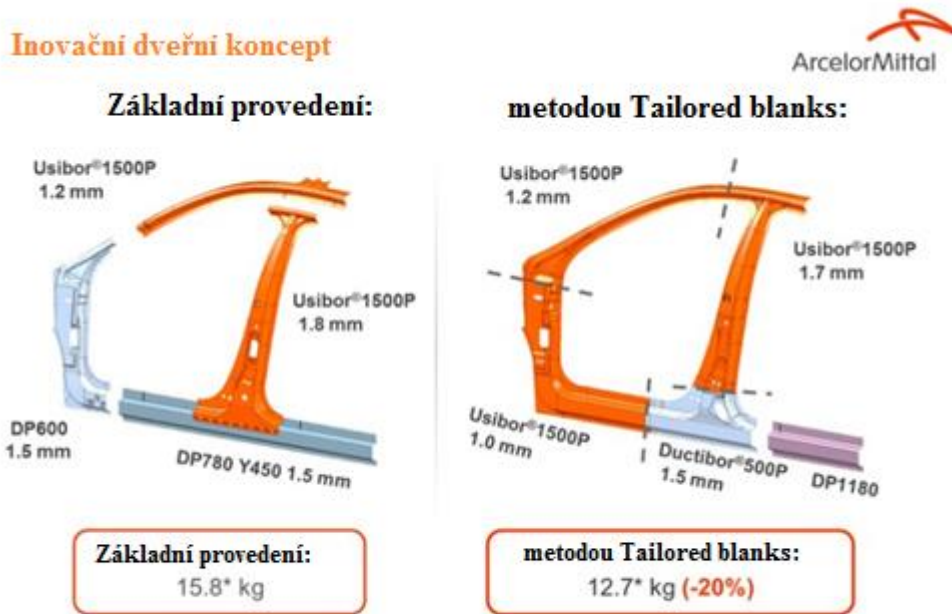
	24 %); extrémní hodnoty tažnosti při velmi vysoké pevnosti; $R_m = 1140 \text{ MPa}$	konstrukce)
4) Ultravysokopevnostní oceli (Ultra-high-strength steels, UHSS):		
➤ MS (Martensitic Steel) oceli	nejvyšší úroveň meze pevnosti v tahu; přiměřená tvárnost i při extrémně vysokých pevnostech; $R_m = 1200-1400 \text{ MPa}$	bezpečnostní prvky se zvýšenou odolností proti nárazům (části předního a zadního nárazníku, boční prahové výztuhy, výztuhy dveří, boční rámy karoserie a střešní příčník)

Jeden ze způsobů jak ušetřit hmotnost karoserie vozu je použití metody **Tailored blanks**. Složitý svařenec je sestaven z několika druhů ocelí o rozdílné pevnosti a tloušťce, viz. obr. 19. Pomocí této metody je možné mít v určité konkrétní oblasti materiál požadované pevnosti a tloušťky, což ve výsledku pomůže ušetřit hmotnost.

Další výhody metody Tailored blanks jsou [30]:

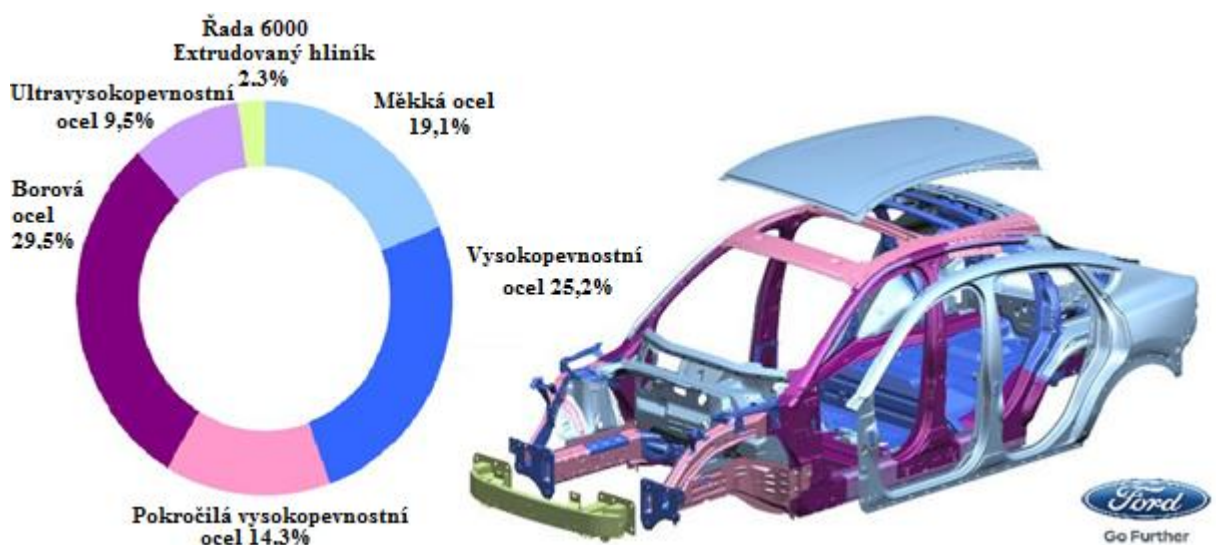
- ✓ Lehká konstrukce: správný materiál na správném místě snižuje celkovou hmotnost dílu;
- ✓ Snížení nákladů: vysoce kvalitní a drahé materiály se používají pouze tam, kde je to nezbytně nutné;
- ✓ Vyšší absorpce energie při nárazu: v oblastech s vysokým požadavkem na bezpečnost lze použít materiál s vyšší pevností;
- ✓ Vylepšené korozní vlastnosti díky eliminaci překrývajících se spojů;
- ✓ Lepší tvárné vlastnosti.

Příklad použití metody Tailored blanks je znázorněn na obr. 19. Díky této metodě se povedlo snížit hmotnost dílu až o 20% beze ztrát pevnostních charakteristik.



Obr. 19 Názorný příklad použití metody Tailored blanks [30]

Jako moderní ukázkou využití ocelí v automobilovém průmyslu můžeme uvést Ford Mustang Mach-E roku 2021, ve kterém největší procentuální podíl má vysokopevnostní bórová ocel a to až 29,5% (obr. 20).



Obr. 20 Materiálový koncept karoserie modelu Ford Mustang Mach-E 2021 [31]

5.2 Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu

Vozidla neustále požadují snižování spotřeby paliva a jiných zdrojů energie alternativních pohonů. Proto stále požadujeme lehčí konstrukce při stavbě karoserie. Náhrada oceli za slitiny hliníku v osobních vozidlech nabízí způsob, jak zvýšit výkon, snížit spotřebu paliva a snížit emise při zachování nebo zlepšení bezpečnostních charakteristik. Avšak slitiny hliníku mají i nevýhody [32]:

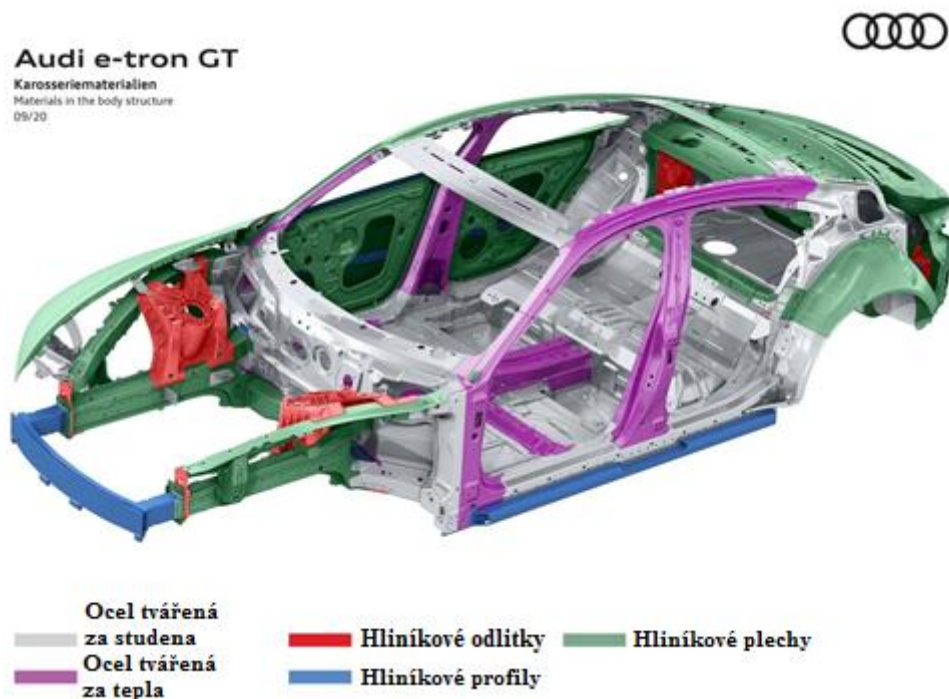
- Ekonomicky náročný a složitý proces svařování;
- Vyšší výrobní a provozní náklady;
- Nižší pevnost než u moderních ocelí.

Tab. 3 Rozdělení slitin hliníku pro automobilový průmysl [33, 34]:

Mezinárodní označení podle ČSN EN 573-1	Specifické vlastnosti	Použití
EN AW-2014	velmi pevná slitina používaná pro konstrukční součásti; vzhledem k relativně vyššímu obsahu mědi má nižší odolnost proti korozi	ABS, tlumiče, ojnice
EN AW-5022	vysoce pevný a vysoce tvárný materiál využívaný pro díly karoserie	kapoty, střechy, dveře, sloupky, podlahové plechy, zadní nárazníky
EN AW-5110A	slitina s lesklým povrchem, dobrá tažnost a odolnost proti korozi	lišty, reflexní panely, odstíny žárovek světlometů
EN AW-5154	vysoká pevnost, dobrá tvářitelnost a odolnost proti koroznímu praskání při namáhání	kola, součásti podvozku
EN AW-5182	dobrá tvářitelnost a odolnost proti korozi	protiprachové kryty, rámy sedadel, pouzdra vzduchového filtru

EN AW-6060	pevná, zakalená slitina s vysokou tvářitelností	kapoty, zadní nárazníky, přední nárazníky, sloupky, kryty kol, střechy, dveře
EN AW-6063	výborné vlastnosti tváření, svařitelná, odolná vůči korozi, elektro-chemicky lze upravit do lesku a anodizovat, pro nejvyšší dekorativní nároky	lišty, rámy sedadel, brány nákladních vozů, střešní zábradlí, potrubí
EN AW-7204	slitina pro svařované konstrukce; pevnost ve svařované části přirozeným stárnutím se obnovuje téměř na stejnou hodnotu jako původní	součásti řízení, příčníky, brzdové pedály, zvedáky

Na obr. 21 je ukázka použití materiálu ze slitin hliníku (červená, modrá a zelená barva) při konstrukci karoserie vozu Audi e-tron GT z roku 2020.



Obr. 21 Konstrukce karosérie Audi e-tron GT, 2020 [35]

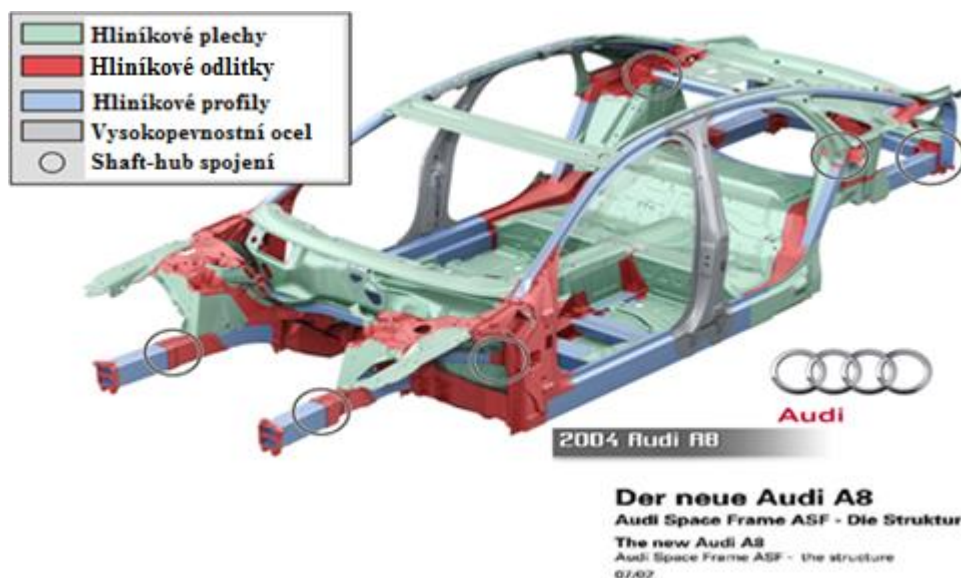
5.3 Materiálové trendy v automobilovém průmyslu

Ještě na konci minulého století celá karoserie vozu byla vyrobena z oceli. Slitiny hliníku začala při hromadné výrobě karoserií osobních automobilů jako první využívat Audi od roku 1994, kdy byl uveden na trh první sériově vyráběný vůz v celo-hliníkové karosérii Audi A8, viz. obr. 22. Hliníková karosérie s označením ASF byla tuhá rámová konstrukce o váze 249 kg, která byla skoro o 40 % lehčí, než při výrobě stejné karoserie z oceli. Pevnost a tuhost karosérie odpovídala pevnosti oceli LSS a HSS.



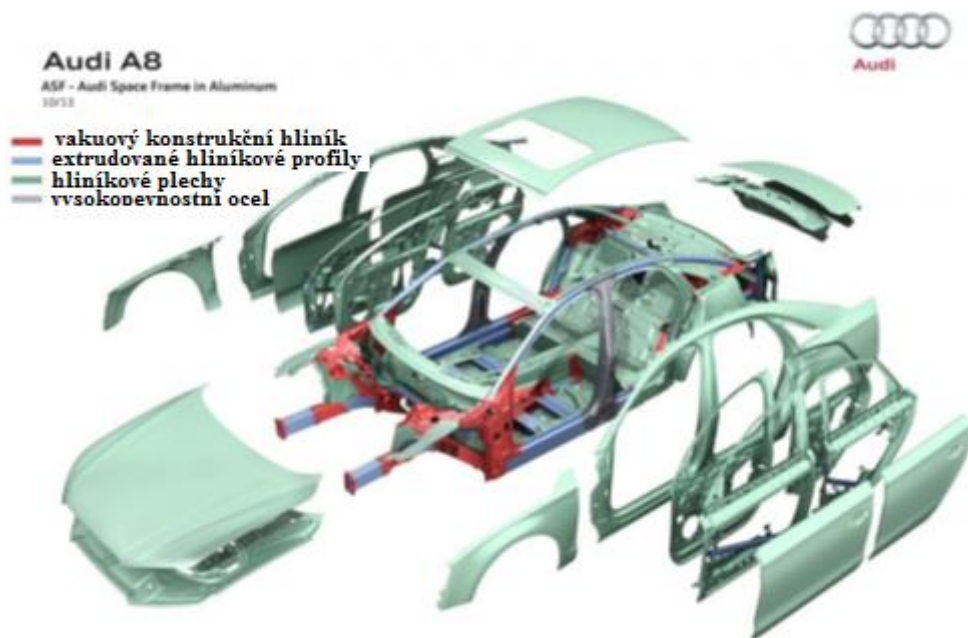
Obr. 22 Rámová karoserie Audi A8 1. generace, 1994 [36]

Po úspěchu první karoserie z hliníku se myslelo, že budoucnost v automobilovém průmyslu patří slitinám hliníku a ocel s časem se přestane používat. Ve skutečnosti to dopadlo jinak. Následuje názorná ukázka trendového vývoje materiálů v automobilovém průmyslu na příkladu jednotlivých generací výše uvedené karosérie Audi A8.



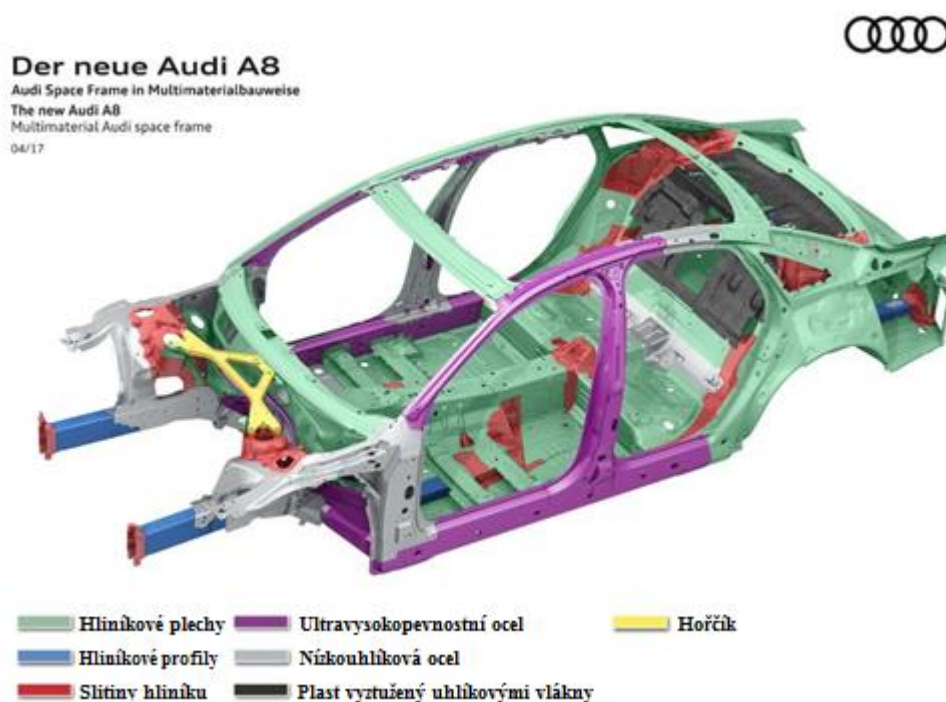
Obr. 23 Karoserie Audi A8 2. generace, 2002 [37]

Již u druhé generace Audi A8 z roku 2004 B- sloupky, jako prvky s vysokým požadavkem na bezpečnost byly vyrobeny z vysokopevnostní oceli, viz. obr. 23. U třetí generace karosérie koncept zůstal podobný jako u druhé (obr.24).



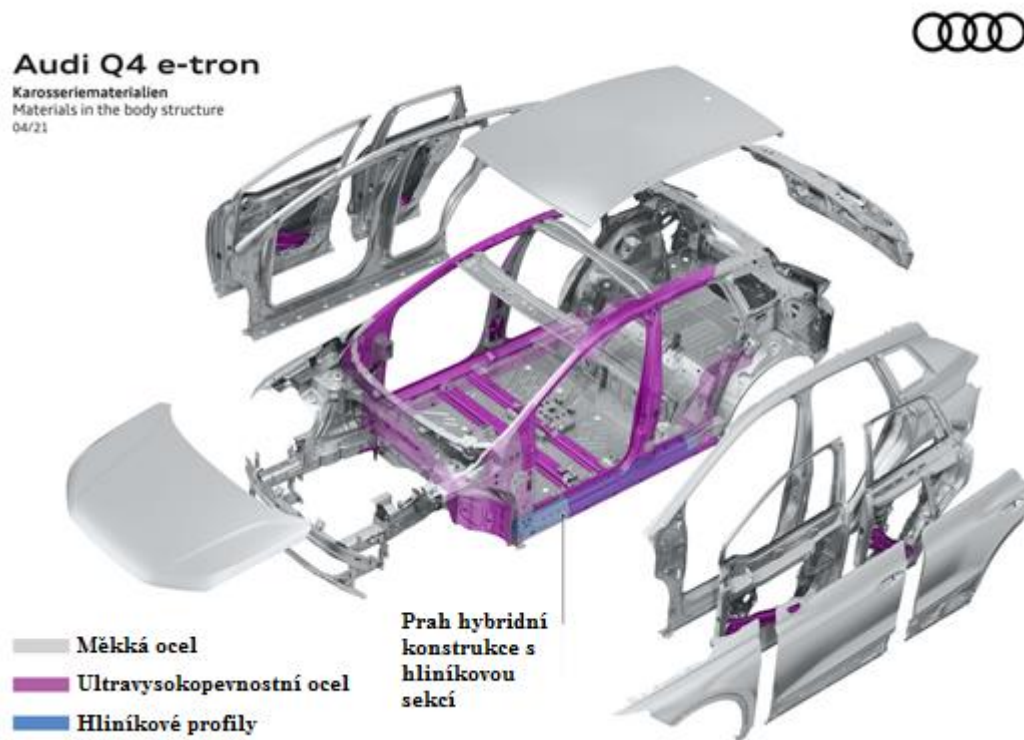
Obr. 24 Karoserie Audi A8 3. generace, 2013 [38]

Ale v roce 2017 Audi oznámila návrat prvků z oceli v konstrukce karosérie Audi A8 4. generace. Přibyly tak prvky z ultra-vysokopevnostní oceli (fialová barva) pro zvýšení celkové bezpečnosti vozu.



Obr. 25 Karoserie Audi A8 4. generace, 2017 [38]

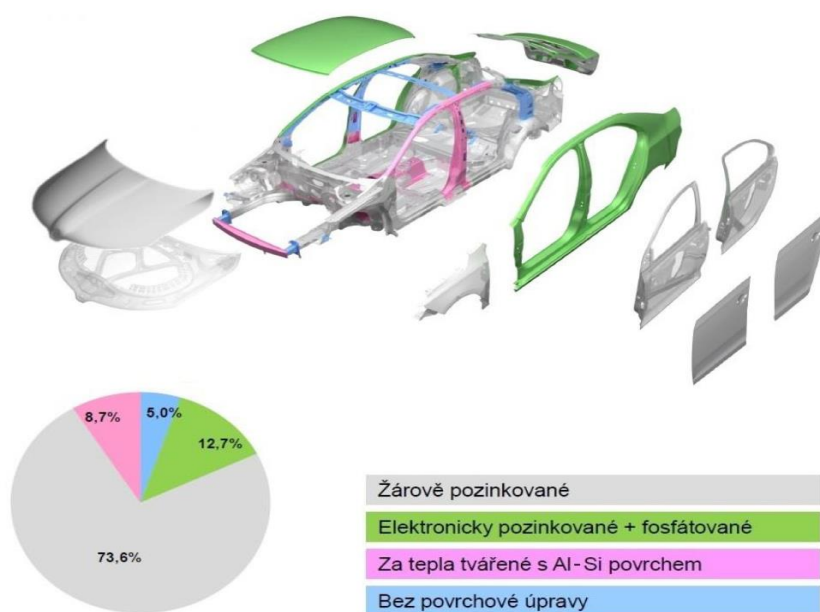
A když se třeba podíváme na úplně nejnovější koncept Audi Q4 e-tron z roku 2021 (obr. 26), tak vidíme, že množství prvků z ultra-vysokopevnostní oceli má ještě větší zastoupení, což znamená že balance bezpečnost- hmotnost se neustále obnovuje a znovu posuzuje s časem a s vývojem modernějších a kvalitnějších materiálů.



Obr. 26 Materiálový koncept karoserie Audi modelu Q4 e-tron, 2021 [39]

6 Povlaky a povrchové úpravy oceli v automobilovém průmyslu

“V současné době neexistuje výrobce automobilu, který by při výrobě karoserie nepoužíval povrchové úpravy plechů. Základní funkcí povrchových úprav plechů je v první řadě zamezení koroze a tím zvýšení životnosti karoserie. Dále zlepšení morfologie povrchu k ulpění maziva potřebného pro tvářecí operace. Požadavky na kvalitu povlaků současně vedou k trvale rostoucím nárokům na kvalitu, tvařitelnost a užité parametry zpracovávaných plechů. V automobilovém průmyslu je neustálá snaha zlepšovat jak vlastnosti povlaků, tak i metody jejich přípravy. Povlak musí splňovat řadu požadavků na funkci. Musí být schopen přijímat mazivo, jeho morfologie musí zamezovat odtékání maziva, během tvářecího procesu nesmí dojít k narůstání třecích ploch v přímém styku a v neposlední řadě nesmí docházet k odtrhávání mazivového filmu na povrchu. Povlakovaný plech pak musí být schopen odolávat vysokým kontaktním tlakům při dosednutí lisovacích nástrojů”. [26]



Obr. 27 Povrchové úpravy karoserie Škoda Octavia III [40]

Nejrozšířenější použití v automobilovém průmyslu mají povrchové úpravy na bázi zinku, viz. obr 27. 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.

Povlaky a povrchové vrstvy v automobilovém průmyslu můžeme rozdělit na následující kategorie:

- Žárové zinkování;
- Elektrolytické zinkování;
- Povlak na bázi siluminu (Al-Si);
- Organické a anorganické povlaky.

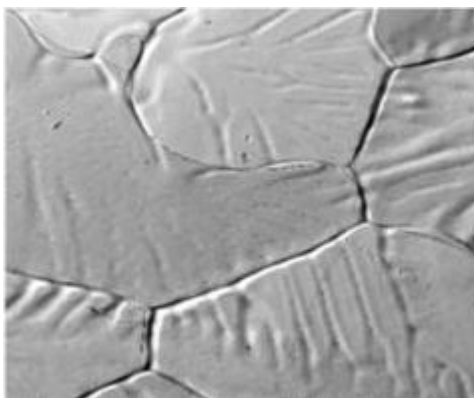
6.1 Žárové zinkování

Ochranný zinkový povlak se vytváří ponořením povlakovaného dílu do roztaveného zinku, označení v angličtině HDG (Hot Dip Galvanized). Pro dosažení kovově čistého povrchu se před procesem zinkování provádí předúprava (odmaštění, zbavení okují a rzi, moření). Jen kovově čistý povrch po vložení do lázně reaguje se zinkem. Vzniká několik fází na přechodu ocel-zinek. Železo difunduje do zinkové vrstvy. Díky tomu vzniká velmi pevné adhezí spojení povlaku a základního materiálu.[22]

Výhody žárového zinkování: [41,42]

- úbytek zinku pouze 1-3 mikronů/rok, což vede k dlouhé životnosti dílu;
- zvýšená korozní odolnost;
- další nátěry či úprava není potřeba;
- dobrá svařitelnost;
- rovnoměrný povlak na celém povrchu a také na hranách;
- nízké výrobní náklady;
- možnost kombinace s dalšími povlaky.

Morfologie neupraveného povlaku žárového zinku je znázorněna na obr. 28.



Obr. 28 Morfologická struktura neupraveného žárového zinku [22]

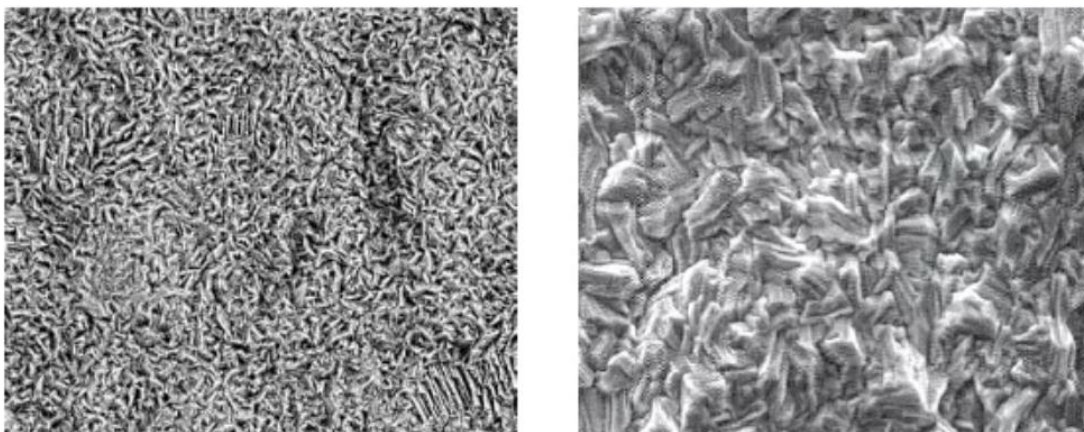
6.2 Elektrolytické zinkování

Galvanické neboli elektrochemické zinkování je elektrolytický děj. Při tomto procesu se na elektrovedivé materiály (katoda) elektrochemicky vyloučí zinkový povlak (anoda). Pro zvýšení korozní odolnosti je povlak zinku ošetřen pasivací, případně utěsněním.

Výhody elektrolytického zinkování: [43]

- možnost vytváření velmi tenké vrstvy;
- možnost vytváření vrstvy pouze z jedné strany dílu;
- konstantní tloušťka povlaku na celém povrchu;
- proces neovlivňuje původní mechanické vlastnosti materiálu, zejména jeho hlubokotažnost;
- lesklý povrch.

Morfologie galvanického povlaku zinku je znázorněna na obr. 29.



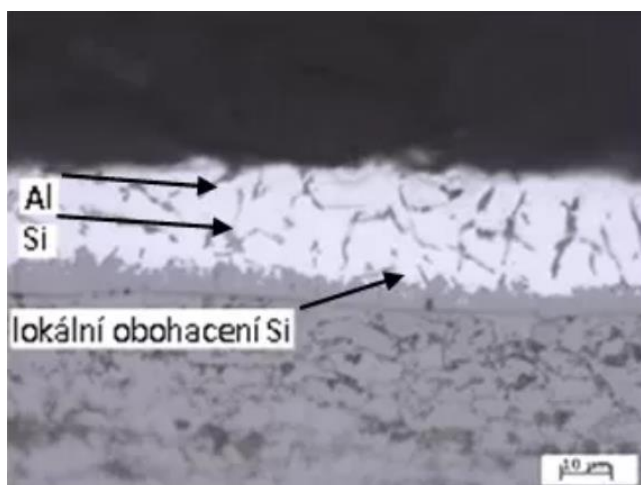
Obr. 29 Morfologická struktura galvanického povlaku zinku [22]

6.3 Povlaky na bázi siluminu (Al-Si)

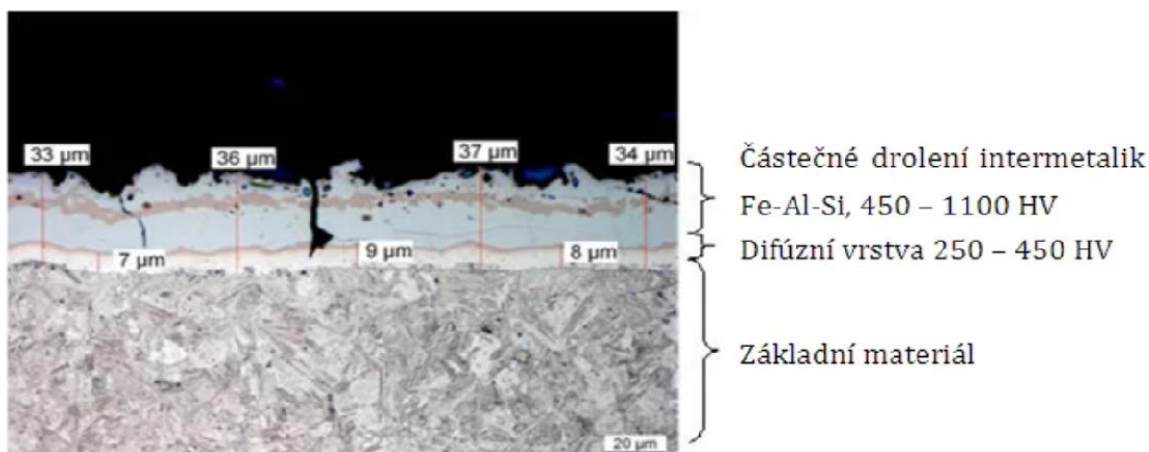
Povlak na bázi silumin Al-Si se používá v automobilovém průmyslu pro tvářené za tepla vysokopevnostní oceli jako je např. mangan-borová martenzitická ocel 22MnB5. Tento povlak chrání plech před vysokoteplotní oxidací, zabrání tak tvorbě okují, které vznikají při tvářeni za vysokých teplot (850 – 950 °C). Díly s povlakem Al-Si, které projdou procesem tvářeni již není potřeba zbavovat okují, což výrazně ušetří jak čas výroby tak i finanční náklady s tím spojené, protože se eliminují následné procesy tryskání a moření. V neposlední řadě tento povlak chrání materiál proti korozi za nízkých teplot.

Chemické složení povlaku je 90% Al + 10% Si s místním obohacením Si, tloušťka povlaku se pohybuje v rozmezí 30 – 50 μm , povlak má lesklý povrch. [44, 45]

Morfologická struktura povlaku Al-Si před a po procesu tvářeni je zobrazena na obr. 30, 31.



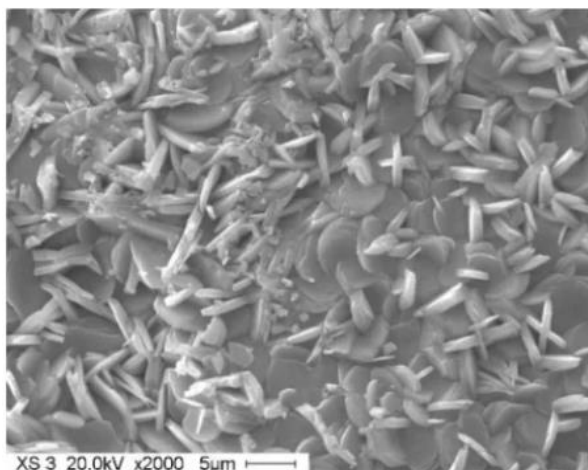
Obr. 30 Složení povlaku Al-Si před procesem tvářeni [22]



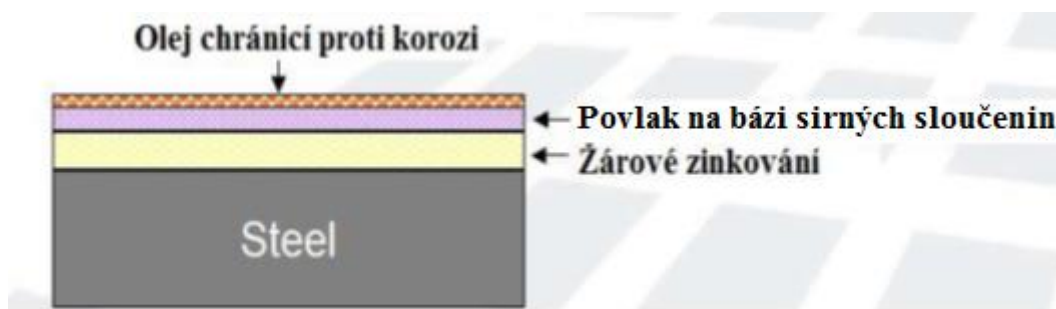
Obr. 31 Struktura vrstvy Al-Si a rozložení tvrdosti po tvářeni za tepla [22]

6.4 Organické a anorganické vrstvy

Pro žárově zinkované plechy existuje řada dalších úprav, jako jsou anorganické a organické vrstvy. Jeden z nejznámějších typů anorganické vrstvy je povrchová úprava na bázi sírných sloučenin. Jedná se o síran zinečnatý $ZnSO_4$, který je přidáván do zinkovací vany. Vznikne tak tenká vrstva ležící na povrchu povlaku zinku (obr 32, 33). [22]



Obr. 32 Žárový zinkový povlak s vrstvou $ZnSO_4$ na povrchu [22]



Obr. 33 Ocelový pozinkovaný plech s vrstvou $ZnSO_4$ v příčném řezu [22]

Povrchová úprava na bázi sírných sloučenin má následující výhodné vlastnosti:

- Snižuje znečištění nástrojů během procesu tváření;
- Má snížený koeficient tření, díky čemuž dochází k zlepšení tažnosti;
- Povrchová úprava je minimálně závislá na množství oleje a má nízkou citlivost na druh oleje.

Organické vrstvy jsou podrobněji rozebrány v praktické části diplomové práce.

6.5 Vliv povrchových úprav na životnost svařovacích elektrod

1) Žárový povlak zinku

Autoři HU X., ZOU G., DONG J., LEE M., a JUNG J. ve své práci došli k tomu, že při svařování oceli s galvanickým povlakem životnost svařovací elektrody je delší v případě, když tloušťka galvanického povlaku je větší. Při svařování oceli s galvanickým povlakem dosahujícím 11,4% hmotnosti základního materiálu životnost elektrody byla zvýšena o 110% ve srovnání s povlakem obsahujícím 9,6% hmotnosti ZM. Odůvodněno to bylo tím, že delší životností elektrod byla způsobena nalepováním jednotlivých vrstev zinku na povrch elektrod, které by mohly sloužit jako bariéra zabraňující vytržení mědi z povrchů elektrod, což způsobilo delší životní cyklus. [46]

2) Povrchová úprava na bázi sirných sloučenin

V roce 2015 MALKOV A. ve své bakalářské práci dospěl k tomu, “že povrchová vrstva na bázi sirných sloučenin neovlivňuje zásadně životnost svařovacích elektrod. Dokonce při svařování plechů s povrchovou úpravou $ZnSO_4$ prokázaly elektrody životnost delší: 2608 bodových svarů u plechů s povrchovou úpravou $ZnSO_4$ a 2005 bodových svarů u plechů bez této úpravy”. [47]

Zatímco v roce 2020 HOLEŠ D. ve své diplomové práci experimentálně zjistil, “že u povrchové úpravy na bázi sirných sloučenin se již při 100 provedených svarech vytrhává větší objem materiálu, což má za následek i zmenšení kontaktní plochy elektrod než u vzorků bez výše uvedené vrstvy” a “drsnot kontaktní plochy elektrodové čepičky se zvyšuje s počtem provedených svarů, kde u materiálu s povrchovou úpravou na bázi sirných sloučenin se drsnot s počtem narůstajících svarů stabilizuje u hodnoty $Ra = 6 \mu m$ a u materiálu bez dané povrchové úpravy se stabilizuje okolo hodnoty $Ra = 2,5 \mu m$ ”. [48]

7 Experimentální část

7.1 Návrh experimentu

Cílem experimentu bylo porovnat různé typy vrstev mezi sebou z hlediska svařitelnosti a kvality a geometrie spojů.

1) Nejprve byla provedena optimalizace svařovacích parametrů pro lis DALEX PMS 11-4 pro odporové bodové svařování na materiálu **HX180BD+ZM100** a svařovací parametry byly pro všechny typy plechů nastaveny na stejné hodnoty a to: svařovací čas $t = 240$ ms, svařovací proud $I = 7,0$ kA (24%), přitlačná síla elektrod $P = 2,4$ V.

Průměr svarové čočky byl kontrolován zkouškou stříhem a vždycky byl větší, než minimální přípustný průměr **2,9 mm** podle normy $d = \sqrt{3,5 \cdot t}$, kde t = tloušťka plechu a tvar svaru (svarové čočky) měl být co nejvíce symetrický. Otisky elektrod byly mělké a pravidelné, a zároveň nebyly větší než 20 % tloušťky plechu. Průvary svarové čočky do každého plechů byly v rozmezí mezi 20 a 80 % tloušťky plechu.

2) Pro opotřebení čepiček byl určitý počet svarů proveden na velkém plechu pro následující počty svarů: **1, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300**. Po dosažení požadovaného opotřebení čepiček pro sady s počtem svarů **25 až 300** byly svařeny **12** zkušebních vzorků o rozměrech **45 x 125 mm** (**11 ks** vzorku– střížná zkouška, **1-** metalografie). Např.: pro sadu s označením “50” svary 1 až 44 byly umístěné na velký plech, svary 45 až 56 byly umístěné na jednotlivé plechy, s tím, že svar s označením 56 byl určen pro metalografii a 45-55 pro zkoušku stříhem. Průběžně se sledovalo jestli materiál měl tendenci se přilepit k svařovací elektrodě (to znamená, že plech z elektrody spadl vlastní vahou, ale při silném přilepení bylo třeba použít hrubou sílu k odtržení plechu od elektrody) a jestli jemně nebo silně nebo je vidět hoření elektrického oblouku.

Důležité je, že z každé vyrobené sady elektrodových čepiček je vhodná pro provedení experimentu především horní elektroda, protože na rozdíl od svářecího robota, manuálním posouváním plechů v průběhu experimentu dochází k obroušování dolní elektrody, což ve výsledku může ovlivnit čistotu experimentu.

3) Na elektromechanickém testovacím stroji **LabTest Model 5.100SP1** bylo nastaveno jmenovité zatížení **100 kN** a provedeny následné mechanizované zkoušky stříhem 11 vzorků z sad s počtem svarů 25 až 300.

- 4) Pro každý vzorek byla vyhodnocena maximální síla F_{max} [kN] potřebná na přetržení svarového spoje.
- 5) Následně byl změřen průměr svarové čočky pro jednotlivé vzorky.
- 6) Pro sady s počtem svarů 25 až 300 bylo provedeno metalografické zkoušení pro 1 vzorek z každé sady.
- 7) Pomocí mikroskopu byla provedena vizuální kontrola opotřebení svařovacích elektrod.
- 8) Závěrečné vyhodnocení naměřených dat.

7.2 Vlastnosti použitého materiálu

Materiál HX180BD je zároveň zinkovaná plně uklidněná nízkouhlíková ocel s feritickou základní mikrostrukturou. Patří do skupiny vysokopevnostních ocelí (HSS). Využívá na vnější pohledové části karoserie (střecha, kapota, dveře).

Pro experimenty byla zvolena stejná ocel HX180BD s povlakem zinku, s tím, že jednotlivé plechy se lišily právě finální povrchovou vrstvou.

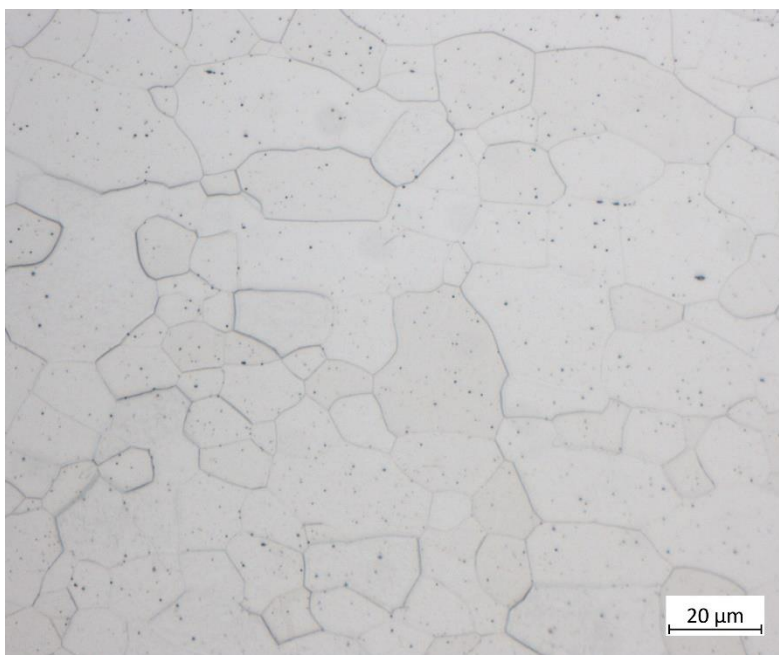
Pro experiment byly použity ocelové pozinkované plechy s celkovou tloušťkou $t = 0,7$ mm a označením:

- 1) HX180BD+ZM100 (dále **Zn**);
- 2) HX180BD+ZM100+Anorganický povlak na bázi sirných sloučenin (dále **SS**);
- 3) HX180BD+ZM100+Anorganický povlak na bázi solí Zn (dále **SZ**);
- 4) HX180BD+ZM100+Anorganický povlak na bázi kyselých vodných sloučenin (polyelektrolyt, silan, vosk) (dále **PSV**).

Kde označení znamená:

- **X**= roll condition = válcovaná ocel;
- **B**= bake hardening = zakalená v péči;
- **D**= hot-dip coatable = zároveň pozinkovaná;
- **ZM**= Zinc-Magnesium-Alloy = zinko-hořčíkový povlak.

Morfologická struktura materiálu HX180BD+ZM100 je znázorněna na obr. 34



Obr. 34 Morfologická struktura HX180BD+ZM100

Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu HX180BD+ZM100 jsou uvedeny v tab. 4, 5 a 6.

Tab. 4 Chemické složení materiálu HX180BD+ZM100 [50]:

	min. [%]	max. [%]
C (uhlík)	-	0,06
Si (křemík)	-	0,5
Mn (mangan)	-	0,7
P (fosfor)	-	0,06
S (síra)	-	0,025
Al (hliník)	0,015	-
Nb (niob)	-	0,09
Ti (titan)	-	0,12

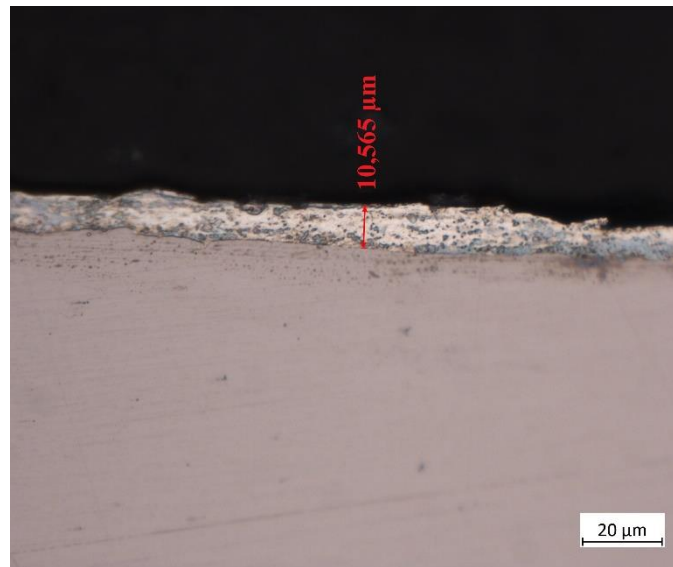
Tab. 5 Mechanické vlastnosti materiálu HX180BD+ZM100 [50]:

	Hodnota
Mez kluzu R_e min./max. [MPa]	180-240
Mez pevnosti - R_m min./max. [MPa]	290-360
Tažnost - A_{80} min. [%]	34

Tab. 6 Tloušťka zinko-hořčíkového povlaku ZM100 [50]:

	Hodnota
Tloušťka [μm]	8
Rozsah [μm]	5-11
Hustota [g/cm^3]	6,2-6,6

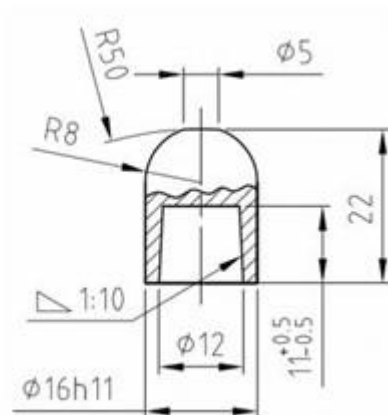
Na obr. 36 je znázorněn materiál HX180BD+ZM100 v příčném řezu, tloušťka zinko-hořčíkového povlaku ZM100 odpovídá vlastnostem, uvedeným v tab. 6.



Obr. 35 Ocel HX180BD+ZM100 v příčném řezu

7.3 Vlastnosti elektrodové čepičky

V průběhu experimentu byly používány kované elektrodové čepičky pro odporové bodové svařování typ **39D 1978-2** s průměrem upínací části $\varnothing 16$ mm a s průměrem kontaktní plochy 5 mm, z materiálu A2/2 - CuCr1Zr, viz obr. 34. Chemické složení elektrodové čepičky je uvedeno v tab. 7.



Obr. 36 Výkres elektrodové čepičky typ 39D 1978-2, $\varnothing 5$ mm [51]

Tab. 7 Chemické složení elektrodové čepičky typ 39D 1978-2 [51]:

	Hodnota [%]
Cu (měď)	98,98
Cr (chrom)	0,9
Zr (zirkonium)	0,12

7.4 Svařovací lis

Pro provedení experimentu a vytváření svarových spojů byl použit svařovací odporový lis DALEX PMS 11-4 se středofrekvenční 13-ti dobou řídicí jednotkou s 64 svařovacími programy, typ jednotky MEGA 1 MF 13Z64P QSF/S. Chlazení stroje bylo zajištěno oběhovým uzavřeným chladicím zařízením PL 80/100 Cool-3, o chladicím výkonu 2,7 kW. Oběhové chladicí zařízení bylo vybaveno digitální kontrolou teploty chladicí kapaliny. Údaje jsou odpovídající ISO 669 a DIN 44753. Svařovací lis je umístěn v laboratoři výuky svářečských technologií na ČVUT v Praze (obr. 37).



Obr. 37 Svařovací lis DALEX PMS 11-4

Tab. 8 Technické údaje lisu DALEX PMS 11-4 [52]:

Svařovací poloha	Vertikální
Maximální svařovací výkon [kVA]	246
Maximální zkratový proud [kVA]	296
Pohon svařovací hlavy	pneumatický
Rozteč ramen (min/max), [mm]	115/415
Maximální svařovací proud [kA]	33,8
Zkratový proud [kA]	42,2
Elektrodová síla [daN]	20 - 600
Délka výložníku ramen [mm]	550
Šířka / hloubka / výška [mm]	780/1253/1636
Hmotnost (stroj / řídicí skříň) [kg]	485/65

7.5 Zkušební stroj

Mechanizovaná zkouška stříhem byla provedena na zkušebním stroji LabTest Model 5.100SP1 od firmy LaborTech (obr. 38). Parametry stroje jsou uvedeny v tab. 9.



Obr. 38 LabTest Model 5.100SP1

Tab. 9 Parametry stroje LabTest Model 5.100SP1:

Technická data	5.100SP1
Jmenovité zatížení [kN]	100
Max. zkušební rychlost [mm/min]	600
Přesnost řízení rychlosti [%]	±0,5
Rozlišení příčnicku [μm]	1
Tuhost rámu [mm/N]	1,6x 10 ⁻⁶
Rozpětí sil [kN]	500-600
Přesnost měření síly [%]	±0,3 z hodnoty v rozsahu
Přesnost dráhy [μm]	1 - ČSN EN ř513
Přesnost měření napětí [%]	±0,5 průtahoměru

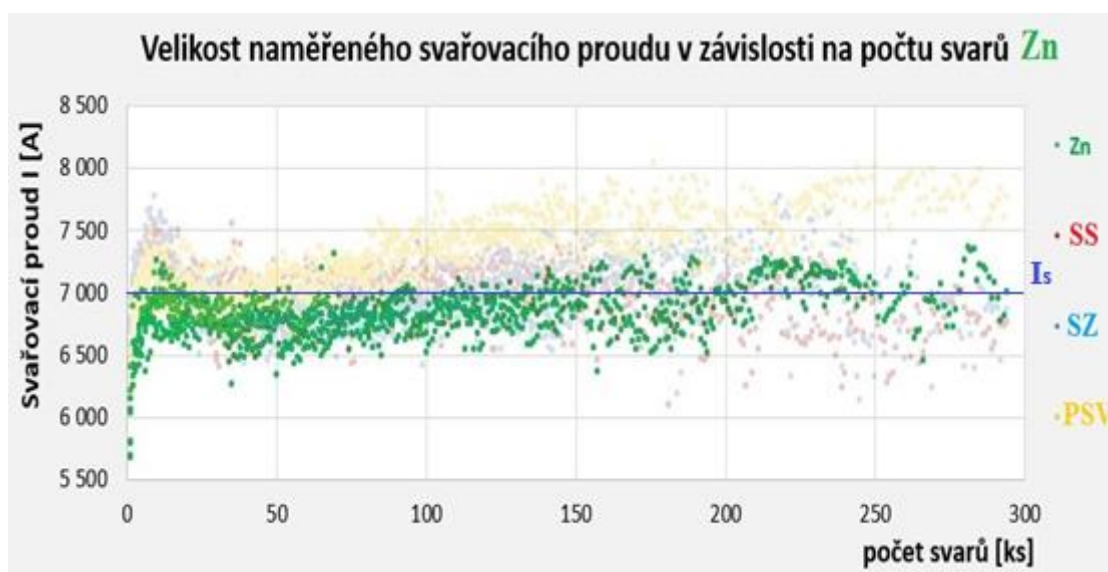
8 Provedení experimentu

8.1 Vyhodnocení výsledků z monitorování svařovacího procesu

8.1.1 Materiál s označením Zn

Naměřené hodnoty svařovacího proudu jsou uvedené v příloze 1.

Závislost velikosti svařovacího proudu na počtu provedených svarů pro materiál Zn (což je plech s pouze Zn povlakem, bez dalších vrstev) v porovnání s ostatními je vidět na obr. 39.



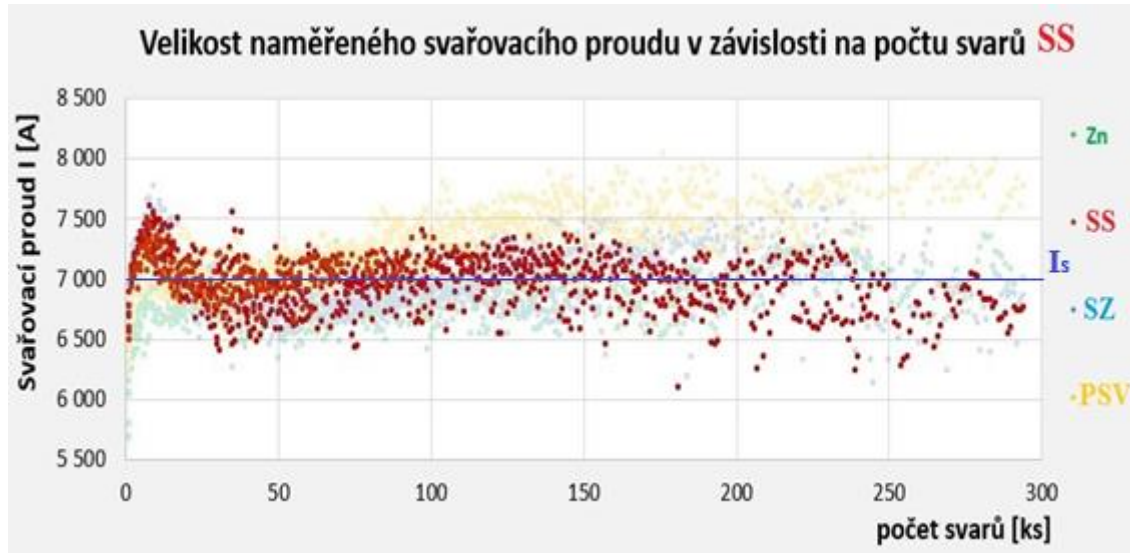
Obr. 39 Závislost velikosti svařovacího proudu na počtu svarů pro materiál s označením Zn

Z grafu je vidět, že v případě plechu s povlakem pouze Zn se po cca 10 svarech svařovací proud ustálí v rozmezí 6,5 kA až 7 kA (což byla i nastavená hodnota svařovacího proudu I_s). Po cca 100 svarech dochází k velmi mírnému narůstání svařovacího proudu. Pro 150ti svarech se zvyšuje rozptyl naměřených hodnot. Po 200 svarech se svařovací proud ustaluje na hodnotě kolem 7,2 kA a po 250 svarech dochází opět k vyššímu rozptylu hodnot. Po celou dobu svařování se lepení k elektrodám vyskytovalo jen ve velmi malé (až zanedbatelné) míře, a to vždy nejdříve po 150 svarech.

Jeden z možných důvodů procesu nalepování elektrody na svařovaný materiál je vzájemná interakce svařovaného materiálu a materiálu elektrodových čepiček při zvýšených teplotách během stlačování.

8.1.2 Materiál s označením SS

Závislost velikosti svařovacího proudu na počtu svarů pro materiál s anorganickým povlakem na bázi sirných sloučenin (SS) v porovnání s ostatními je znázorněna na obr. 40.



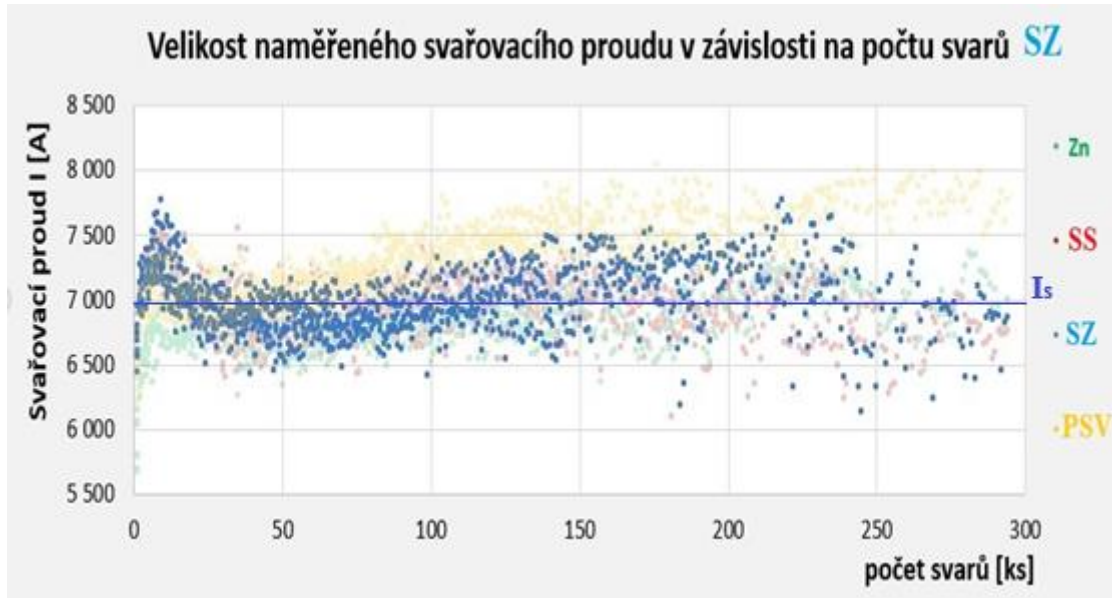
Obr. 40 Závislost velikosti svařovacího proudu na počtu svarů pro materiál s označením SS

Na rozdíl od předchozího materiálu, materiál s finální povrchovou úpravou s označením SS byl svařován s naměřeným o něco vyšším proudem. Nejvýraznější rozdíl je do 25 svarů, poté došlo k ustálení hodnot na průměrných 7 kA. Přesto trend průměrné hodnoty je mírně rostoucí. Přes celý životní cyklus čepičky byl naměřen větší rozptyl svařovacího proudu, který se po 150 svarech ještě zvýraznil.

V průměru po 25ti svarech se začal plech k elektrodám mírně lepit (a značně se zvýšil rozptyl hodnot naměřeného svařovacího proudu). Kolem 40. svaru se svařovaný plech již lepil hodně a bylo třeba použít hrubou sílu k odlepení od elektrody. Od 150 svarů již zase k lepení docházelo jen minimálně a hodnoty naměřeného svařovacího proudu mají s rostoucím počtem svarů klesající trend.

8.1.3 Materiál s označením SZ

Závislost velikosti svařovacího proudu na počtu svarů pro materiál s anorganickým povlakem na bázi solí Zn (SZ) v porovnání s ostatními je vidět na obr. 41.



Obr. 41 Závislost velikosti svařovacího proudu na počtu svarů pro materiál s označením SZ

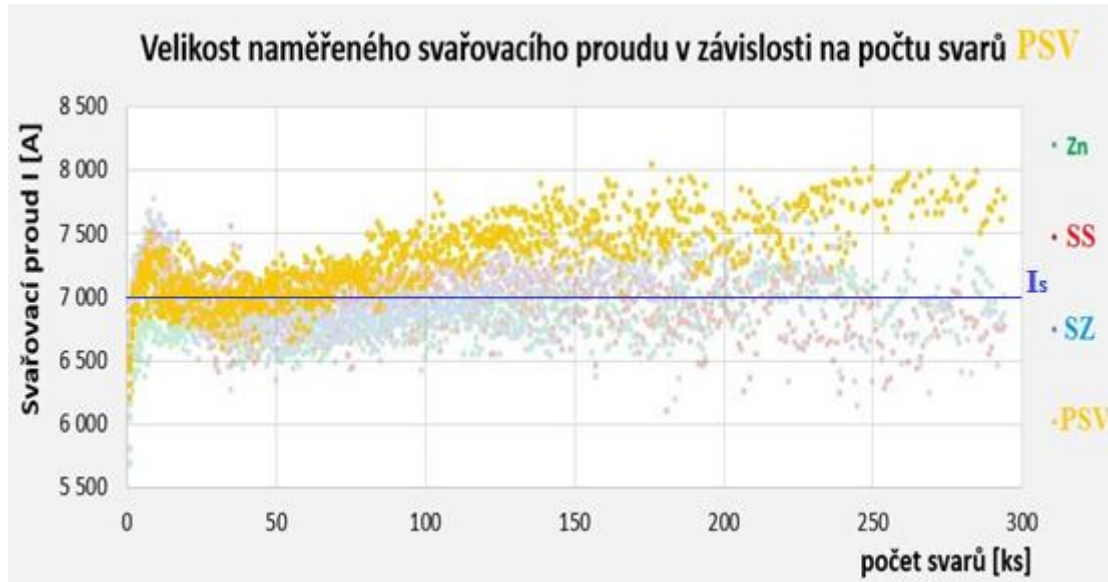
Začátek životního cyklu elektrodových čepiček u materiálu s označením SZ má podobný charakter jako materiál s SS úpravou. Po počátečním výkyvu svařovacího proudu se kolem 25. svaru hodnoty ustálí a téměř lineárně zvola stoupají. Průměrný svařovací proud u 50. svaru je 6,8 kA, a u 150. svaru je to již 7,2 kA. Rozptyl hodnot proudu v průběhu životního cyklu elektrody je někde mezi hodnotami pro plech pouze se Zn a materiál s SS úpravou. Ovšem od 125. svaru dochází k výraznému rozptylu hodnot. Po 200 svarech naměřené svařovací proudy opět klesají.

Od 18. svaru se svařovaný plech začal jemně lepit ke svařovací elektrodě a od 25. svaru se lepil již hodně až do cca 150. svaru. Po překročení této oblasti se materiál s označením SZ lepil po určitých periodách chvíli lepí a chvíli ne. Od 200 svarů se opakuje poměrně přesná perioda: 7 svarů nelepí, pak se 2 až 5 svarů lepí a opět cca 7 svarů bez lepení.

Od 260. svaru bylo možno také několikrát spatřit hoření elektrického oblouku pod elektrodovou čepičkou, tzn. svařování již neprobíhalo pouze odporově, ale také obloukově, a to z důvodů značného opotřebení kontaktní plochy čepičky.

8.1.4 Materiál s označením PSV

Závislost velikosti svařovacího proudu na počtu svarů pro materiál s anorganickým povlakem na bázi kyselé vodné sloučeniny (PSV) v porovnání s ostatními je znázorněna na obr. 42.



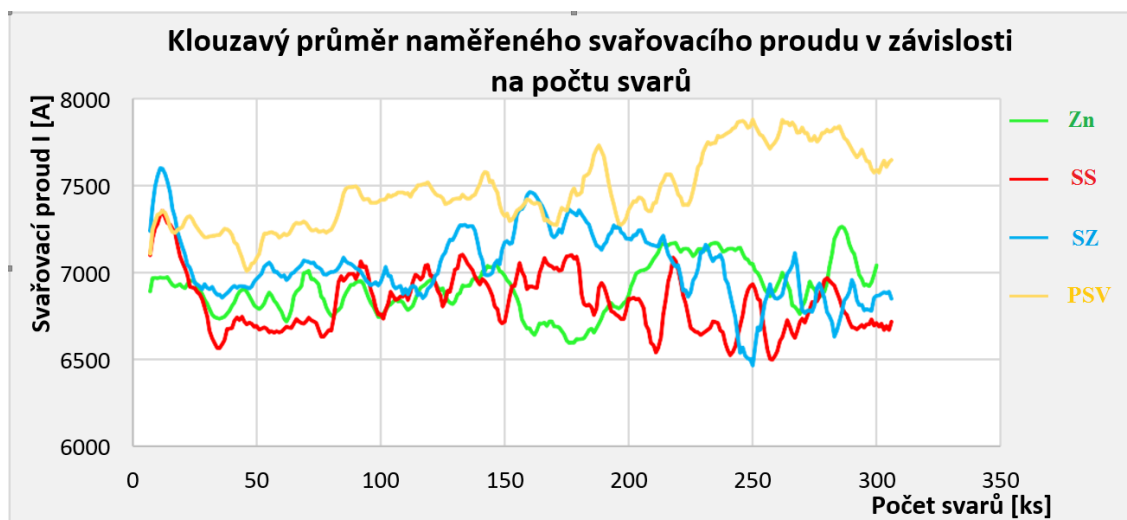
Obr. 42 Závislost velikosti svařovacího proudu na počtu svarů pro materiál s označením PSV

Poslední z testovaných materiálů s označením PSV vykazoval při stejném nastavení svařovacích parametrů podstatně vyšší hodnoty v průběhu celého životního cyklu čepiček. Po počátečním nárůstu a poklesu svařovací proud od cca 25 svarů narůstá. Oproti ostatním zkoumaným typům úprav zde nedošlo k opětovnému poklesu ke konci životnosti čepičky, pouze se rychlost narůstání proudu zpomalila. Rozdíl ve svařovacím proudu na začátku a na konci životního cyklu čepičky je v průměru až 1 kA.

K jemnému lepení plechu k elektrodě docházelo v průměru již od 10 svarů. A od 17 svarů se plech již lepil hodně (nutno použít velkou sílu k odtržení od elektrody). Od cca 150 svarů se opět začaly střídat periody, kdy se plech k elektrodě lepil a kdy ne. Tyto intervaly se s rostoucím počtem svarů prodlužovaly. Zpočátku byla jedna perioda cca 10 svarů a postupně narůstala až na cca 25 svarů. Těsně před 300. svarem byl pozorován opět oblouk v oblasti mezi plechem a horní čepičkou.

8.2 Porovnání výsledků testovaných materiálů

Na obr. 43 je vidět klouzavý průměr hodnot svařovacích proudů pro jednotlivé testované plechy. Z porovnání je vidět, že všechny 3 typy povrchových vrstev na Zn povlaku snižují přechodový odpor, což vede k vyšším svařovacím proudům při stejném nastavení parametrů. Toto zvýšení proudu je při malém počtu svarů velmi výrazné. Od cca 25 provedených svarů hodnoty svařovacího proudu „ustalují“, přičemž materiál s anorganickým povlakem na bázi siřných sloučenin (SS) se jako jediný dostává s hodnotami svařovacího proudu mírně pod povlak čistého Zn. Nejvýraznější nárůst svařovacího proudu v celém životním cyklu elektrody (resp. elektrodové čepičky), navíc s narůstajícím trendem, vykazuje materiál s anorganickým povlakem na bázi kyselé vodné sloučeniny (PSV).



Obr. 43 Celkové porovnání závislosti velikosti svařovacího proudu na počtu svarů

Současně byl zaznamenáván počet provedených svarů, od kterého se svařovaný plech začal poprvé jemně lepit k horní elektrodě. Dále byl sledován průměrný počet provedených svarů kdy se svařovaný plech velmi silně lepil k horní elektrodě a byla třeba hrubá síla pro odtržení. V tab. 10 je přehled zmíněných výsledků z naměřených dat.

Z tabulky je vidět, že v případě plechů s povlakem čistého Zn se k elektrodě začínají lepit v průměru od 150ti provedených svarů. K lepení nedochází kontinuálně u každého svaru, ale nepravidelně v malých intervalech, přičemž se plech k elektrodě lepí vždy pouze jemně. V průběhu životního cyklu elektrodových čepiček dochází průměrně k navýšení svařovacího proudu o cca 0,25 kA.

Plech s označením SS se naopak začínají jemně lepit už od 25. svaru a průměrně od 40 svarů se plech k elektrodě již lepí silně. Po přibližně 150ti svarech

dochází ke změně síly lepení a plechy se v naprosté většině případů lepí k elektrodám pouze jemně. Změna svařovacího proudu v průběhu životního cyklu čepiček je záporná (zápornou změnu svařovacího proudu má jako jediný povlak ze všech testovaných) a dochází k poklesu o cca 0,25 kA.

Ještě dříve než povlak s označením **SS**, materiál s anorganickým povlakem na bázi solí Zn (**SZ**) začal jemně lepit a to průměrně již od 18 provedeného svaru. Silně lepit k elektrodovým čepičkám tak, že k odtržení byla třeba hrubá síla, začíná plech s označením **SZ** průměrně již od 25 svaru. Přibližně od 150ti svarů se začínají poměrně pravidelně střídají periody kdy svary nelepí (cca 7 svarů) a lepí (2 až 5 svarů). Celkový nárůst svařovacího proudu v průběhu životního cyklu elektrodové čepičky je cca o 0,5 kA.

Ze všech materiálů nejdříve začal lepit materiál s anorganickým povlakem na bázi kyselých vodných sloučenin (**PSV**). Jemně lepil již v průměru po 10ti provedených svarech a silně lepil již po 17ti svarech. Kolem 150ti svarů se opět začal měnit charakter lepení. Opět se střídaly periody, kdy povlak k elektrodě nelepil a lepil. Tyto periody se postupně prodlužovaly z počátečních jednotek až po průměrně 25 svarů lepí / 25 svarů nelepí. Byl zde i nejzásadnější nárůst svařovacího proudu, a to až o 1 kA.

Tab. 10 Výsledné porovnání zkoušených materiálů:

Povlak	Plech se jemně lepí od svaru číslo	Plech se silně lepí od svaru číslo	Po 150. svarech	ΔI [kA]
Zn	150	-	občas jemně lepí	0,25
SS	25	40	lepí většinou jemně	- 0,25
SZ	18	25	střídání period: 7 svary nelepí, 2-5 svary lepí	0,5
PSV	10	17	Prodlužování periody lepí/nelepí z 10/10 až na 25/25	1

Pozn. ΔI je maximální rozdíl svařovacího proudu během na začátku a konci životního cyklu čepičky.

8.3 Výsledky z mechanizované zkoušky stříhem

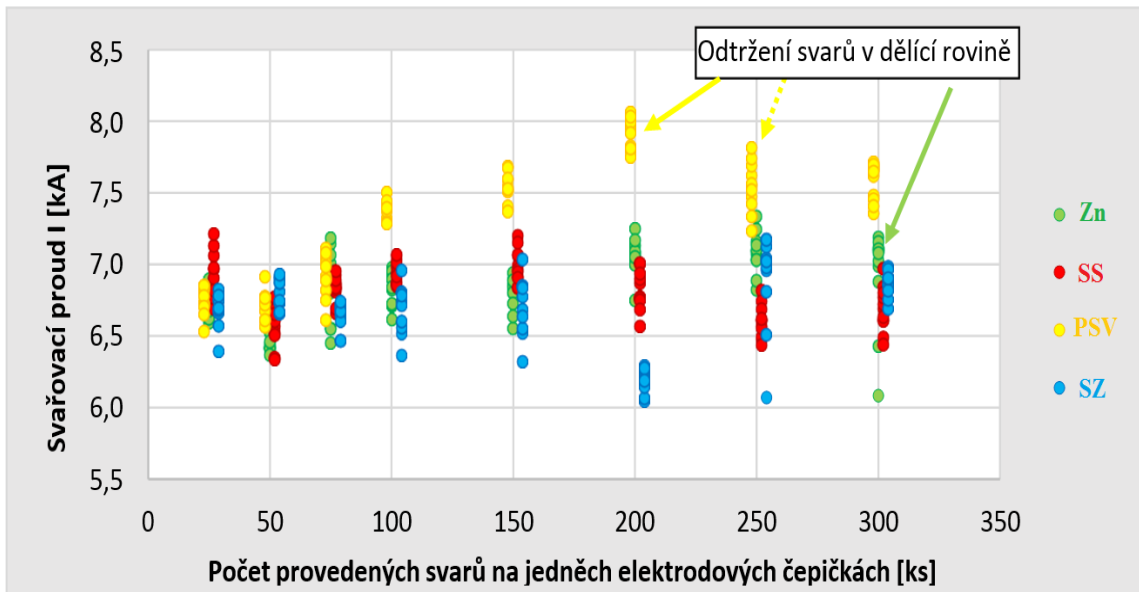
Naměřené hodnoty maximálních sil, potřebných na přetržení vzorku a naměřené průměry svarových čoček jsou uvedené v příloze 1.

Protože svary, které byly určeny pro mechanizovanou zkoušku stříhem byly vyrobeny mimo plech určený pro opotřebení čepiček (byly to vzorky o rozměrech 45 x 125 mm), nejsou zaznamenané hodnoty svařovacího proudu zahrnuty do výsledků uvedených výše. Svary na plechu pro opotřebení čepiček byly vyráběny rychle za sebou a plech i elektrody se postupně ohřívaly. Zatímco plechy pro mechanizovanou zkoušku stříhem byly menší a vždy pokojové teploty. Svary nebyly provedeny tak rychle za sebou, protože bylo třeba vzorek odložit a vzít nový, takže došlo k větší prodlevě mezi svary, než když byly svary pokládány 3 cm od sebe a plech byl mezi jednotlivými svary pouze posunut.

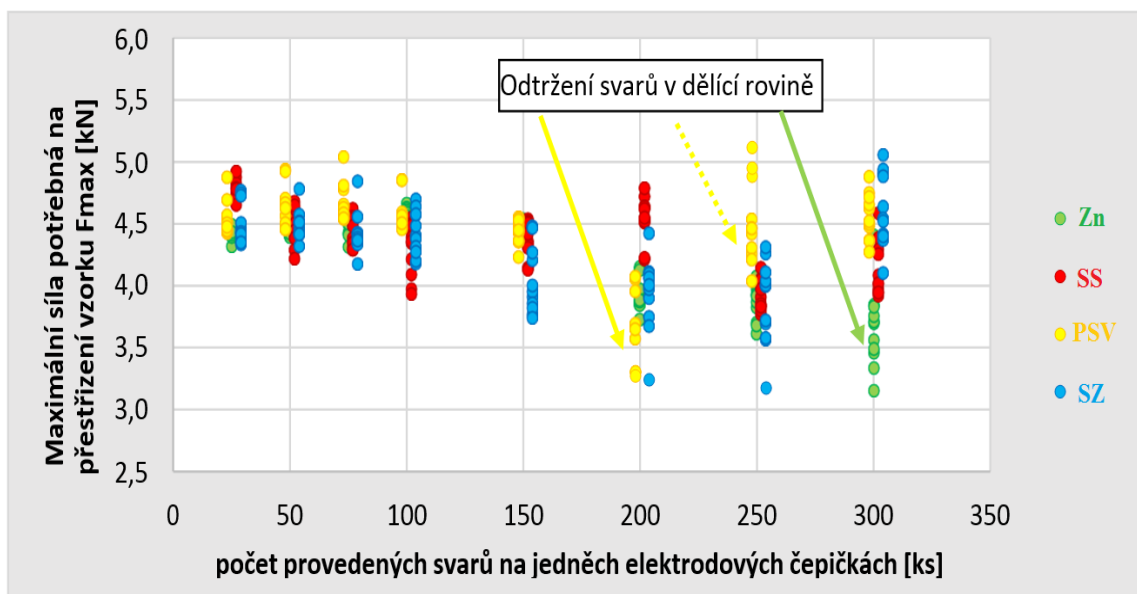
Hodnoty svařovacího proudu pro vzorky určené pro mechanizovanou zkoušku stříhem, jsou shrnuty do grafu na obr. 44. Z grafu je vidět, že ačkoliv hodnoty jsou lehce posunuté, trendy v průběhu životního cyklu jsou stejné jako u výše uvedených grafů.

Z grafu na obr. 45 je vidět, že maximální síla potřebná na přestřížení vzorku má s počtem svarů klesající charakter, přičemž do cca 150ti provedených svarů má typ povlaku zanedbatelný vliv. Nad 150 svarů se značně zvyšuje rozptyl hodnot pro jednotlivé povlaky a současně se zvyšuje rozdíl mezi těmito povlaky. V případě čistého Zn je zachován klesající trend maximální síly až do konce životního cyklu elektrodové čepičky, přičemž vzorky svařené na elektrodách, které mají za sebou 300 svarů se všechny (kromě 2) porušili v dělicí rovině svaru. Výrazný pokles maximální síly po 200 svarech u povlaku s označením PSV je taktéž dán porušením všech svarů v dělicí rovině, stejně jako polovina vzorků po 250 svarech.

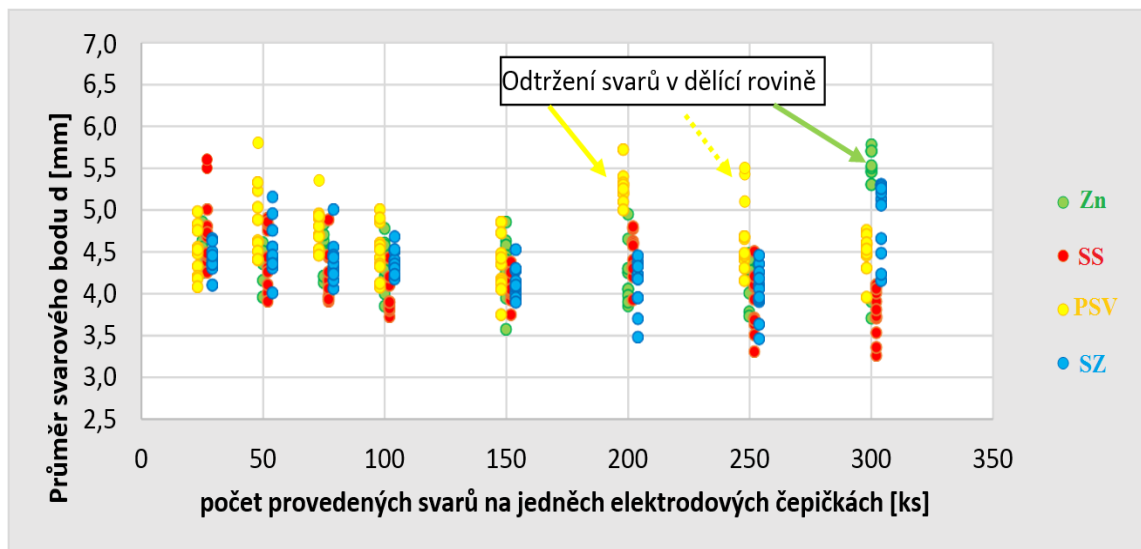
Paradoxně na těchto vzorcích s nejnižšími hodnotami maximální síly byly naměřeny největší průměry svarových bodů. To může být způsobeno tím, že čím více svarů je elektrodovou čepičkou svařeno, tím větší prstenec difúzně nanesené hmoty se po obvodu její kontaktní plochy tvoří a může docházet k tomu, že svary jsou uprostřed neprovařeny.



Obr. 44 Porovnání závislosti velikosti svařovacího proudu (u vzorků pro mechanizovanou zkoušku stříhem) na počtu provedených svarů



Obr. 45 Porovnání závislosti maximální síly potřebné na přestřížení vzorku na počtu provedených svarů pro jednotlivé povlaky

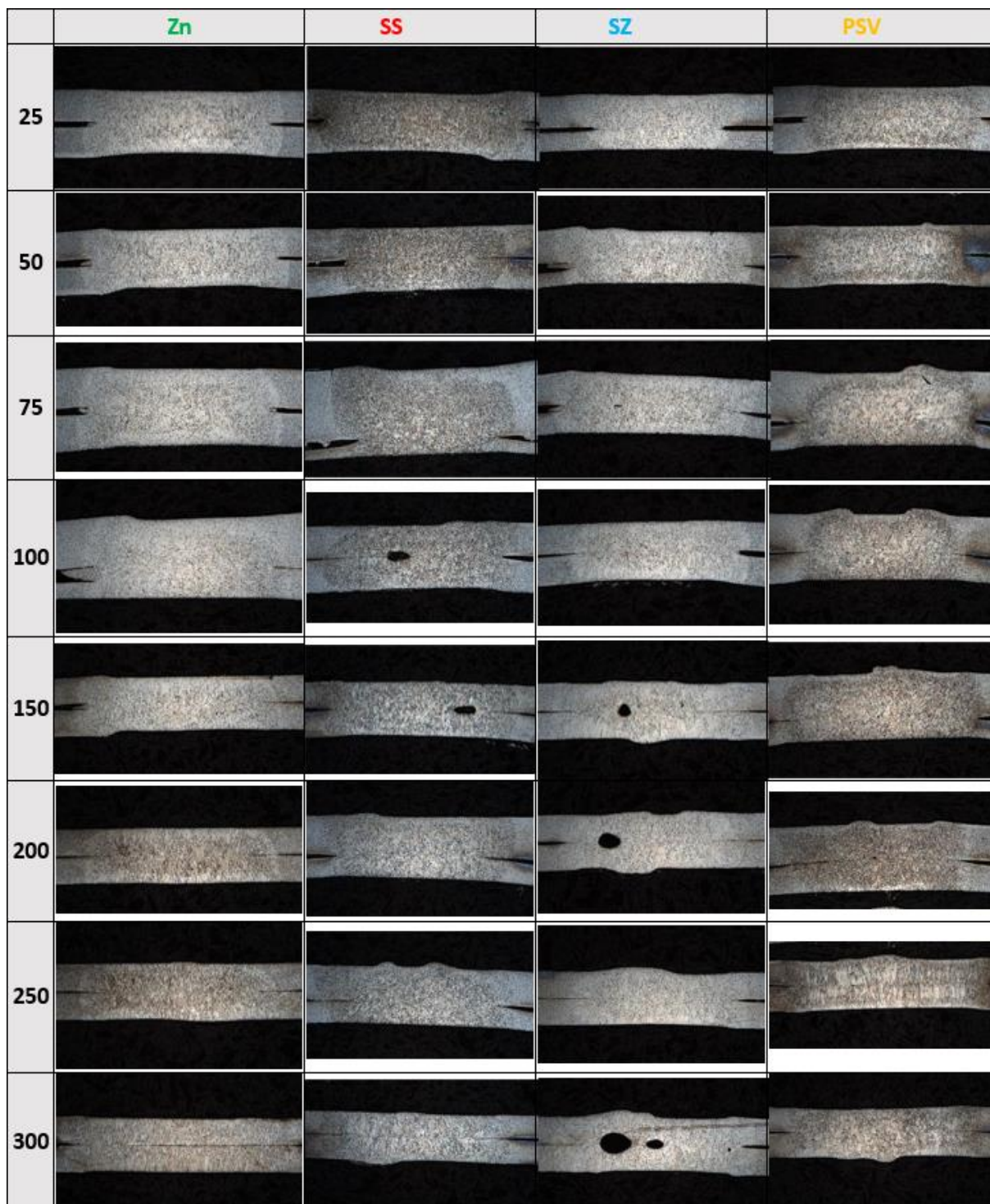


Obr. 46 Porovnání závislosti průměru svarového bodu na počtu provedených svarů pro jednotlivé povlaky

V takovém případě se pak ve většině případů nachází ve svaru značně rozměrná dutina, která pevnost spoje snižuje. Jak je vidět z grafu na obr. 46, i trend průměru svaru koresponduje s poklesem síly, v závislosti na počtu provedených svarů. Zásadních rozdílů ve velikosti pak dochází pouze u svarů porušených v dělicí rovině. Minimální průměr svarové čočky byl stanoven dle vztahu $d_{min} = 3,5 \cdot \sqrt{t}$ na **2,9 mm**. Tuto hodnotu žádný z měřených svarů nepodkročil, lze tedy říci, že z hlediska minimálního průměru svaru by všechny provedené svary vyhověly.

8.4 Výsledky metalografie

Na Obr. 47 jsou vidět makra svarů pro jednotlivé typy povlaků provedené s elektrodovými čepičkami opotřeбенými definovaným počtem svarů.



Obr. 47 Metalografická zkouška svarů

Jak je vidět z maker svarů, všechny povlaky, kromě čistého Zn vykazují na povrchu výrazné změny morfologie v důsledku lepení elektrod ke svařovanému povlaku. K tomuto lepení dochází v důsledku intenzivní difúze mezi elektrodovou

čepičkou a povlakem. Pro popis difúzních mechanismů by bylo třeba provést podrobné chemické analýzy pomocí elektronového mikroskopu.

Z hlediska vnitřních vad, se ve svarech nacházejí vady pouze jednoho typu a to dutiny. Pro zjištění původu vzniku dutin by taktéž byla vhodná chemická analýza stěny dutiny. Může jít o dutiny vzniklé v důsledku rozstříku roztaveného kovu během svařování (čemuž napovídá výrazné zvyšování skutečného svařovacího proudu oproti nastavenému v průběhu životního cyklu elektrodových čepiček), případně o dutinu vzniklou v důsledku prudkého ohřevu sloučenin na povrchu a jejich sublimací. S největší pravděpodobností půjde o kombinaci obou jevů.

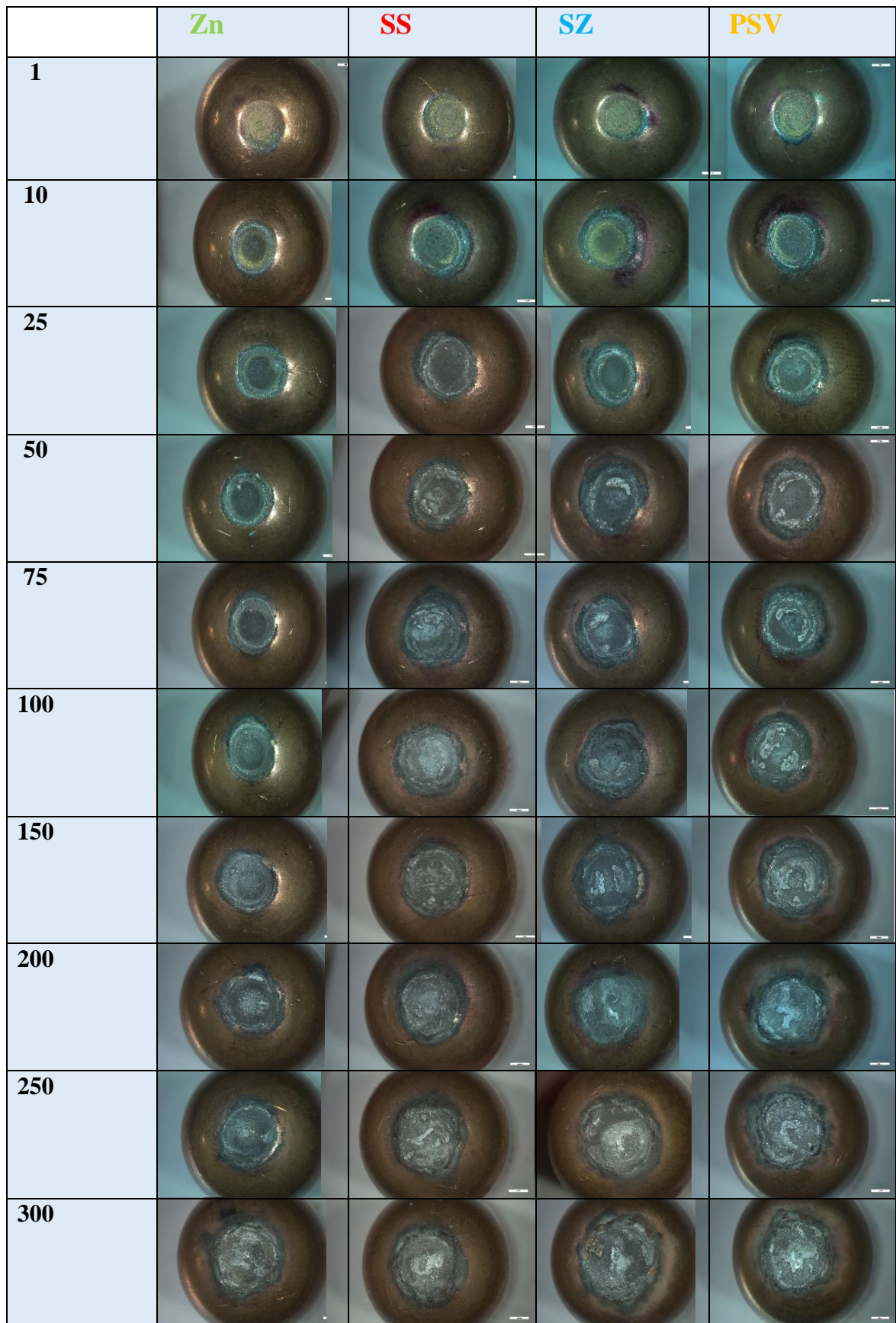
8.5 Výsledky posuzování opotřebení svařovacích elektrod

Na obr. 48 jsou znázorněné opotřeбенé elektrodové čepičky. Pro materiál s povlakem čistého Zn je chování očekávané, materiál se začíná jemně lepit až po 150ti svarech a mění se kontaktní plocha svařovací elektrody.

Zatímco u materiálu s označením SS kontaktní plocha elektrody se začala měnit již od 50. svaru, což koresponduje s výsledky z tab. 10, že plech měl tendenci se silně lepit k elektrodě od svaru číslo 40. Je nutné poznamenat, že elektroda občas se „zbaví“ nalepeného materiálu (viz. 100-SS, 150-SS) a je zaznamenáno, že materiál znovu nelepí nebo lepí pouze jemně k elektrodě.

U materiálu s označením SZ elektroda se začala viditelně opotřebovávat již od 50. svaru, a podle tab. 10, materiál se začal hodně lepit k elektrodě již od 25. svaru, proto se na povrchu elektrod projevují změny.

Materiál s označením PSV se choval podobně jako materiálu s označením SZ, ale v důsledku vyššího svařovacího proudu otisk elektrody stejně jako tvar čocky byl víc nesymetrický (viz. příloha 1) a to je náročně zohledněno na obr. 46 třeba u 250-PSV a 300-PSV.



Obr. 48 Opotřebení svařovacích elektrod 0,63x

9 Závěr

Byla provedena měření ověření vlivu finální povrchové vrstvy materiálu HX180BD na svařovací parametry, velikost opotřebení elektrod a kvalitu výsledného spoje.

Z výše uvedených výsledků lze konstatovat, že:

- 1) Vliv finální povrchové vrstvy na svařovací proud je výrazný, žádný z naměřených průběhů není lineární, dochází k snižování, případně zvyšování proudu, největší rozdíl vykazuje materiál s anorganickým povlakem na bázi kyselé vodné sloučeniny (PSV) a to až o 1 kA.
- 2) Vliv na pevnost svarů není zásadní, což potvrzuje i výsledky z literatury [12]:
 - do 150 svarů nebyla zaznamenána výrazná odchylka;
 - nad 150 svarů u některých vzorků PSV a čistého Zn došlo ke vzniku difúzních spojů (porušení v dělicí rovině);
 - minimální průměr svarové čočky dle vztahu $d_{min} = 3,5 \cdot \sqrt{t} = 2,9$ mm byl dosažen u všech svarů;
 - s rostoucím průměrem svarové čočky klesá maximální síla potřebná na přetržení vzorku.
- 3) Na rozdíl od povlaku čistého Zn lepení elektrodových čepiček k materiálu s anorganickým povlakem na bázi sirných sloučenin (SS), materiálu s anorganickým povlakem na bázi solí Zn (SZ) a materiálu s anorganickým povlakem na bázi kyselé vodné sloučeniny (PSV) výrazně ovlivnilo morfologii svaru. Toto nalepování zásadně ovlivnilo proces svařování, protože již po nízkém počtu svarů bylo potřeba použít poměrně velkou sílu pro odtržení plechu od elektrody.
- 4) Následně proces lepení značně ovlivnil životnost svařovacích elektrod. Materiály s povlaky s označením SS, SZ a PSV v důsledku silného lepení k elektrodám již od 17. až 40. svarů, výrazně zkrátily životnost elektrod ve srovnání s materiálem s povlakem čistého Zn, který začínal lepit jemně pouze od 150. svarů. U materiálů s označením SS, SZ a PSV po překročení oblasti 17. až 40. svarů, změny na povrchu elektrody již byly pozorované okem a tvar svarové čočky začínal být víc nesymetrický.

Seznam použité literatury

- [1] ELUC. Elektrické odporové svařování. [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1808>
- [2] ROCKWELD. ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ. [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/odporove-svarovani/>
- [3] JOU, Min. Experimental Investigation of Resistance Spot Welding for Sheet Metals Used in Automotive Industry. JSME International Journal, Series C, Vol. 44, No. 2, 2001.
- [4] Schinkmann. Odporové svařování, bodové svařování, švové svařování [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>
- [5] Teorie a technologie svařování. [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z <http://staryweb.ivohlavaty.cz/2009Svarovani/indexs.htm>
- [6] ARTWELD. ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ. [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://artweld.cz/odporove-svarovani/>
- [7] Rozdělení metod tlakového odporového svařování. [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16973382-Rozdeleni-metod-tlakoveho-odporoveho-svarovani.html>
- [8] Теория и технология контактной сварки. Учебное пособие. Р.Ф. Катаев, В.С. Милютин, М.Г. Близник. Екатеринбург, Издательство Уральского университета, 2015.
- [9] ČSN EN ISO 5182 (052678): Odporové svařování - Materiály pro elektrody a pomocné vybavení, 2017.

- [10] Příslušenství odporového svařování (elektrody, čepičky, držáky, kabely) - Ing. Jiří Zmrzlík. [online]. [cit. 2018-11-14]. Dostupné z zmrzlik.cz/pdfzel/katalog_svar.pdf
- [11] Pro Spot. Elektrody pro bodové svařování [online]. [cit. 2021-07-25]. Dostupné z: <https://www.prospot.cz/elektrody-pro-odporove-svarovani/elektrody-pro-bodove-svarovani/>
- [12] NEUMANN, Heinz. KONSTRUKCE. Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství. Aplikace tekutého CO₂ pro chlazení elektrodových čepiček u odporového bodového svařování. [online]. [cit. 2021-07-30]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/aplikace-tekuteho-co2-pro-chlazení-elektrodovych-cepicek-u-odporoveho-bodoveho-svarovani/>
- [13] Стойкость электродов при контактной сварке. [online]. [cit. 2021-07-25]. Dostupné z: <https://k-svarka.com/content/stoikost-elielktrodov-pri-kontaktnoi-svarkie>
- [14] Hayriye Ertek Emre, Batuhan Bozkurt: Effect of Cr-Ni coated Cu-Cr-Zr electrodes on the mechanical properties and failure modes of TRIP800 spot weldmentss, Elsevier Ltd, 2020.
- [15] ПАНАРИН, А.В. Пиролитические карбидохромовые покрытия: получение, свойства и аппаратурное обеспечение процесса. УДК 621.039.546, 2009
- [16] G.A. Men'shikov , A.N. Vlasenko , V.A. Nevrovskii & V.A. Vasin: Improving the working efficiency of electrodes in resistance spot welding of steels, Welding International, 2014, 24:5, 380-384.
- [17] ESHOP ARTWELD. [online]. [cit. 2021-07-29]. Dostupné z: <https://www.esvarovani.cz/produkt/103374-lis-svarovaci-bodovaci-dalex-pl-40>

- [18] WELDING PARTNERS. [online]. [cit. 2021-07-29]. Dostupné z: <http://www.weldingpartners.cz/index.php?pg=clanek&id=53>
- [19] Schinkmann. Svářecí technika. [online]. [cit. 2021-07-29]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/bodovaci-c-kleste-3323-23kva-tecna>
- [20] Schinkmann. Svářecí technika. [online]. [cit. 2021-07-29]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/rucni-bodovaci-kleste-tecna-7900-2-0-kva-tecna>
- [21] Классификация и требования к кузовам. [online]. [cit. 2021-07-29]. Dostupné z: https://wiki.zr.ru/Классификация_и_требования_к_кузовам
- [22] Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Škoda Auto. Lucie Forejtová, Ladislav Kolařík, Jan Suchánek, Marie Kolaříková, Tomáš Pilvousek. [online]. [cit. 2021-07-31]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>
- [23] VLK, František. Karosérie motorových vozidel. 1. vydání. Brno: Vydavatelství a nakladatelství Vlk, 2000. 243 s. ISBN 80-238-5277-9.
- [24] PETRUCHA, Roman. SNIŽOVÁNÍ HMOTNOSTI KAROSERIÍ OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ NA ZÁKLADĚ VOLBY MATERIÁLU. Brno, VUT, 2015.
- [25] Docol. The automotive steel. Extra- und ultrahochfester Stahl für die Automobilindustrie. [online]. [cit. 2021-07-30]. Dostupné z: <https://www.ssab.de/marken-und-produkte/docol>
- [26] Workswell. Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl. [online]. [cit. 2021-07-30]. Dostupné z: <https://workswell.cz/rozdeleni-oceli-pro-automobilovy-prumysl/>

[27] SINGH, Mayank. Application of Steel in Automotive Industry. University of Antwerp, 2016.

[28] Ispatguru. Steels for Automotive Applications. [online]. [cit. 2021-07-30]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/steels-for-automotive-applications/>

[29] BAOSTEEL. Tailored Blanks. [online]. [cit. 2021-07-31]. Dostupné z: <https://www.tailored-blanks.com/en/tailored-blanks>

[30] EUROPEAN BUSINESS. Meeting the automotive challenge. [online]. [cit. 2021-07-31]. Dostupné z: <https://www.european-business.com/portraits/arcelormittal-tailored-blanks-nv/meeting-the-automotive-challenge>

[31] RDN Repairer Driven News. 2021 Mustang Mach-E has much boron steel, includes aluminum, composite closures. [online]. [cit. 2021-07-31]. Dostupné z: <https://www.repairerdrivennews.com/2021/07/02/2021-mustang-mach-e-has-much-boron-steel-includes-aluminum-composite-closures/>

[32] RDN Repairer Driven News. 2021 Mustang Mach-E has much boron steel, includes aluminum, composite closures. [online]. [cit. 2021-07-31]. Dostupné z: <https://www.repairerdrivennews.com/2021/07/02/2021-mustang-mach-e-has-much-boron-steel-includes-aluminum-composite-closures/>

[33] UACJ. Automobile Technology. Types and applications of aluminum alloys for vehicles. [online]. [cit. 2021-08-02]. Dostupné z: https://uacj-automobile.com/types_and_applications.html

[34] Aluminium INSIDER. Aluminium Alloys in the Automotive Industry: a Handy Guide. [online]. [cit. 2021-08-02]. Dostupné z: <https://aluminiuminsider.com/aluminium-alloys-automotive-industry-handly-guide/>

[35] Audi MediaCenter. Audi e-tron GT. [online]. [cit. 2021-08-02]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacyenter.com/en/photos/detail/audi-e-tron-gt-95237>

[36] European Aluminium. Body Structures. Aluminium Automotive Manual [online]. [cit. 2021-08-03]. Dostupné z: http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/12/1_AAM_Body-structures.pdf

[37] NetCarShow. Audi A8. [online]. [cit. 2021-08-03]. Dostupné z: <https://www.netcarshow.com/audi/2004-a8/>

[38] Green Car Congress. Audi puts steel back in the new A8. [online]. [cit. 2021-08-03]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2017/05/20170512-audia8.html>

[39] Audi MediaCenter. Audi Q4 e-tron. [online]. [cit. 2021-08-02]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacyenter.com/en/photos/detail/audi-q4-e-tron-100145>

[40] VOTAVA, Pavel. ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ MARTENZITICKÝCH OCELÍ S VARIANTNÍM TEPELNÝM ZPRACOVÁNÍM. Praha, ČVUT, 2015.




[41] Eorometal. ROZDÍL MEZI ŽÁROVÝM A GALVANICKÝM ZINKOVÁNÍM. [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.eurometal.cz/magazin/rozdil-mezi-zarovym-a-galvanickym-zinkovanim-detail-60>

[42] PRO-DOMA. ŽÁROVÉ ZINKOVÁNÍ. [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.pro-doma.cz/sluzby/zarove-zinkovani-detail-44818>

[43] APP. Galvanization: Hot-Dipped vs Electroplated. [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://kb.appinc.co/knowledge-base/galvanization-hot-dipped-vs-electroplated/>

- [44] MM Průmyslové spektrum. Moderní způsoby ochrany vysokopevných ocelí. [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-zpusoby-ochrany-vysokopevných-oceli>
- [45] KOLAŘÍKOVÁ, Marie, CHOTĚBORSKÝ Rostislav, HROMASOVÁ Monika, LINDA Miloslav. THE CHARACTERISTICS OF Al-Si COATING ON STEEL 22MnB5 DEPENDING ON THE HEAT TREATMENT [online]. 2019, Acta Polytechnica 59(4):352–358 [cit. 2021-08-05]. DOI: <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0352>
- [46] HU X., ZOU G., DONG S. J., LEE M. Y., a JUNG J. P. Effects of Steel Coatings on Electrode Life in Resistance Spot Welding of Galvannealed Steel Sheets. Materials Transactions, Vol. 51, No. 12 (2010) s. 2236-2242, 2010, The Japan Institute of Metals.
- [47] MALKOV, Artem. ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ POVRCHOVĚ UPRAVENÝCH PLECHŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMY. Praha, ČVUT, 2015.
- [48] HOLEŠ, Daniel. Rozbor vlivu povrchových úprav na kvalitu spojů při odporovém bodovém svařování. Praha, ČVUT, 2020.
- [49] PLÍVA, Ladislav. Odporové svařování. 1. vydání, Praha, SNTL 1975, 265 s.
- [50] ESB-group. Hot-dip galvanized microalloyed steel. [online]. [cit. 2021-08-06]. Dostupné z: <https://www.esb-group.com/en/products-din-en/hot-dip-galvanized-microalloyed-steel/>
- [51] ATV Praha s.r.o.. Elektrodové čepičky 39D 1978-2. [online]. [cit. 2021-08-06]. Dostupné z: <https://www.atvp Praha.cz/p/985/g0-13>
- [52] Dalex PMS PRŮMYSLOVÉ SVAŘOVACÍ ODPOROVÉ LISY. [online]. [cit. 2021-08-06]. Dostupné z: http://download.dalex.cz/pms_11-4_cz

Přílohy

Legenda:		vyhovující spoj
		nesprávné upnutí během měření Fmax (nepočítat)
		difúzní spoj (nedošlo k vytváření čočky)

Příloha 1 - Naměřené hodnoty pro materiál z označením Zn.

č.vzorku	Zn				
	I [kA]	Fmax [kN]	d1 [mm]	d2 [mm]	dstr [mm]
25-1	6,76	4,32	5,1	4,15	4,63
25-2	6,65	4,44	4,4	4,25	4,33
25-3	6,90	4,44	4,4	4,25	4,33
25-4	6,61	4,40	4,55	4,45	4,50
25-5	6,66	4,40	5	4,7	4,85
25-6	6,65	4,43	4,7	4,4	4,55
25-7	6,69	4,45	4,8	4	4,40
25-8	6,59	4,41	4,2	4,6	4,40
25-9	6,62	4,48	4,6	4	4,30
25-10	6,69	4,49	4,5	4	4,25
25-11	6,68	4,43	4,5	4	4,25
50-1	6,41	4,39	4,9	4,2	4,55
50-2	6,70	4,45	4,6	4,3	4,45
50-3	6,52	4,49	4,5	4,3	4,40
50-4	6,44	4,40	4,9	4,2	4,55
50-5	6,56	4,46	4,6	4,6	4,60
50-6	6,42	4,39	4,5	4,5	4,50
50-7	6,41	4,39	4,5	4,3	4,40
50-8	6,41	4,45	4,25	4,05	4,15
50-9	6,36	4,43	4,4	4,3	4,35
50-10	6,52	4,39	4,1	3,8	3,95
50-11	6,46	4,41	4,3	3,6	3,95
75-1	6,55	4,42	4,4	4	4,20
75-2	6,80	4,53	4,9	4,8	4,85
75-3	6,94	4,49	5	4,05	4,53
75-4	7,01	4,55	5	4	4,50
75-5	6,96	4,41	5	4,25	4,63
75-6	7,14	4,58	4,7	4,3	4,50
75-7	7,07	4,55	4,25	4	4,13
75-8	6,83	4,54	4,9	4,5	4,70
75-9	6,45	4,50	4,6	4,35	4,48
75-10	6,55	4,31	4,4	4	4,20
75-11	7,18	4,58	5,15	4,5	4,83
100-1	6,62	4,53	4,45	4,2	4,33

100-2	6,82	4,59	4,6	4,2	4,40
100-3	6,98	4,55	4,3	4	4,15
100-4	6,93	4,66	4,6	4,6	4,60
100-5	6,95	4,63	5	4,55	4,78
100-6	6,89	4,61	4,3	3,7	4,00
100-7	6,90	4,48	4,8	4,3	4,55
100-8	6,71	4,60	4,6	4,55	4,58
100-9	6,84	4,58	3,9	3,8	3,85
100-10	6,72	4,56	4,6	3,8	4,20
100-11	6,72	4,52	4,55	4	4,28
150-1	6,55	4,53	4,4	4,35	4,38
150-2	6,87	4,50	4,65	4,6	4,63
150-3	6,81	4,52	4,45	4,1	4,28
150-4	6,89	4,48	4,1	3,9	4,00
150-5	6,85	4,37	4	3,9	3,95
150-6	6,84	4,42	3,6	3,55	3,58
150-7	6,64	4,49	5	4,7	4,85
150-8	6,80	4,42	4,6	4,55	4,58
150-9	6,94	4,46	4,4	4,1	4,25
150-10	6,73	4,49	4,6	4,3	4,45
150-11	6,89	4,36	4,7	4,1	4,40
200-1	6,75	4,15	5	4,9	4,95
200-2	7,00	3,84	4,3	4,2	4,25
200-3	7,08	3,84	4,5	4,1	4,30
200-4	7,05	3,96	4,3	3,8	4,05
200-5	7,25	3,92	4,25	4,25	4,25
200-6	7,13	3,97	4,3	4,3	4,30
200-7	7,01	3,72	4,1	4	4,05
200-8	7,09	3,87	4,05	3,9	3,98
200-9	7,17	3,97	4,1	3,6	3,85
200-10	7,00	4,12	4,7	4,6	4,65
200-11	7,05	3,88	4,15	3,65	3,90
250-1	6,82	4,06	4,45	4,2	4,33
250-2	6,88	3,97	4,3	4,05	4,18
250-3	7,09	4,01	4,65	4,3	4,48
250-4	7,07	4,07	4,45	4,2	4,33
250-5	7,10	3,82	4,5	4,1	4,30
250-6	7,16	3,87	4,45	4,1	4,28
250-7	7,24	3,61	4	4	4,00
250-8	7,03	3,70	4,2	4,1	4,15
250-9	7,33	3,68	4,2	3,35	3,78
250-10	7,13	3,93	3,8	3,65	3,73
250-11	7,03	3,92	4,6	4,2	4,40
300-1	6,87	3,56	3,7	3,7	3,70
300-2	6,98	3,34	5,9	5	5,45

300-3	7,02	3,46	5,5	5,4	5,45
300-4	7,11	3,70	5,05	5,55	5,30
300-5	7,09	3,49	5,5	5,5	5,50
300-6	7,18	3,71	5,9	5,5	5,70
300-7	7,15	3,15	5,65	5,4	5,53
300-8	7,10	3,75	5,95	5,6	5,78
300-9	7,07	3,85	5,3	5,3	5,30
300-10	6,42	3,83	5,9	5,5	5,70
300-11	6,08	4,40	4	3,8	3,90

Příloha 2 - Naměřené hodnoty pro materiál z označením **SS**.

č.vzorku	SS				
	I [kA]	Fmax [kN]	d1 [mm]	d2 [mm]	dstr [mm]
25-1	6,82	4,88	5,5	5,5	5,50
25-2	6,69	4,79	5,7	5,5	5,60
25-3	6,83	4,83	4,9	4,45	4,68
25-4	6,77	4,79	4,8	4,8	4,80
25-5	7,06	4,72	4,55	4,3	4,43
25-6	6,97	4,72	4,5	4,25	4,38
25-7	7,13	4,75	5,1	3,8	4,45
25-8	6,82	4,92	4,75	4,7	4,73
25-9	7,22	4,72	4,25	4,25	4,25
25-10	6,91	4,65	4,55	4,4	4,48
25-11	6,98	4,78	5,65	4,35	5,00
50-1	6,56	4,67	4,8	4,05	4,43
50-2	6,34	4,56	4	4	4,00
50-3	6,74	4,57	4,4	4,2	4,30
50-4	6,68	4,47	4,3	3,9	4,10
50-5	6,52	4,61	5,4	4,1	4,75
50-6	6,61	4,64	5,1	4,55	4,83
50-7	6,77	4,50	5,8	4	4,90
50-8	6,60	4,44	4,5	4	4,25
50-9	6,65	4,28	3,9	3,9	3,90
50-10	6,50	4,38	5,05	4,6	4,83
50-11	6,33	4,21	4,9	4,8	4,85
75-1	6,84	4,62	5,05	4,7	4,88
75-2	6,66	4,38	4,5	3,8	4,15
75-3	6,86	4,51	4,1	3,8	3,95
75-4	6,69	4,55	4,55	4,3	4,43
75-5	6,81	4,54	4,3	4	4,15
75-6	6,93	4,30	5,1	3,8	4,45
75-7	6,83	4,48	4,45	4,05	4,25
75-8	6,87	4,28	4,15	3,65	3,90
75-9	6,84	4,35	4,25	3,7	3,98

75-10	6,89	4,34	4,25	3,85	4,05
75-11	6,96	4,29	4,25	3,6	3,93
100-1	6,87	4,55	4,85	4	4,43
100-2	6,98	4,50	4,2	3,6	3,90
100-3	7,06	4,35	3,75	3,7	3,73
100-4	7,03	4,44	4,4	3,4	3,90
100-5	6,94	4,49	4,85	4	4,43
100-6	6,85	4,39	4,2	3,4	3,80
100-7	7,01	4,36	4,2	4	4,10
100-8	7,07	4,21	4	3,7	3,85
100-9	6,88	3,97	4,15	3,5	3,83
100-10	6,86	4,09	4,7	3,7	4,20
100-11	6,92	3,93	4,2	3,6	3,90
150-1	7,20	4,35	4,4	4,15	4,28
150-2	6,99	4,44	4,15	3,7	3,93
150-3	7,06	4,33	4,4	3,6	4,00
150-4	7,07	4,53	4,25	3,8	4,03
150-5	6,84	4,51	4,3	4	4,15
150-6	7,15	4,51	4,7	4,05	4,38
150-7	6,97	4,30	4,5	3,8	4,15
150-8	6,91	4,14	4	3,5	3,75
150-9	6,84	4,49	4,4	3,7	4,05
150-10	6,95	4,41	5	3,5	4,25
150-11	6,91	4,12	4,9	3,2	4,05
200-1	6,77	4,72	4,9	4,3	4,60
200-2	6,76	4,63	4,75	4,5	4,63
200-3	6,76	4,78	4,7	4,5	4,60
200-4	7,00	4,54	4,75	4,05	4,40
200-5	6,57	4,63	4,9	4,25	4,58
200-6	6,75	4,51	5	4,55	4,78
200-7	6,87	4,52	5	3,4	4,20
200-8	6,90	4,61	4,9	4,7	4,80
200-9	7,01	4,54	4,55	4,1	4,33
200-10	6,94	4,21	4,15	3,7	3,93
200-11	6,69	4,22	4,55	4,05	4,30
250-1	6,47	4,05	4,65	3,2	3,93
250-2	6,82	3,77	4,4	3,75	4,08
250-3	6,74	4,05	3,8	3,6	3,70
250-4	6,60	4,05	4,2	4	4,10
250-5	6,57	3,80	3,4	3,2	3,30
250-6	6,49	3,91	3,75	3,5	3,63
250-7	6,61	3,83	3,8	3,6	3,70
250-8	6,69	3,85	3,7	3,65	3,68
250-9	6,43	3,83	4,6	4,4	4,50
250-10	6,55	4,14	4,2	4,2	4,20

250-11	6,62	3,97	3,7	3,3	3,50
300-1	6,61	4,08	3,8	3,25	3,53
300-2	6,68	4,01	4,3	3,5	3,90
300-3	6,60	3,97	3,7	3,7	3,70
300-4	6,97	3,94	3,5	3	3,25
300-5	6,48	4,58	4,2	4	4,10
300-6	6,84	4,02	4,2	3,8	4,00
300-7	6,63	3,92	3,9	3,55	3,73
300-8	6,72	3,94	3,4	3,3	3,35
300-9	6,43	4,38	3,85	3,75	3,80
300-10	6,76	4,29	4,2	4	4,10
300-11	6,80	4,25	4,1	4	4,05

Příloha 3 - Naměřené hodnoty pro materiál z označením SZ.

č.vzorku	SZ				
	I [kA]	Fmax [kN]	d1 [mm]	d2 [mm]	dstr [mm]
25-1	6,57	4,46	4	4,2	4,10
25-2	6,75	4,77	4,5	4,5	4,50
25-3	6,69	4,43	4,7	4,6	4,65
25-4	6,83	4,51	4,3	3,9	4,10
25-5	6,68	4,44	4,5	4,1	4,30
25-6	6,66	4,75	4,5	4,2	4,35
25-7	6,76	4,33	4,55	4,7	4,63
25-8	6,78	4,73	4,4	4,3	4,35
25-9	6,39	4,39	4,8	4	4,40
25-10	6,68	4,42	3,8	4,9	4,35
25-11	6,70	4,35	4,4	4,5	4,45
50-1	6,73	4,57	4,5	4,6	4,55
50-2	6,90	4,78	4,4	4,7	4,55
50-3	6,65	4,51	4,2	4,65	4,43
50-4	6,80	4,47	4,8	5,5	5,15
50-5	6,87	4,44	4,4	4,2	4,30
50-6	6,90	4,41	5,2	4,7	4,95
50-7	6,73	4,41	4,8	4,7	4,75
50-8	6,74	4,32	4	4	4,00
50-9	6,66	4,50	4,4	4,4	4,40
50-10	6,87	4,51	4,4	4,5	4,45
50-11	6,93	4,41	4,6	4,1	4,35
75-1	6,47	4,42	4,5	4,4	4,45
75-2	6,67	4,43	4,1	4,4	4,25
75-3	6,73	4,41	4,8	4,3	4,55
75-4	6,64	4,84	4,2	4,4	4,30
75-5	6,70	4,34	4,7	4,2	4,45
75-6	6,70	4,39	4,5	5,5	5,00

75-7	6,71	4,36	4	4,1	4,05
75-8	6,60	4,33	4,3	4,4	4,35
75-9	6,67	4,17	4,1	4,2	4,15
75-10	6,47	4,56	4,4	4,45	4,43
75-11	6,74	4,36	4,2	4,25	4,23
100-1	6,52	4,41	4,2	4,15	4,18
100-2	6,74	4,57	4,4	4,3	4,35
100-3	6,80	4,70	4,7	4,1	4,40
100-4	6,81	4,48	4,8	4,2	4,50
100-5	6,80	4,38	4,55	4,1	4,33
100-6	6,71	4,18	4,7	4,1	4,40
100-7	6,36	4,31	4,6	4,1	4,35
100-8	6,96	4,64	4,4	4,2	4,30
100-9	6,56	4,20	4,7	4,65	4,68
100-10	6,60	4,27	4,35	4,1	4,23
100-11	6,78	4,58	4,55	4,5	4,53
150-1	6,32	4,20	4,05	4	4,03
150-2	6,52	4,47	4,3	4,25	4,28
150-3	6,78	3,90	4,15	3,85	4,00
150-4	6,55	4,46	4,25	3,9	4,08
150-5	7,04	4,26	4,05	3,85	3,95
150-6	6,85	3,76	4,55	4	4,28
150-7	6,85	3,95	4	3,8	3,90
150-8	6,68	3,85	4,2	4,1	4,15
150-9	6,64	4,00	5,6	3	4,30
150-10	6,84	3,81	4,8	4,25	4,53
150-11	6,84	3,73	4,2	4	4,10
200-1	5,39	3,90	4,55	4,2	4,38
200-2	6,05	3,24	3,5	3,45	3,48
200-3	6,19	4,11	4,35	4,1	4,23
200-4	6,29	4,42	4,7	4,2	4,45
200-5	6,18	3,97	3,9	3,5	3,70
200-6	6,22	3,75	4,3	4,15	4,23
200-7	6,26	4,10	4,4	3,5	3,95
200-8	6,27	4,05	4,25	4,1	4,18
200-9	6,07	4,06	4,45	3,9	4,18
200-10	6,14	3,67	4	3,9	3,95
200-11	6,19	4,00	4,65	4	4,33
250-1	6,07	3,17	3,5	3,4	3,45
250-2	6,51	3,69	4,1	3,7	3,90
250-3	6,81	3,56	4,45	2,8	3,63
250-4	7,02	4,00	4,4	4,3	4,35
250-5	7,04	3,72	4,5	4	4,25
250-6	6,96	4,00	4,2	4	4,10
250-7	6,98	4,04	4,1	4	4,05

250-8	7,17	3,57	4,1	3,75	3,93
250-9	7,12	4,11	4,25	3,65	3,95
250-10	7,17	4,26	4,6	4,3	4,45
250-11	7,02	4,31	4,3	4,05	4,18
300-1	6,68	4,10	4,6	3,7	4,15
300-2	6,90	4,37	4,3	4,15	4,23
300-3	6,85	4,90	5,75	4,85	5,30
300-4	6,85	4,41	5,65	4,6	5,13
300-5	6,98	4,40	5,65	4,95	5,30
300-6	6,90	4,93	5,4	3,9	4,65
300-7	6,89	5,05	5,95	4,6	5,28
300-8	6,75	4,64	5,75	4,65	5,20
300-9	6,96	4,54	5,8	4,7	5,25
300-10	6,81	4,52	6,25	3,85	5,05
300-11	6,90	4,88	5,2	3,75	4,48

Příloha 4 - Naměřené hodnoty pro materiál z označením **PSV**.

č.vzorku	PSV				
	I [kA]	Fmax [kN]	d1 [mm]	d2 [mm]	dstr [mm]
25-1	6,73	4,69	4,35	4,3	4,33
25-2	6,84	4,52	4,6	4,35	4,48
25-3	6,72	4,87	4,7	4,4	4,55
25-4	6,53	4,43	4,85	4,8	4,83
25-5	6,85	4,45	5,05	4,9	4,98
25-6	6,85	4,53	4,8	4,7	4,75
25-7	6,82	4,57	4,3	4,1	4,20
25-8	6,85	4,50	4,4	4	4,20
25-9	6,78	4,44	4,4	3,95	4,18
25-10	6,71	4,45	4,65	3,5	4,08
25-11	6,65	4,48	4,8	4,25	4,53
50-1	6,61	4,56	5,45	5	5,23
50-2	6,77	6,89	5,15	4,9	5,03
50-3	6,76	4,63	4,75	4,05	4,40
50-4	6,91	4,93	4,65	4,6	4,63
50-5	6,75	4,91	4,65	4,55	4,60
50-6	6,67	4,70	4,65	4,15	4,40
50-7	6,77	4,66	5,35	4,4	4,88
50-8	6,72	4,62	6,15	5,45	5,80
50-9	6,76	4,45	5	4	4,50
50-10	6,56	4,50	4,45	4,35	4,40
50-11	6,61	4,45	5,85	4,8	5,33
75-1	7,11	4,58	4,6	4,35	4,48
75-2	7,05	4,54	5,4	4,4	4,90
75-3	6,90	4,65	4,8	4,6	4,70

75-4	6,92	4,78	5	4,9	4,95
75-5	6,82	5,04	4,6	4,45	4,53
75-6	7,01	4,81	4,5	4,4	4,45
75-7	7,08	4,65	4,9	4,9	4,90
75-8	6,99	4,56	5,8	4,9	5,35
75-9	6,75	4,63	4,7	4,65	4,68
75-10	6,61	4,58	5,1	4,5	4,80
75-11	6,89	4,54	5,25	4,6	4,93
100-1	7,41	4,85	4,35	4,5	4,43
100-2	7,42	4,85	4,4	4,3	4,35
100-3	7,50	4,59	5,25	4,45	4,85
100-4	7,32	6,66	4,8	4,4	4,60
100-5	7,39	4,56	4,75	4,4	4,58
100-6	7,37	4,47	4,4	4,25	4,33
100-7	7,29	4,46	4,35	3,8	4,08
100-8	7,28	4,53	5	5	5,00
100-9	7,41	4,55	4,25	4	4,13
100-10	7,44	4,56	5,5	4,3	4,90
100-11	7,39	4,50	4,8	4,25	4,53
150-1	7,39	4,55	4,9	4,8	4,85
150-2	7,51	4,42	4,3	4,05	4,18
150-3	7,54	4,53	4,3	4	4,15
150-4	7,59	4,35	3,8	3,7	3,75
150-5	7,69	4,36	4,95	4	4,48
150-6	7,67	4,22	4,4	4,3	4,35
150-7	7,41	4,46	4,9	4,8	4,85
150-8	7,60	4,44	4,25	4	4,13
150-9	7,51	4,49	5	3,85	4,43
150-10	7,53	4,52	5	4,45	4,73
150-11	7,37	4,44	4,3	3,8	4,05
200-1	7,79	3,57	5,3	5,5	5,40
200-2	8,05	3,69	5,2	5,2	5,20
200-3	8,06	3,30	5,7	5,75	5,73
200-4	7,95	3,65	5,4	5,2	5,30
200-5	8,06	3,30	5,4	5,25	5,33
200-6	7,99	3,30	5,25	5,15	5,20
200-7	8,03	3,30	5,35	5,25	5,30
200-8	7,91	3,27	5,35	5,05	5,20
200-9	7,82	4,05	5,3	4,9	5,10
200-10	7,75	3,95	5,3	5,2	5,25
200-11	7,81	4,07	5,2	4,8	5,00
250-1	7,55	4,54	4,8	4,55	4,68
250-2	7,62	4,04	4,6	4,7	4,65
250-3	7,69	4,25	5,55	5,3	5,43
250-4	7,74	4,30	5,3	4,9	5,10

250-5	7,56	4,42	5,7	5,3	5,50
250-6	7,47	4,21	4,9	4,45	4,68
250-7	7,42	4,88	5	3,8	4,40
250-8	7,33	4,95	5,3	3,6	4,45
250-9	7,82	4,46	5	3,6	4,30
250-10	7,52	4,46	5,25	3,7	4,48
250-11	7,23	5,11	4,8	3,5	4,15
300-1	7,35	4,62	5,6	3,6	4,60
300-2	7,48	4,65	4,8	4,1	4,45
300-3	7,66	4,75	4,8	4,35	4,58
300-4	7,45	4,88	5,6	3,9	4,75
300-5	7,69	4,47	4,9	4,25	4,58
300-6	7,71	4,36	5,3	4,1	4,70
300-7	7,67	4,36	4,3	4,3	4,30
300-8	7,62	4,50	4,3	3,6	3,95
300-9	7,69	4,52	5,1	3,85	4,48
300-10	7,40	4,71	5,5	3,7	4,60
300-11	7,64	4,27	4,9	4,15	4,53