



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Kvantifikace opotřebení elektrod při
odporovém svařování**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Tomáš Burket

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

STUDIJNÍ PROGRAM: N 2301 Strojní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 3911T035 Výrobní a materiálové inženýrství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Burket** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **483151**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Kvantifikace opotřebení elektrod při odporovém svařování

Název diplomové práce anglicky:

Quantification of electrode wear in resistance welding

Pokyny pro vypracování:

- Analýza fenoménu opotřebení elektrod při RSW (ekonomické důsledky, kvalita spoje, vliv svařovaného materiálu a jeho povlaku)
- Návrh způsobu monitorování a hodnocení opotřebení elektrod
- Provedení experimentu a jeho vyhodnocení
- Závěr

Seznam doporučené literatury:

ZHANG, X.Q., G.L. CHEN a Y.S. ZHANG. Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2006.10.025
MATHISZIK, Ch., D. KÖBERLIN, S. HEILMANN, J. ZSCHETZSCHE a U.FÜSSEL. General Approach for Inline Electrode Wear Monitoring at Resistance Spot Welding. Processes. Dostupné z: doi:10.3390/pr9040685
ZHOU, L, Tianjian L, W. ZHENG, Z. ZHANG, Z. LEI, L. WU, S. ZHU a W.W ANG. Online monitoring of resistance spot welding electrode wear state based on dynamic resistance. Dostupné z: doi:10.1007/s10845-020-01650-6

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Ing Milan Dvořák ŠKODA Auto a.s.

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **13.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

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

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mi byli při psaní této diplomové práce nápomocní. Především děkuji vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za její odborné vedení, trpělivost a vstřícný přístup. Musím poděkovat Ing. Vlastimilu Králíkovi, Ph.D. za naskenování opotřebovaných elektrod. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Milanu Dvořákovi za odborné připomínky a zprostředkování zkoušek. Několika dalším kolegům děkuji za jejich pomoc s mechanickými zkouškami. Důležitá pro mě byla možnost konzultací s odborníky, které pro mě byly svými podněty k práci a odbornými poznatky značně přínosné. Musím také vyjádřit vděčnost své rodině, bez jejichž podpory bych tuto práci a celé studium nebyl schopen dokončit.

Anotace

Diplomová práce se zabývá opotřebením svařovacích elektrod při odporovém bodovém svařování. V teoretické části jsou popsány degradační děje, které mají dopad na opotřebení elektrody. V experimentální části se práce zaměřuje na monitorování a kvantifikaci opotřebení elektrod. Využívá se 3D skenování pomocí optické profilometrie. Je popsáno zpracování dat v software Matlab a vyhodnocení vybraných parametrů topografie. Byly definovány tři sledované parametry topografie (objemové změny přírůstku a úbytku materiálu, axiální opotřebení a změna kontaktní plochy). Experiment byl proveden na šesti sadách vzorků různých materiálů a povrchových úprav, tak aby byly sledovány různé průběhy opotřebení. Získaná data ukázala, typické průběhy pro plechy s povrchovou úpravou žárovým zinkem a s elektrolytickým zinkem. Byly ověřeny hodnoty axiálního opotřebení, které se v některých aplikacích používají pro online monitorování. Zkoumané parametry jsou poté dávány do souvislosti s kvalitou svaru.

Název diplomové práce:	Kvantifikace opotřebení elektrod při odporovém svařování
Autor práce:	Bc. Tomáš Burket
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE
Konzultant:	Ing. Milan Dvořák (Škoda Auto a.s.)
Akademický rok:	2022/2023
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	90 stránek, 10 tabulek, 52 obrázků
Klíčová slova:	odporové bodové svařování, opotřebení svařovacích elektrod, měření topografie, automobilový průmysl, optický profilometr

Annotation

This thesis deals with wear of welding electrodes during resistance spot welding. The theoretical part describes the degradation processes that have an impact on electrode wear. In the experimental part, the thesis focuses on the monitoring and quantification of electrode wear. 3D scanning using optical profilometry is used. Data processing in Matlab and evaluation of selected topography parameters is described. Three monitored topography parameters (volumetric changes in material, axial wear and change of contact area) have been defined. The experiment has been performed on six sets of samples of different materials and surface treatments so that different wear patterns can be monitored. The data obtained showed typical patterns for hot dip galvanized and electrolytic zinc coated sheets. The axial wear values used in some applications for online monitoring have been verified. The investigated parameters are then related to the weld quality.

Title of the final thesis:	Quantification of electrode wear in resistance spot welding
Author:	Bc. Tomáš Burket
Supervisor:	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE
Consultant:	Ing. Milan Dvořák (Škoda Auto a.s.)
Academic year:	2022/2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent:	90 pages, 10 tables, 52 pictures
Keywords:	resistance spot welding, electrode wear, topography measurement, automotive, optical profilometer

Obsah

1. ÚVOD.....	11
2. ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ A JEHO PRINCIP	12
2.1 Princip odporového ohřevu	12
2.2 Vznik svarového spoje	13
2.3 Měrný elektrický odpor	15
2.4 Přechodový odpor.....	16
2.5 Dynamický odpor	18
3. VELIČINY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU SVARU	20
3.1 Elektrody	20
3.2 Přítlačná síla	21
3.3 Svařovací čas	22
3.4 Svařovací proud	23
3.5 Svařovací program	24
3.6 Svařovací režim	24
4. ELEKTRODY PRO BODOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	24
4.1 Materiál elektrod	25
4.2 Geometrie elektrod	26
4.3 Životnost čepiček	26
5. VADY SVAROVÝCH BODŮ	27
6. MECHANISMY DEGRADACE ELEKTROD.....	28
6.1 Deformace.....	29
6.2 Odpevňování.....	31
6.3 Difuze	32
6.4 Vytrhávání materiálu z elektrody	34
7. PŘEHLED DESTRUKTIVNÍCH ZKOUŠEK.....	35
7.1 Zkouška stříhem.....	36
8. MONITOROVÁNÍ OPOTŘEBENÍ ELEKTRODOVÝCH ČEPIČEK.....	37
8.1 Stav techniky.....	38
9. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	44
9.1 Cíle experimentální části práce.....	44
9.2 Návrh a podmínky experimentu	44

9.2.1	Použité materiály a vzorky.....	45
9.2.2	Svařovací zařízení a elektrody	47
9.2.3	Svařovací parametry.....	48
9.3	Měření topografie opotřebených čepiček.....	49
9.4	Způsob vyhodnocování parametrů topografie.....	51
9.4.1	Zpracování dat	52
9.4.2	Parametr Δv – objemové změny	53
9.4.3	Parametr Δl – změna axiální délky	55
9.4.4	Parametr Δs – změna kontaktní plochy.....	56
9.5	Provedení zkoušek bodových svarů.....	57
9.5.1	Zkouška stříhem.....	57
9.5.2	Průměr svarové čočky – UTZ a ruční měření.....	58
9.5.3	Metalografie	60
10.	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	62
10.1	Vývoj parametrů objemových změn s opotřebením.	62
10.2	Změna kontaktní plochy s opotřebením	64
10.3	Změna délky elektrody s opotřebením	66
10.4	Vyhodnocení zkoušky stříhem	67
10.5	Vyhodnocení průměrů svarových čoček.....	68
10.6	Vyhodnocení metalografie	70
11.	ZÁVĚR	71
	Bibliografie.....	72
	Seznam obrázků.....	75
	Seznam tabulek	78
	Seznam příloh	78

Seznam zkratek

RSW	Resistance spot welding	Odporové bodové svařování
RMS	Root mean square	Efektivní hodnota (proudu)
AC	Alternating current	Střídavý proud
DC	Direct current	Stejnoseměrný proud
CD	Condensator discharge	kondenzátorový výboj
MFDC	Mid frequency direct current	středofrekvenční invertorový proud
VW		Volkswagen
AHSS	Advanced High-Strength Steel	Pokročilé vysokopevnostní ocele
HSLA	High Strength Low Alloy	Vysokopevnostní nízkolegované ocele
IF	Interstitial free	
UTZ		Ultrazvuk
ToF	Time of flight	Doba letu
NDT	Non-destructive testing	Nedestruktivní testování
CAD	Computer aided design	
HDG	Hot dip galvanized	Žárově zinkováno
EG	Electro galvanized	Elektrolyticky zinkováno
HV	Vickers hardness	Tvrdość dle Vickerse
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren	Německý svářečský svaz
RWMA	Resistance Welder Manufactures Association	

Seznam použité symboliky

dQ	Elektrický náboj	[C]
I	Elektrický proud	[A]
W	Práce	[J]
T	Teplota	[°C]
c_p	Měrná tepelné kapacita	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
m	Hmotnost	[kg]
ρ	Měrný elektrický odpor	[Ω mm ² m ⁻¹]
R	Elektrický odpor	[Ω]
J	Hustota elektrického proudu	[A m ⁻²]
E	Intenzita elektrického pole	[V m ⁻¹]
dS	Elementárním průřez vodiče	[m ²]
P	Výkon	[W]
Q_T	Generované teplo	[J]
T_t	Teplota tavení	[K]
d_{el}	Průměr čela elektrody	[mm]
t	Tloušťka plechu	[mm]
F	Přítlačná síla	[F]
I_{RMS}	Efektivní hodnota el. proudu	[I]
E	Youngův modul	[MPa]
∇c	Gradient koncentrace	[mol m ⁻⁴]
J_{dif}	Hustotou difúzního toku	[mol s ⁻¹ m ²]
Δl	Prodloužení	[mm]
Δl	Axiální změna délky elektrody	[mm]
Δs	Změna kontaktní plochy elektrody	[mm ²]
Δv_+	Přírůstek objemu materiálu	[mm ³]
Δv_-	Úbytek objemu materiálu	[mm ³]

1. ÚVOD

Odporové bodové svařování (RSW) je jedním z řady průmyslových svařovacích procesů, při nichž se teplo potřebné ke svařování získává jako tzv. Jouleovo teplo.

Existuje velké množství technologií využívající princip odporového ohřevu, tato práce se ale zabývá pouze odporovým bodovým svařováním. Kromě RSW jsou další tři běžné metody odporového svařování odporové švové svařování (RSEW), výstupkové svařování (RPW) a stykové svařování (RFW).

RSW funguje velmi dobře při svařování relativně tenkých plechů, které jsou běžné v automobilové výrobě. Rychlé svařovací časy v kombinaci s příhodným mechanismem přidržení svařovaných plechů z něj činí ideální proces pro vysoce produktivní robotické svařování, na kterém je produktivita automobilového průmyslu značně závislá. Odporové svařování se používá také v řadě dalších průmyslových odvětví včetně zdravotnického průmyslu, při výrobě trubek nebo spotřebičů a v elektrotechnice.

Při většině svařovacích procesů vznikají svary, které poskytují indikace o kvalitě svaru, takže vizuální kontrola je často prvním přístupem k ověření kvality svaru. U většiny procesů odporového svařování však není vizuální kontrola možná kvůli umístění svaru mezi svařovanými plechy nebo díly. Z toho důvodu a kvůli obrovskému množství provedených svarů je důležité odladění procesu, jeho validace a poté sledování parametrů a proměnných vstupujících do procesu.

Nevýrobní prostoje jsou hlavními negativními finančními faktory ve všech průmyslových procesech. V případě odporového svařování vede zvýšená degradace svařovacích elektrod k prodloužení prostoje z důvodu častějšího ofrézování nebo výměny svařovacích elektrod.

2. ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ A JEHO PRINCIP

2.1 Princip odporového ohřevu

Elektrické síly vykonají přenášením elektrického náboje dQ [C] při konstantním elektrickém napětí U [V] elementární práci dW [J].

$$dW = U \cdot dQ \quad [J] \quad (2.1)$$

Prochází-li vodičem konstantní proud I [A] po dobu t [s], lze el. náboj vyjádřit jako $dQ = I \cdot dt$ a pro práci elektrického proudu W pak platí:

$$W = U \cdot I \cdot dt \quad [J] \quad (2.2)$$

Pokud je práce a teplo považována za ekvivalentní, lze získat s použitím Ohmova zákona vztah označovaný jako Joule-Lenzův zákon:

$$Q_T = \int_0^t I(t)^2 \cdot R(t) dt \quad [J] \quad (2.3)$$

Vznik Joulova tepla lze vysvětlit následovně. Při průchodu elektrického proudu vodičem nosiče náboje (elektrony) narážejí do atomů v mřížce a předávají jim část své kinetické energie a tím se vodič makroskopicky zahřívá.

Množství tepla potřebné pro ohřev o teplotu ΔT [°C] materiálu o měrné tepelné kapacitě c_p [J kg⁻¹K⁻¹] a hmotnosti m [kg] lze získat pomocí následujícího vztahu:

$$\Delta Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [J] \quad (2.4)$$

Podobně jako se zahřívá vodič, když jím prochází proud, vzniká při průchodu proudu svařovanými díly (plechy) teplo potřebné pro vytvoření bodového svaru. V procesu RSW hrají zásadní roli pojmy rezistence (též elektrický odpor) a rezistivita (též měrný elektrický odpor). *Měrný elektrický odpor* ρ [$\Omega \cdot m$] je fyzikální vlastnost materiálu, která udává, jak silně kov brání průtoku elektrického proudu. *Elektrický odpor* R [Ω] zahrnuje fyzikální vlastnost rezistivitu, ale také geometrii vodiče, kterým prochází proud. Vzorec pro elektrický odpor je

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad [\Omega] \quad (2.5),$$

kde ρ [Ωm] je *měrný elektrický odpor materiálu*, l [m] je *délka vodiče* a A [m²] je *plocha vodiče*. [1] [2]

Z rovnice 2.3 je pochopitelné, že kovy s vyšším měrným odporem (př. ocel) se odporově svařují snadněji než kovy, které lépe vedou elektrický proud, jako je např. hliník.

Tabulka 1: Měrný elektrický odpor vybraných materiálů [3]

Materiál	Měrný elektrický odpor ρ [$\mu\Omega \cdot m$]
Měď (Cu)	0,018
Mosaz (CuZn)	0,075
Zinek (Zn)	0,059
Hliník (Al)	0,028
Železo (Fe)	0,130

Pro popis elektrických poměrů je také vhodná *hustota elektrického proudu* J [$A \cdot m^{-2}$] neboli proudová hustota. Proudová hustota je vektorová veličina, popisující lokální rozložení elektrického proudu. Její směr je totožný se směrem pohybu kladného náboje, tedy stejný jako směr *intenzity elektrického pole* E [$V \cdot m^{-1}$]. Její velikost je rovna podílu *elektrického proudu* I [A] procházejícího daným *elementárním průřezem* dS [m^2] kolmým na směr pohybu nábojů.

$$J = \frac{dI}{dS} \quad \left[\frac{A}{mm^2} \right] \quad (2.6)$$

Diferenciální tvar Jouleovy rovnice udávající *výkon* P [W] na jednotku objemu lze získat skalárním součinem

$$\frac{dP}{dV} = \mathbf{E} \times \mathbf{J} \quad \left[\frac{W}{mm^3} \right] \quad (2.7)$$

Po vyjádření proměnných a dosazení rovnic 2.5 a 2.6 do rovnice 2.3 získáme vztah pro generované teplo vztažené na jednotku objemu za 1 sekundu

$$\frac{\Delta Q_T}{\Delta V \cdot t} = (J \cdot A)^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{A} \cdot \frac{1}{l \cdot A} \quad [J/mm^3] \quad (2.8)$$

, po úpravě

$$q_v = J^2 \cdot \rho \quad [J/mm^3] \quad (2.9)$$

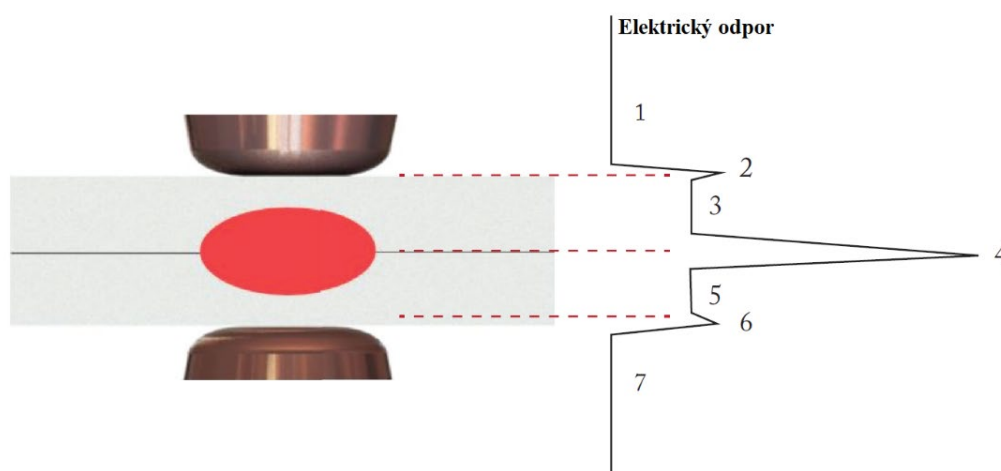
Z této rovnice je vidět zásadní vliv proudové hustoty na měrné generované teplo. Tento vliv je dále diskutován v kapitole 4.1. [1] [4] [5]

2.2 Vznik svarového spoje

Proces odporového bodového svařování spočívá v dosednutí dvou protilehlých elektrod obvykle na bázi mědi na svařované díly. Elektrody plní dvě funkce – poskytují upínací sílu a přenášejí elektrický proud přes dva svařované plechy. Pokud jsou plechy ocelové, bude

jejich odpor proti průchodu proudu výrazně vyšší než u měděných elektrod, takže ocel se bude zahřívat, zatímco elektrody zůstanou relativně chladné (viz Tabulka 1). V místě styku plechů vzroste teplota až nad teplotu tavení. Výsledkem je vytvoření svaru eliptického tvaru mezi plechy nazývaný svarová čočka. [1] [5]

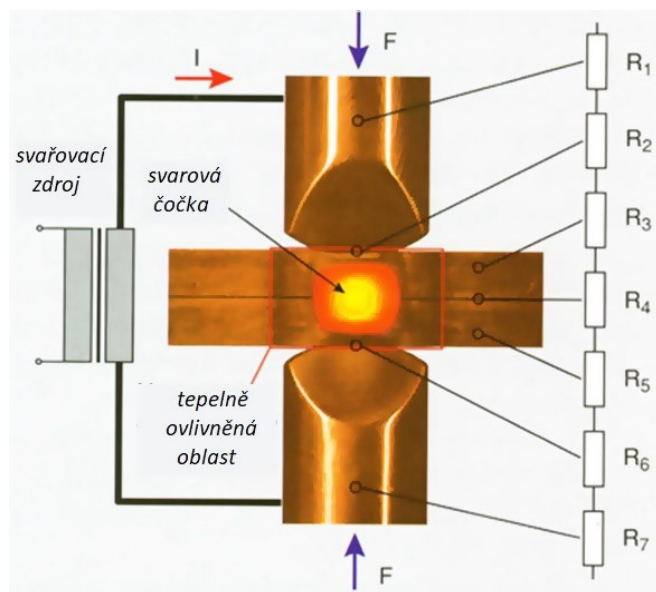
Pro odporové svařování je stejně důležité rozložení tepla v různých místech svarového spoje jako celkové vzniklé teplo, jelikož ohřev není a neměl by být ve svarovém spoji rovnoměrný. Rychlost ohřevu je také důležitá, protože to, jak rychle je teplo během svařování generováno, určuje průběh teploty v čase (teplotní cyklus) a následně mikrostrukturu.



Obrázek 1: Relativní průběh elektrického odporu napříč odporovým bodovým svarem. [2]

Vznik tepla spojený s procesem RSW je složitější než pouhé zahřívání vodiče průchodem elektrického proudu. Obrázek 1 ukazuje standardní uspořádání při RSW a obsahuje graf odporu napříč elektrodami a spojem. Jak je uvedeno na obrázku, největší odpor proti průtoku proudu je v místě, kde se plechy vzájemně dotýkají. Tato skutečnost umožňuje, aby se svarová čočka začala tvořit a růst přesně tam, kde je to potřeba – mezi plechy. Je důležité zdůraznit, že zatímco Obrázek 1 vlevo ukazuje situaci úspěšně vytvořeného svaru, graf průběhu odporu napravo popisuje situaci na samém začátku svařování ještě před vytvořením svarové čočky. Čísla 1÷7 na Obrázku 1 (vpravo) odpovídají místům, kde si lze představit idealizované odpory na Obrázku 2.

Pro zjednodušení mechanismu vzniku tepla lze cestu proudu od jedné elektrody k druhé přirovnat k elektrickému obvodu, který obsahuje sedm sériově zapojených odporů. Jak bude konkrétněji popsáno dále, odpory se během krátké doby rychle mění. Celkový odpor proměnlivý v čase je pak označován jako průběh dynamického odporu.



Obrázek 2: Zjednodušení obvodu na sériově zapojené rezistory. [6]

V rovnici (2.3) popisující celkové množství tepla je v součinu dynamický odpor. Tato hodnota je součtem jednotlivých odporů.

Součet odporů tvoří:

- vnitřní odpor elektrod R1 a R7,
- přechodové odpory kontaktními plochami elektrod a povrchem plechu R2 a R6,
- vnitřní odpory svařovaných dílů R3 a R5,
- přechodový odpor mezi svařovanými plechy R4.

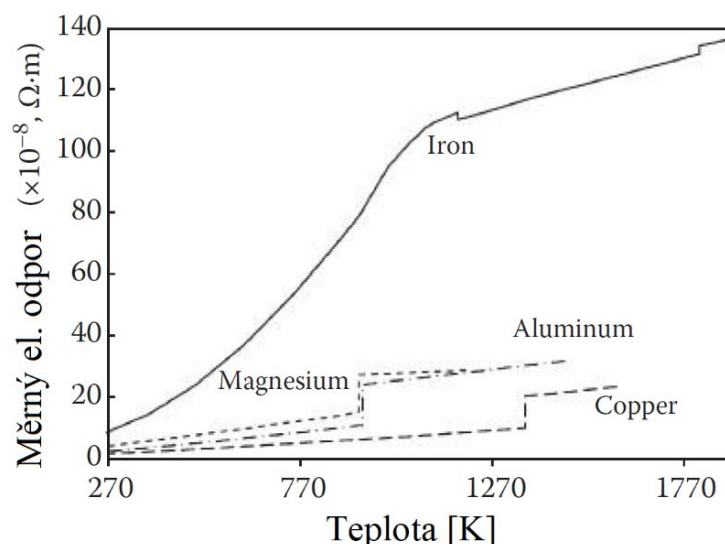
[2] [4]

2.3 Měrný elektrický odpor

Měrný odpor svařovaných dílů a elektrod

Faktorem, který silně působí ve prospěch odporového svařování oceli, je skutečnost, že při zahřívání oceli se její měrný elektrický odpor ρ vůči mědi výrazně zvyšuje, což je patrné z Obrázku 3.

V porovnání s ocelí je elektrický odpor hliníku velmi nízký, respektive jeho elektrická vodivost je velmi vysoká. Před roztavením ($T_{\text{tAl}}=660\text{ °C}$) se el. odpor hliníku blíží hodnotám el. odporu mědi. Z tohoto důvodu je obtížné svařovat čistý hliník i elektrodami z čisté mědi. V praxi se však čistý hliník používá jen zřídka. Častěji se setkáváme s jeho různými slitinami, jako jsou Al-Cu nebo Al-Mg, které mají vyšší elektrický odpor než čistý hliník. [2]

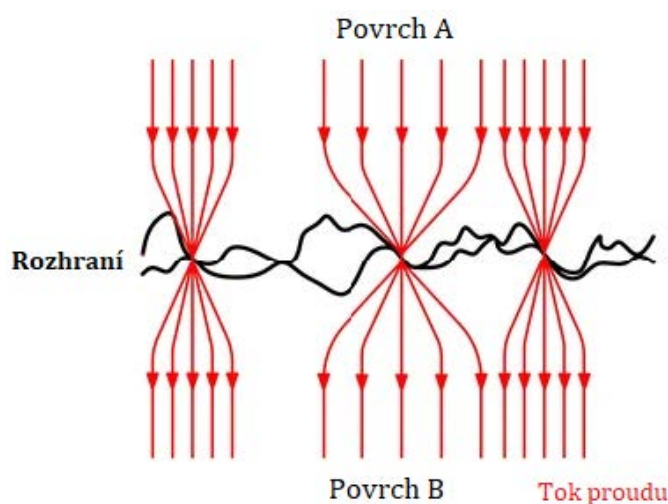


Obrázek 3: Závislost Měrného elektrického odporu na teplotě pro Fe, Mg, Al, Cu [1]

Elektrody čistě z mědi by z pohledu zahřívání byly výhodné z důvodu menšího měrného odporu a tím menšího generovaného tepla. Avšak na elektrody také klademe požadavek na mechanickou odolnost, proto jsou často k mědi přidávány v malém množství další kovové prvky nebo vzácné zeminy viz kapitola 5.1. [1]

2.4 Přejchodový odpor

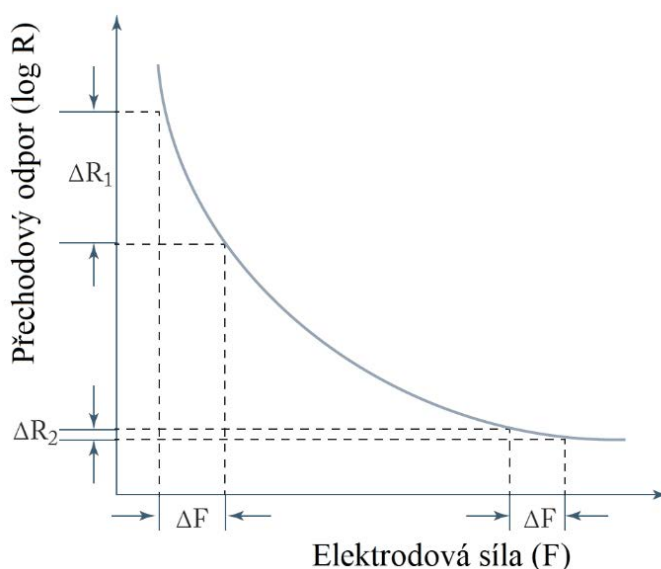
Přejchodový odpor je odpor proti průchodu proudu přes styčné plochy dvou vodičů. Jeho hodnota se mění v závislosti na složení kovu, tlaku, znečištění povrchu a geometrii povrchu (tj. rovnoběžnost, důlky atd.).



Obrázek 4: Omezený průchod proudu přejchodovým odporem. [7]

Jak je znázorněno na Obrázku 5, velikost kontaktního odporu silně závisí na použité přitlačné síle elektrody. Všechny svařované díly mají určitou drsnost povrchu, která omezuje reálnou

dosedací plochu při jejich kontaktu. V důsledku toho budou elektrony při průchodu proudem nuceny protékat úzkými oblastmi, kde se dotýkají povrchové nerovnosti. To vytváří lokální extrém v hustotě proudu, které způsobují v daném místě nadměrné zahřívání. Při současném působení elektrodové síly se povrchové výstupky (v aj literatuře nazývané asperity) zbortí, zvětší se plocha umožňující průchod elektronů a zmenší se teplotní extrém. Při uvážení rovnice 2.5 a grafu na Obrázku 3 se kontaktní odpor sníží. To znamená, že obecně u RSW vedou vyšší síly k menšímu zahřívání v důsledku snížení přechodového odporu. Kromě drsnosti povrchu zvyšují kontaktní odpor, okuje, rez a jiné oxidy, nebo mastnota a oleje. Vyšší elektrodové síly budou mít stejný účinek na snížení kontaktního odporu tím, že naruší oxidy a vytlačí další povrchové nečistoty. [7] [1]



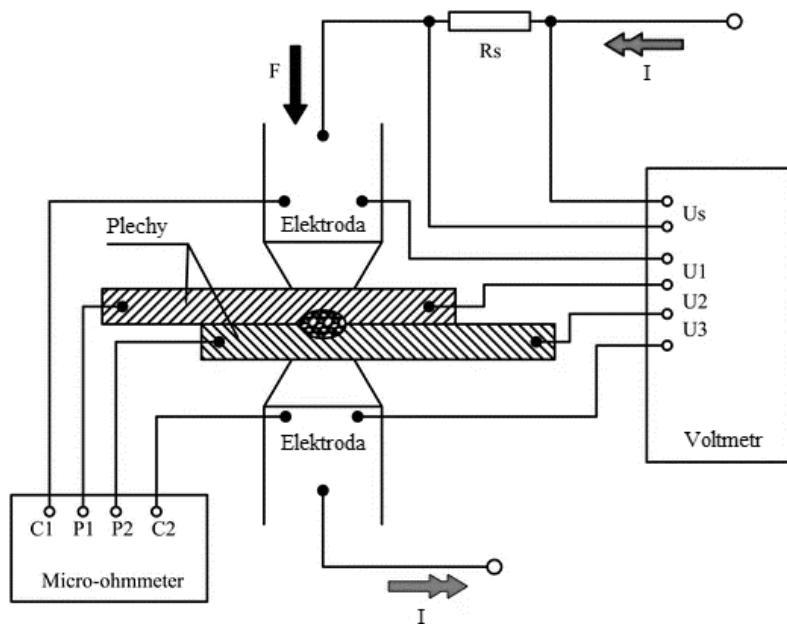
Obrázek 5: Závislost kontaktního odporu na síle. Přeloženo z [2].

Z již zmíněných důvodů ideální tvorby svarové čočky je důležité, aby nejvyšší přechodový odpor byl právě mezi plechy. A naopak je žádoucí, aby byl přechodový odpor na rozhraní elektroda-plech co nejmenší, čehož lze dosáhnout materiálem a správným chlazením čepiček.

Proto se zdá být logické, že by bylo ideální použít co nejmenší síly. Obrázek 5, graf závislosti kontaktního odporu na elektrodové síle, však ukazuje, proč tomu tak není. Při příliš nízkých elektrodových silách způsobí malé změny síly velké změny kontaktního odporu. Vzhledem k tomu, že některé bodové svářečky používají k vytvoření síly méně přesné pneumatické válce, může docházet k malým změnám síly napříč díly, které pak mají za následek velké změny kontaktního odporu. Tento problém mohou ještě umocňovat rozdíly

v jakosti povrchu plechů, což je ve výrobě do určité míry možné. K dosažení konzistentních svarů je proto zapotřebí vyšších sil. Pokud jsou však síly příliš vysoké, může být velkým problémem otlacení dílu a zvýšené opotřebení elektrody. Také musí být síla dostatečně velká, aby udržena taveninu uvnitř čočky a přitom ne až moc velká aby naopak nedocházelo k vymáčknutí a rozstříku taveniny. [2]

Na Obrázku 6 níže je vyobrazen typický přístup k měření odporu tzv čtyřvodičovou metodou. Pokud vezmeme v potaz zjednodušení obvodu na několik za sebou sériově zapojených rezistorů jako na Obrázku 2, dalo by se při porovnání dvou vhodně uspořádaných zapojení získat hodnotu přechodového odporu. Toto měření je s úspěchem realizovatelné při použití nízkých napětí a proudů, prakticky při nízké teplotě. Jak je uvedeno v předchozí kapitole přechodový odpor se značně mění v závislosti na síle a teplotě. Větší výzvou je tedy provedení tohoto měření při podmínkách reálněji simulujících silové a tepelné poměry při svařování. Měření přechodového odporu se věnuje německý technický list DVS 2929-1. [7] [8]



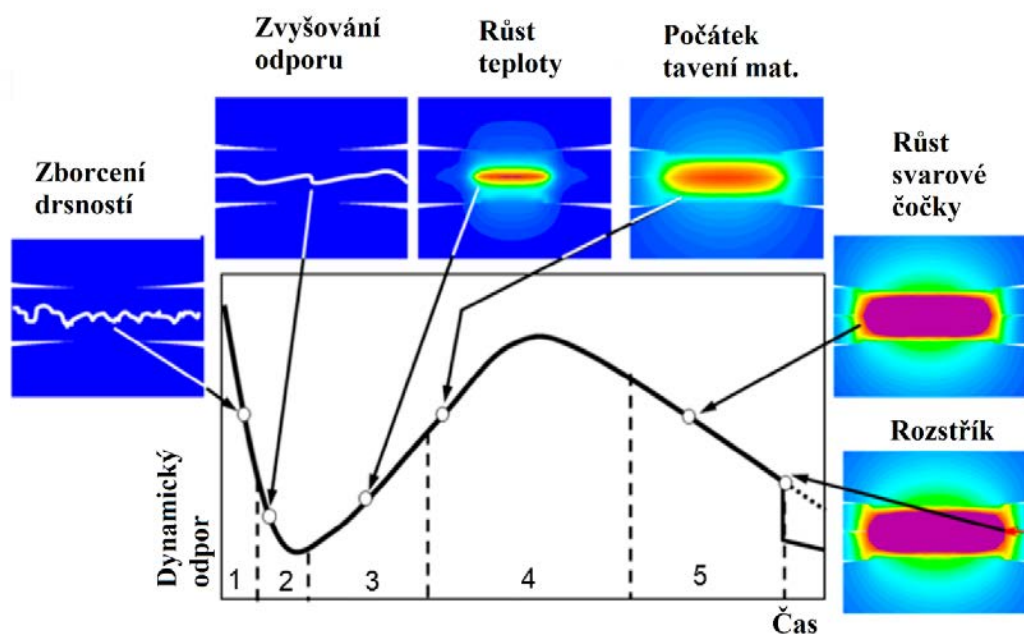
Obrázek 6: Experimentální uspořádání pro měření odporu čtyřvodičovou metodou. Přeloženo z [7].

2.5 Dynamický odpor

Sledováním celkového odporu během tvorby jednoho bodového svaru lze vytvořit graf závislosti odporu na čase. Jak již bylo zmíněno, celkový odpor v bodovém svaru během jeho tvorby není konstantní, ale rychle se mění, a proto je označován za *dynamický*. Typická křivka dynamického odporu pro uhlíkovou ocel je znázorněna na Obrázku 7 s popisem dějů v dílčích

oblastech křivky. Graf dynamického odporu pomáhá pochopit základy odporového svařování a také poskytuje metodu pro kontrolu kvality svaru.

Odpor se obvykle neměří metodou znázorněnou na Obrázku 6, ale dopočítává se z napětí a proudu. [1] [5]



Obrázek 7: Typická křivka dynamického odporu pro uhlíkovou ocel. Přeloženo z [9]

Jak je naznačeno na Obrázku 7, dynamický odpor je na počátku relativně vysoký, protože povrchové oxidy a drsný povrch vytvářejí větší odpor proti průtoku proudu. Převládá účinek přechodového odporu. Jak již bylo zmíněno, při dostatečném tlaku a zahřátí se oxidické vrstvy naruší a výstupky drsností (viz Obrázek 4) se zbertí, čímž se přechodový odpor sníží. Zahříváním materiálu v další fázi se dramaticky zvyšuje jeho měrný odpor, který začíná převládat a pokles dynamického odporu se zpomaluje. Po dosažení teploty tavení se začíná tvořit svarová čochka. Jak čochka roste, snižuje se proudová hustota, která způsobuje, že odpor se na chvíli ustálí a pak klesá. K rychlejšímu poklesu odporu může dojít, pokud dojde k vtisku elektrod, protože se zmenší proudová dráha. Pokud dojde k rozstříku, je znatelný výrazný pokles, popřípadě zakolísání na křivce dynamického odporu. [2]

3. VELIČINY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU SVARU

Jako parametry svařovacího procesu jsou označovány svařovací proud, čas svařování a síla, kterou působí elektrody. Ostatní proměnné vstupující do procesu nazýváme veličinami. Moderní řídicí jednotky strojů nabízejí možnost přizpůsobit a přesně řídit každý z parametrů.

Svařovací proud uvádí většina zdrojů jako nejdůležitější parametr při odporovém svařování, avšak některé zdroje docházejí k poznatku, že pro odlišné materiály může význam jiných parametrů převládat. Z provedené rešerše lze tvrzení zobecnit a konstatovat, že na kvalitu svaru má největší vliv svařitelnost materiálu (s konkrétním povlakem), pro který má následně jeden z parametrů převládající vliv. [2]

3.1 Elektrody

Průměr čela elektrody

Velikost čela elektrody ovlivňuje tlak na elektrodu (F uvažujeme konst.) a proudovou hustotu. Z pohledu tepelných pochodů ovlivňuje kontaktní plocha odvod tepla pryč ze svaru. Pokud je průměr čelní plochy zvolen větší, snižuje se tlak a proudová hustota. Podobné výsledky se objeví, když se průměr čela elektrody zvětšuje v důsledku opotřebení a deformace. Pokud je průměr menší než ideální hodnota, může dojít k vytlačení, nadměrnému vtisku nebo přilepování elektrody k svařovanému materiálu. [5] [8]

Norma [10] uvádí doporučený vztah pro průměr čela elektrody dle tloušťky plechu t .

$$d_{el} = 5\sqrt{t} \quad [\text{mm}] \quad (3.1)$$

Tvar čela elektrody

Tvar čela elektrody ovlivňuje tvar a velikost vtisku. Pro udržení stálé kvality svaru může být nutné elektrody po omezeném počtu svarů znovu ořezovat, aby se zachoval jejich geometrický tvar a správná plocha čela. Oba tyto faktory se podílejí na umístění svarové čocky a její velikosti. [5] [8]

Velikosti elektrod

Hlavním nástrojem pro dosažení tepelné rovnováhy na svarových plochách je proudová hustota (tj. svařovací proud na jednotku plochy). Při daném proudu bude mít elektroda s velkou kontaktní plochou nižší proudovou hustotu než elektroda s malou kontaktní plochou. Příkladem toho, jak je toto aplikováno, je umístění velké plochy elektrody proti tenkému plechu a malé plochy elektrody proti silnějšímu plechu. Při průchodu svařovacího

proudu tímto obvodem se silnější plech zahřívá stejně rychle jako tenký plech. Pokud je kombinace správná, dosáhnou vnitřní hrany plechů požadované teploty současně a svar se vytvoří na rozhraní plechů.

Hmotnost elektrody bude určovat rychlost ohřevu a chlazení elektrody. [5] [8]

Chlazení elektrod.

Elektrody pro bodové svařování by měly být vnitřně chlazeny vodou, aby se zabránilo jejich přehřátí, které vede k přilepení elektrody ke svařovanému plechu a tím ke snížení její životnosti. Rozlišujeme dva způsoby uspořádání – s uzavřeným a s otevřeným okruhem. V uzavřeném chladicím okruhu nejsou elektrody v kontaktu s vodou, používají se svařovací čepičky, které se nasazují na chlazené čepy. V otevřeném okruhu dosahujeme lepšího chlazení. Doporučují se následující požadavky. Průtok vnitřní chladicí kapaliny se může pohybovat přibližně od 2 do 6 l/min na elektrodu v závislosti na typu svařování. Teplota vstupní chladicí vody by neměla překročit 20 °C a na výstupu by se neměla ohřát na více než 30 °C. Teplota ale nesmí být tak nízká, aby na čepičkách kondenzovala voda. Pro dostatečné chlazení se doporučuje maximální tloušťka čela elektrody 13 mm. Přívodní trubička chladicí kapaliny by měla být na špičce seříznuta pod úhlem a zasunuta do dna otvoru v elektrodě tak, aby bylo zajištěno maximální chlazení čela. Není-li přívodní trubice chladicí kapaliny správně umístěna, může se ve špičce elektrody tvořit turbulence nebo dokonce i pára, což sníží odvod tepla. [5] [8] [11]

Kalorimetrická měření ukazují, že až 70 % celkové tepelné energie vzniklé během procesu svařování je odvedeno elektrodami. [11]

3.2 Přítlačná síla

Správné přítlačné síly pro danou kombinaci proudu a doby svařování jsou potřebné k vytvoření svarů s optimální velikostí a průvarem bez vystříknutí, pórovitosti, prasklin nebo nadměrného vtisku. Rozlišujeme sílu dosedací, svařovací a kovací. Obecně má přítlačná síla za úkol zajistit dokonalé dosednutí svařovaných součástí a elektrod a zabránit rozstříkávání roztaveného kovu. Také může kovat materiál, jelikož v případě malé působící síly hrubne zrna a struktura tuhnutí svarové čočky se blíží licí struktuře. Příliš nízké síly nezajišťují rovnoměrnost proudu a zadržení roztaveného kovu. Příliš vysoké síly způsobují vtisky do plechu, jeho deformace a malý průměr svarové čočky. Z důvodu poklesu přechodového odporu vedou nižší hodnoty sil ke vzniku menšího množství tepla, a tudíž vyžadují vyšší

hodnoty proudu, aby bylo zajištěno správné zahřátí rozhraní plechů pro vytvoření požadované svarové čočky.

Pro správné využití svařovací síly je nezbytné zajistit sousost elektrod. Nerovnoběžné plochy elektrod mohou mít za následek nevyužití celé plochy čela elektrody, na kterou poté působí velký tlak. Nerovnoměrné působení svařovací síly může mít poté za následek nadměrné vrypy na povrchu, lokální přehřátí, rozstříky nebo poddimenzované svarové čočky. Podobné výsledky může mít i axiální nesousost elektrod.

Dále může i opotřebením elektrody změnit působící tlak, pokud se zvětší nebo zmenší plocha čela elektrody. [5] [8]

3.3 Svařovací čas

Doba svařování se měří a nastavuje v cyklech síťového napětí. Jeden cyklus je 0,02 sekundy v napájecí soustavě 50 Hz.

Čas stlačení

Doba stlačení (Squeeze time) je doba mezi počátkem svařovacího cyklu a prvním průchodem proudu. Tato doba zahrnuje zpoždění při posunu ventilů, mechanický pohyb svařovací hlavy k dílu, úplné natlakování pístu a přiblížení svařovaných dílů k sobě. Tento čas je nutný pro zpoždění svařovacího proudu, dokud síla nedosáhne požadované úrovně. Což je silně ovlivněno pohonem a konstrukcí svářecích kleští. Nedostatečná doba stlačení má za následek rozstřík a nevyhovující kvalitu svaru. [5] [8] [10]

Čas svařování

Doba svařování je doba, po kterou je přiváděn svařovací proud včetně přestávek při pulzačním svařování. Jak ukazuje rovnice 2.3, vnesená tepelná energie se rovná tepelnému výkonu vynásobenému časem, během kterého je aplikována. Svařovací čas tedy společně s proudem určuje množství dodané energie, ale zároveň zvětšuje tepelně ovlivněnou oblast. Obvykle pro povlakované plechy trvá dle tloušťek (0,8 ÷ 1,5mm) 5-15 cyklů. [5] [8]

Čas výdrže

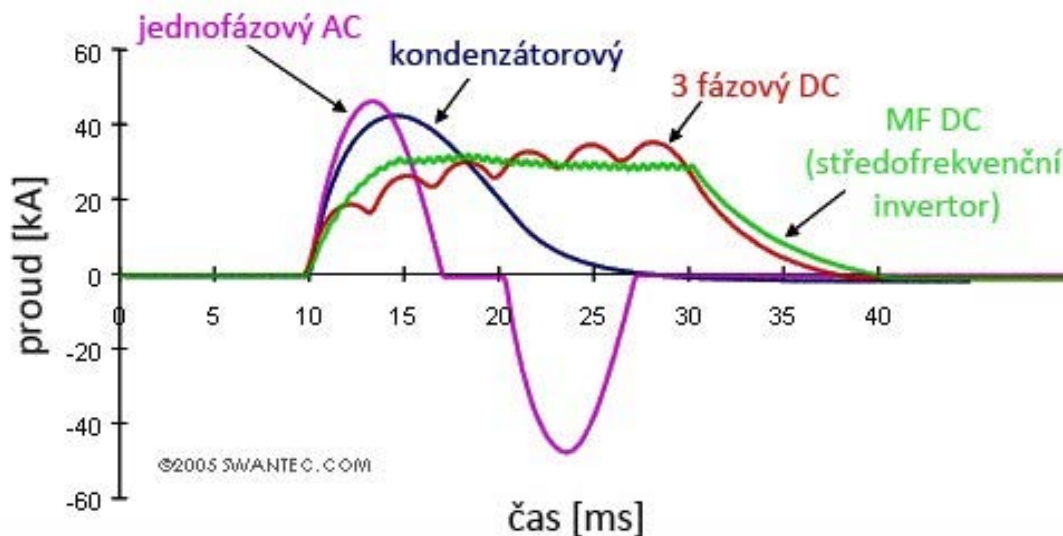
Doba výdrže (Hold time) je doba, po kterou je elektroda v kontaktu s plechy po vypnutí svařovacího proudu. Doba přidržení umožňuje elektrodám udržet a podepřít roztavenou svarovou čočku. Dále doba přidržení napomáhá procesu tuhnutí svaru tím, že umožňuje vodou chlazeným elektrodám odvádět teplo ze svaru. Pokud je použita, tak se obvyklá doba přidržení

pro ztuhnutí svarové čochy u nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí pohybuje do 5 cyklů. [5]
[8]

3.4 Svařovací proud

Svařovací proud určuje množství generovaného tepla ve druhé mocnině, jak je uvedeno ve vzorci 2.3. S rostoucím svařovacím proudem se rychle zvětšuje velikost svarové čochy, ale nastavení příliš vysokého proudu vede k rozstříkům taveniny a poškození elektrody. Obvykle se při nastavování parametrů stroje a řízení procesu používají efektivní hodnoty svařovacího proudu (I_{RMS}) nebo se nastavují procenta z maximálního dostupného svařovacího proudu.

Na Obrázku 8 níže jsou znázorněny typické průběhy svařovacího proudu, které se používají při odporovém svařování. Jsou to jednofázový střídavý proud (AC), třífázový usměrněný – stejnosměrný proud DC, kondenzátorový výboj CD a nyní nejpoužívanější středofrekvenční inverterový MFDC. [5] [12]



Obrázek 8: Průběhy svařovacího proudu dle různých zdrojů. AC, DC, MFDC, kondenzátorový [12]

Sestavení diagramy oblastí svařování (svař. parametrů) se provádí podle normy ČSN EN ISO 14327. Diagramy se z tzv. růstových křivek sestavují buď při konstantní elektrodové síle, nebo při konstantním čase. Růstové křivky jsou vyneseny závislosti velikosti svarové čochy na proudu.

3.5 Svařovací program

Pro některé podmínky svařování mohou být výhodné různé varianty programu svařování – průběhů svařovacích parametrů. Patří mezi ně předehev, stoupání, pulzace, doohřev a klesání proudu. Tyto volby upravují sílu a svařovací proud před, během a po svařování. Všechny programy dodržují zásadu, že svařovací proud je přiveden až po dosažení požadovaného tlaku stlačení. Mohou být použity samostatně nebo ve vzájemné kombinaci, aby poskytly různé výhody, jako je žíhání, popouštění, prodloužení intervalů frézování elektrod a snížení spotřeby energie nebo k usnadnění svařování povlakovaných materiálů. [5] [8]

3.6 Svařovací režim

Měkký režim

Je využíváno malých proudů s delšími časy. Delší kontakt elektrody s materiálem způsobuje větší tepelné namáhané elektrody a je udávána menší životnost elektrod. Dochází k větší spotřebě energie, vyšším tepelným ztrátám a tím pádem má svařování menší účinnost. Proces je méně produktivní. Svarový spoj má vysokou svarovou čočku, která dosahuje takřka celé tloušťky svařovaných materiálů a hrozí výstřik materiálu. Průměr je naopak relativně malý. Dochází k tepelnému ovlivnění většího objemu materiálu. Vznikají větší deformace materiálu. Struktura je hrubší, ale je menší riziko zakalení. Mohou být ale použity stroje s menším výkonem a proces je méně ovlivněný vnějšími faktory jako je např. zamaštění apod. [1]

Tvrký režim

Vyznačuje se použitím vysokých hodnot proudů, vysokých tlaků s krátkým časem svařování. Tepelně ovlivněná oblast je menší. Svarová čočka vzniká nižší. Krátké svařovací časy vedou k rychlému chladnutí a jemnější struktuře svaru. Účinnost procesu je vyšší než u měkkého režimu. Je ale potřeba použití svařovacího zdroje s větším výkonem. V automobilovém průmyslu se v naprosté většině používají co nejkratší – nejtvrďší režimy. [1]

4. ELEKTRODY PRO BODOVÉ SVAŘOVÁNÍ

Elektrody používané při odporovém svařování musí být schopny bez výrazných tepelných ztrát přivádět elektrický proud do svařovaných dílů, tedy mít vysokou elektrickou vodivost. Je žádoucí, aby korektně odváděli teplo z dílů, tedy aby měli vysokou tepelnou vodivost. Musí mechanicky přidržet díly u sebe dostatečnou a konstantní silou. Je zapotřebí,

aby byly vysoce odolné proti oxidaci. A je nutné, aby vydrželi vysoké zatížení při zvýšených teplotách.

Některé z těchto vlastností kladou v důsledku značně protichůdné požadavky na materiál elektrod. Měď splňuje požadavek na vysokou elektrickou a tepelnou vodivost, ale bohužel nevykazuje svou pevností. Proto je nutné používat slitiny mědi a dalších složek. [13] [5]

Z hlediska automatizace procesu je na tvar a materiál kladen požadavek dobré obrobitelnosti.

4.1 Materiál elektrod

V závislosti na aplikaci se používá řada elektrodových materiálů na bázi mědi. ČSN EN ISO 5182 rozděluje elektrodové materiály do tří skupin:

- Skupina A – Měď a slitiny mědi.
Zahrnuje nejčastěji používané elektrodové materiály. Mají vysoký obsah mědi s malým množstvím přidaných legujících prvků, jako je zirkonium, kadmium, chrom a beryllium. Patří sem nejpoužívanější CuCr1Zr.
- Skupina B – Slinuté materiály
Skupina obsahuje materiály vyrobené práškovou metalurgií z mědi a žáruvzdorných kovů wolframu a molybdenu nebo případně stříbra. Příkladem jsou W75Cu nebo WC70Cu.
- Skupina C – Disperzně zpevněné slitiny mědi
V této skupině jsou elektrody disperzně zpevněné (obvykle oxidem hlinitým) např. CuAl2O3. [14]

V rámci každé skupiny jsou dále rozděleny podle typu a čísla.

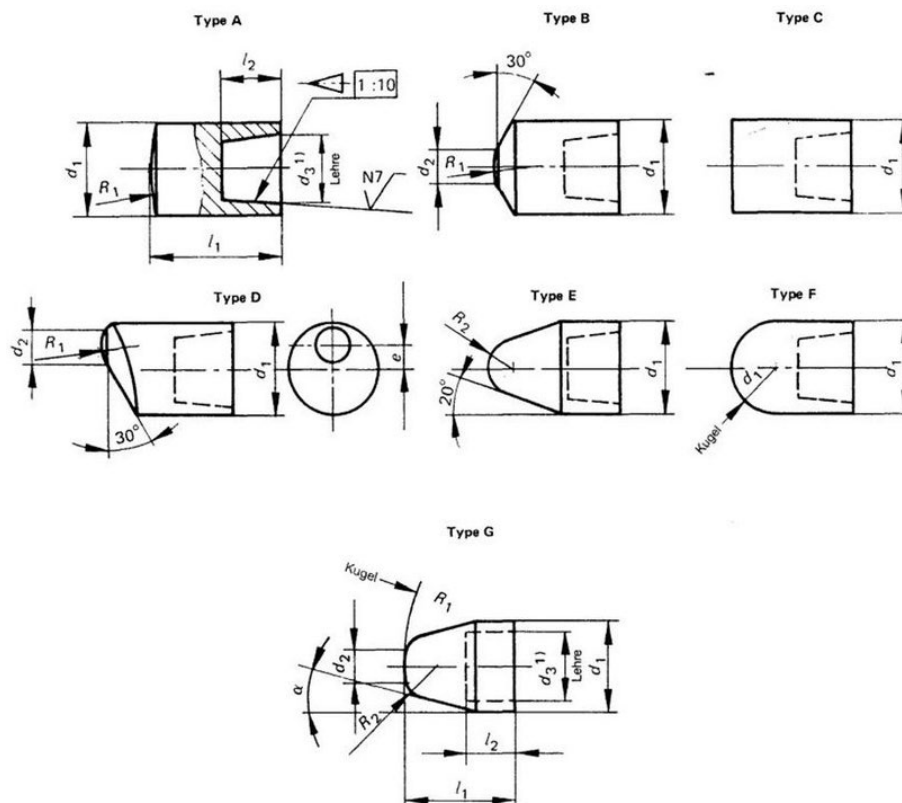
Např. značení pro CuCr1Zr je ČSN EN ISO 5182 – A 2/2

Norma uvádí pro každé číslo materiálu tvrdost HV, elektrickou vodivost a teplotu měknutí. Teplota měknutí je maximální teplota, která po dvou hodinách výdrže a následném zchladnutí na pokojovou teplotu způsobí snížení tvrdosti maximálně o 15 %

S rostoucím číslem v daném typu materiálu roste pevnost elektrody, ale klesá její elektrická vodivost. Obecně platí, že při svařování materiálů s vyšší pevností se volí elektrody také s vyšší pevností. Elektrody mohou být kované, lité, obráběné nebo za studena protlačované, nejčastěji se používají za studena protlačované.

4.2 Geometrie elektrod

Norma ČSN EN ISO 5821 dělí elektrody podle tvaru na typ A až G viz Obrázek 9.



Obrázek 9: Tvary svařovacích elektrod dle normy ČSN EN ISO 5821 [15]

Značení dle normy [15] je v následujícím formátu:

Čepička elektrody pro bodové svařování ISO 5821 – XX – d1 – l1 – R1 – d2 – α

Výrobci mnohdy užívají vlastní značení, časté je také značení dle podnikové normy.

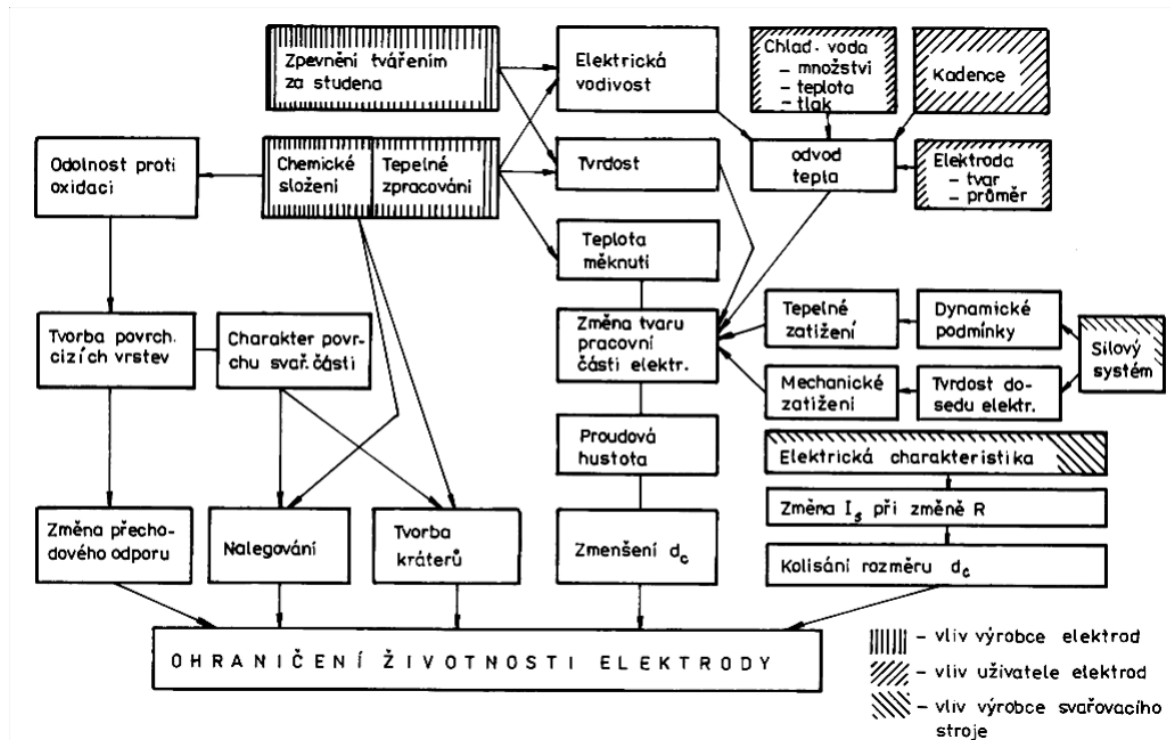
4.3 Životnost čepiček

Dle normy ČSN EN ISO 8166 je životnost elektrod definována jako počet svarů, které mohou být provedeny v požadované jakosti svaru před nezbytnou úpravou dotykové plochy elektrody.

Konce životnosti elektrody je dosaženo tehdy, pokud provedené svary mají průměr čochy určený při odlupovací zkoušce menší než $3,5\sqrt{t}$ (kde t je tloušťka plechu) u tří z pěti po sobě následujících svarech. Prstencové svary jsou nepřijatelné. Odlupovací zkouška musí být provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 10447 – Odporové svařování – Odlupovací a sekáčové zkoušení odporových bodových a výstupkových svarů.

V konstrukční specifikaci lze také předepsat alternativní kritéria pro určení konce životnosti elektrod. Norma uvádí příklady alternativních kritérií:

- snížení pevnosti ve stříhu (smyku), například o 30%
- kritérium z výsledku zkoušky krutem
- kritérium založené na vyhodnocování metalografických výbrusů
- požadavek dle jakosti povrchu – vtisky [10]



Obrázek 10: Diagram faktorů ovlivňujících životnost elektrod [4]

5. VADY SVAROVÝCH BODŮ

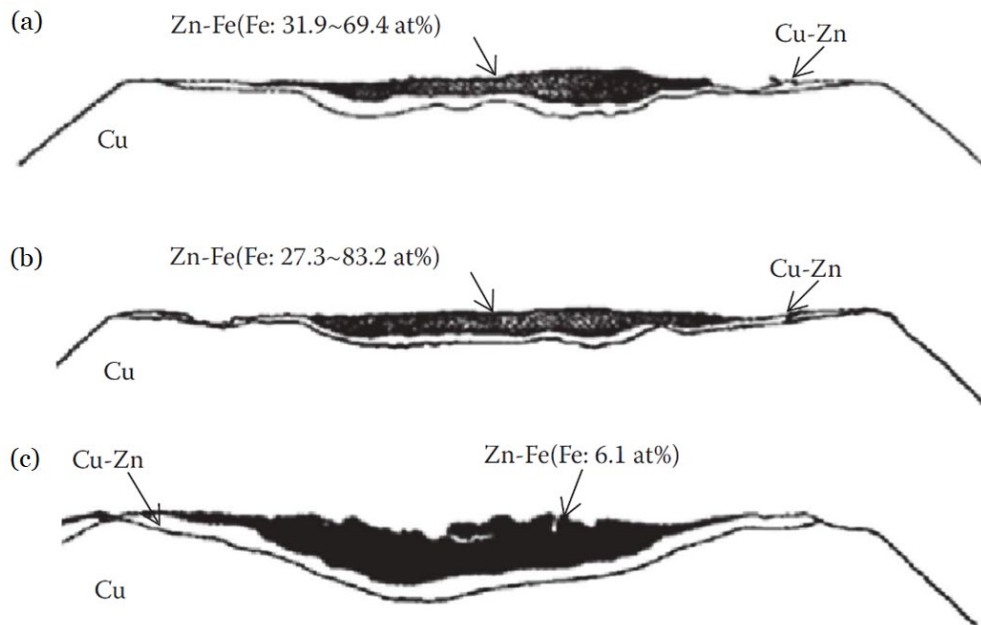
Norma ČSN EN ISO 6520-2 uvádí klasifikaci možných vad svarů provedených tlakem. Je zde uvedeno jednotné značení. Uvádí se pouze typ a tvar různých vad způsobených svařováním. Pro vyhodnocení nejsou uvedeny nevyhovující rozměry. Metalurgické odchylky se nezohledňují. Informace týkající se důsledků nedokonalostí a použití konkrétních spojů, jelikož ty závisí na konkrétních požadavcích na svarový spoj.

- P100 Trhliny:** Nespojitost vzniklá místním porušením, které může vzniknout vlivem ochlazování nebo pnutí. [16] Příčinou je špatná svařitelnost materiálu a jeho následné zakalení. Opatřením je využití měkkého svařovacího režimu. [6]

- **P200 Dutiny:** *Dutina vytvořená zachyceným plynem ve svaru nebo v tepelně ovlivněné zóně (TOO).* [16] Obvykle doprovázené rozstříkem materiálu mezi svařovanými plechy nebo pod elektrodou. Lze se jim vyhnout vhodně zvolenou elektrodovou silou a časem svařování. [6]
- **P 300 Pevné vměstky:** *Pevné cizorodé látky zachycené ve svaru.* [16]
- **P400 Studené spoje:** *Nedostatečné natavení ve spoji.* [16] Jsou důsledkem nedostatečného natavení materiálu, špatnými svařovacími parametry, opotřebením elektrod nebo při shuntování mezi svary. [6]
- **P500 Vady tvaru a rozměru:** *Odchylka od požadovaného tvaru spoje.* [16] Patří sem nízká nebo převýšená čoučka, nedostatečný průměr svaru, nesymetrický tvar, výstupky na povrchu nebo příliš hluboké vtisky elektrod, popřípadě ulpívající část elektrody.
- **P600 Různé vady:** *Všechny nedokonalosti, které nelze zahrnout do skupin 1 až 5.* [16] Spadá sem například rozstřík nebo náběhové zabarvení.

6. MECHANISMY DEGRADACE ELEKTROD

Interakce mezi Cu elektrodami a povlakem je komplikovaný proces, který ovlivňují metalurgické, mechanické a elektrické faktory. Když se elektrody ze slitin na bázi Cu používají ke svařování povlakovaných kovů, dochází k reakcím, které mohou významně ovlivnit proces svařování a životnost elektrod. Svařování dílů z nízkouhlíkové oceli bez povrchové úpravy je v praxi realizovatelné bez větších problémů s o řád delšími životnostmi elektrod než u svařování povlakovaných dílů. Při výrobě automobilů se na všech plechách využívají povrchové úpravy, které takřka ve všech případech obsahují nějakou formou zinku. Cu může se Zn vytvářet křehká nízkotavitelná intermetalika. Povrch takto legované elektrody má nižší elektrickou vodivost, a během svařování se nadměrně zvyšuje teplota na rozhraní elektroda-plech. Vyšší teplota urychluje některé metalurgické pochody, které jsou příčinou opotřebením. Tyto změny při svařování pozinkovaných ocelí mohou napomáhat přilepování elektrod k plechům. [11] [17] [18]



Obrázek 11: Řez čelních ploch elektrod – chemické složení po 1500 svarech.
 (a) GA-2 (Al: 0,78 hm. %.); (b) GA-6 (Al: 0,23 hm. %.); (c) HDG-6 (Al: 0,22 hm. %). [11]

K vzájemnému legování může docházet mezi elektrodami z Cu a řadou povlakových materiálů, jako jsou nejčastěji Ni, Sn, Al, Mg a zmíněný Zn. Legování materiálu elektrody prvky povlaku/substrátu je převládající příčinou zhoršené životnosti elektrody. [11] Na Obrázku 11 jsou zobrazeny příklady ilustrující legování mezi Cu elektrodami a ocelí galvanicky zinkovanou (GA) a žárově zinkovanou (HDG). [11]

Mezi postupy, které se obecně používají proti degradaci Cu elektrod patří následující:

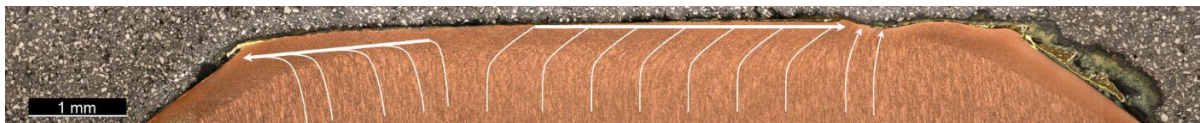
- Optimalizace svařovacích parametrů za účelem minimalizace generovaných teplot v elektrodách.
- Krokové zvyšování svařovacího proudu k dosažení neměnné proudové hustoty při predikovaně se zvyšující kontaktní ploše elektrod.
- Ofrézování čepičky pro obnovení čistého povrchu elektrody původního tvaru, když zvýšení svařovacího proudu již není dostatečné.
- Různé formy adaptivního řízení. [11] [2]

6.1 Deformace

Pokud na kontaktních plochách elektrody převládají teploty vyšší než rekrystalizační teplota, tj. přibližně 70 % teploty tání, základního materiálu elektrody, lze hovořit o deformaci (tváření) za tepla. Nastává rekrystalizace zrn a materiál se nezpevňuje. Při překročení této teploty se

již v materiálu během působení tlakové síly projevuje tečení. Tento mechanismus je aplikován jen v tenké vrstvě pod povrchem čela. Großmann [11] ve své práci udává, že tyto mechanismy lze sledovat v určité míře již od 40% teploty tání

V oblastech dále od čela elektrody se materiál deformuje při nižších teplotách, dochází ke zpevňování materiálu a zrna se deformují ve směru tváření. Vytváří se orientovaná textura, kterou lze vidět na Obrázku 12. v důsledku radiálního toku materiálu vyznačeného bílými šipkami. V AJ literatuře je tento mechanismus označován jako „mushrooming“.

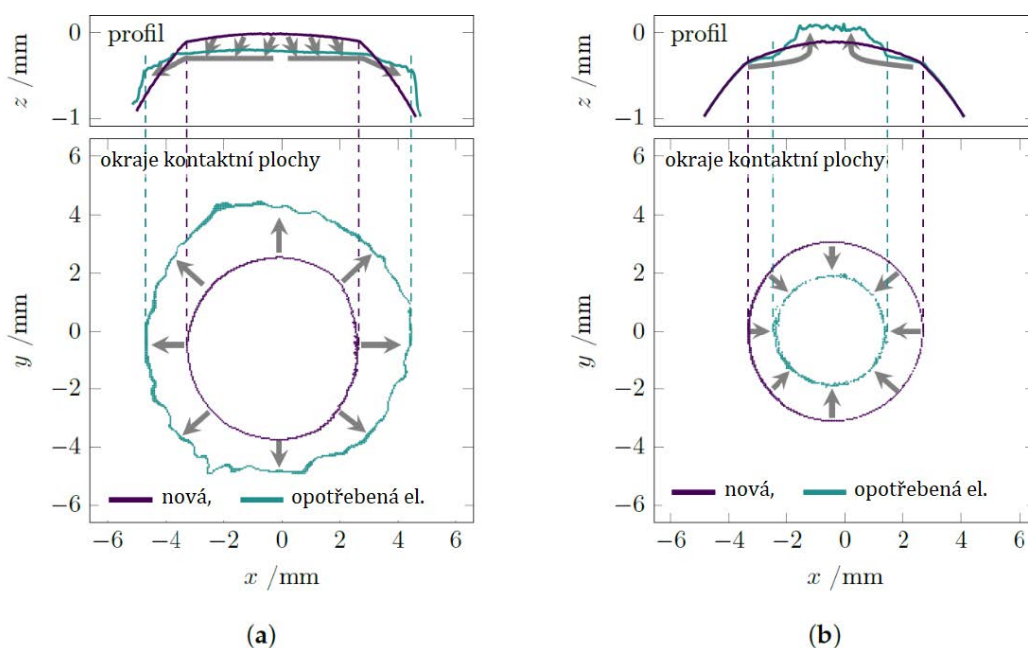


Obrázek 12: Metalografický výbrus elektrodové čepičky s viditelně orientovanou strukturou po 1200 bodových svarech. [19]

Literatura dále často popisuje mechanismus označovaný „trimming“ nebo také „plateau forming“, v češtině dosud nepřekládáno. Rozdíl mezi mushrooming a plateau forming je vidět na Obrázku 13.

Chang [20] potvrdil, že vystouplá plocha nevzniká vytvořením vrstvy slitiny, ale postupnou deformací elektrody během svařování. Ve středu kontaktní plochy elektrody převažují vyšší teploty, které lokálně snižují pevnost materiálu elektrody. Okolní materiál si pevnost zachovává. Vtlačováním elektrody do prostoru vtisku dochází k deformaci materiálu směrem k svarové čočce a k vytvoření vystouplé plochy.

Autoři Mathiszik a kol. v [19] uvádějí, že k mechanismu plateau forming dochází zejména u aplikací s pokročilými vysokopevnostními ocelmi (AHSS) jako je za tepla tvářená 22MnB5 s povlakem AlSi. Výskyt rozdílných mechanismů deformačního opotřebení mushrooming x plateau forming lze přičíst interakci nejméně dvou faktorů, pevnosti materiálu a velikosti změkčeného objemu plechů (tepelně ovlivněného). Změkčený materiál má nižší pevnost než pevnost elektrod. Vzájemné působení těchto dvou faktorů ovlivňuje způsob vtlačování elektrod do materiálu. Pokud plechy změkknou v ploše větší, než kontaktní plocha elektrod mohou elektrody proniknout do materiálu celou kontaktní plochou a dochází k mechanismu mushrooming. V případě, že plocha dostatečně změkčeného materiálu je menší než kontaktní plocha elektrod a nezměkčený materiál plechů má vyšší pevnost než pevnost elektrod, vzniká plateau forming.

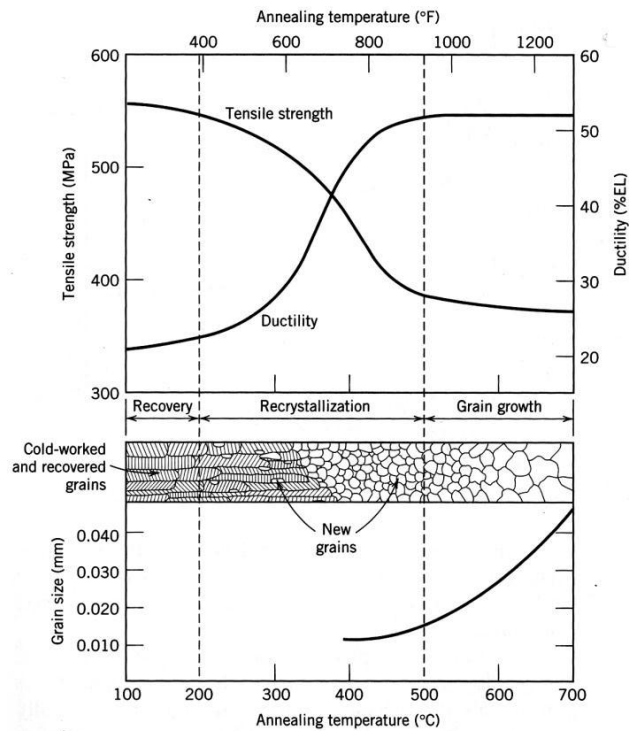


Obrázek 13: Typické způsoby deformačního opotřebení elektrody: (a) mushrooming v důsledku radiálního toku materiálu a (b) plateau forming v důsledku axiálního toku materiálu.

6.2 Odpevňování

Vzhledem k tomu, že naprostá většina elektrodových čepiček se vyrábí protlačováním za studena, nachází se v materiálu četné dislokace. Hustota dislokací je vysoká zejména na okraji čepiček. Od hustoty dislokací se odvíjí mimo jiné i tvrdost materiálu. Při vystavení zvýšené teplotě dochází k zotavení, rekrytalizaci a růstu zrn. Zotavení probíhá při nižší teplotě cca $0,25 \div 0,3 T_t$ [K], je charakterizováno zanikáním bodových poruch. Nejvyšším stadiem zotavení je polygonizace. Rychlost zotavení roste s teplotou exponenciálně. Při teplotě $0,35 \div 0,45 T_t$ [K] dochází k rekrytalizaci, tj. tvorbě nové mikrostruktury růstem nových zrn a pohybem velkoúhlových hranic zrn do míst s vyšší hustotou dislokací. Při zvyšující se teplotě dochází k hrubnutí zrna. Změnu mechanických vlastností lze pozorovat na Obrázku 14. Jakmile začnou zrna rekrytalizovat, pevnost v tahu výrazně klesá a tažnost se zvyšuje. Teplota tání mědi je 1085°C . Avšak elektrody z čisté mědi jsou málokdy používány. Teploty dosahované na rozhraní elektroda-plech se pohybují do 500°C . [11] [19] [3]

Mathisik a kol. [19] uvádí při těchto teplotách pokles Youngova modulu E okolo 20 % a pevnost v tlaku klesá přibližně o 30 % pro nepoužívanější materiál elektrod CuCr1Zr .

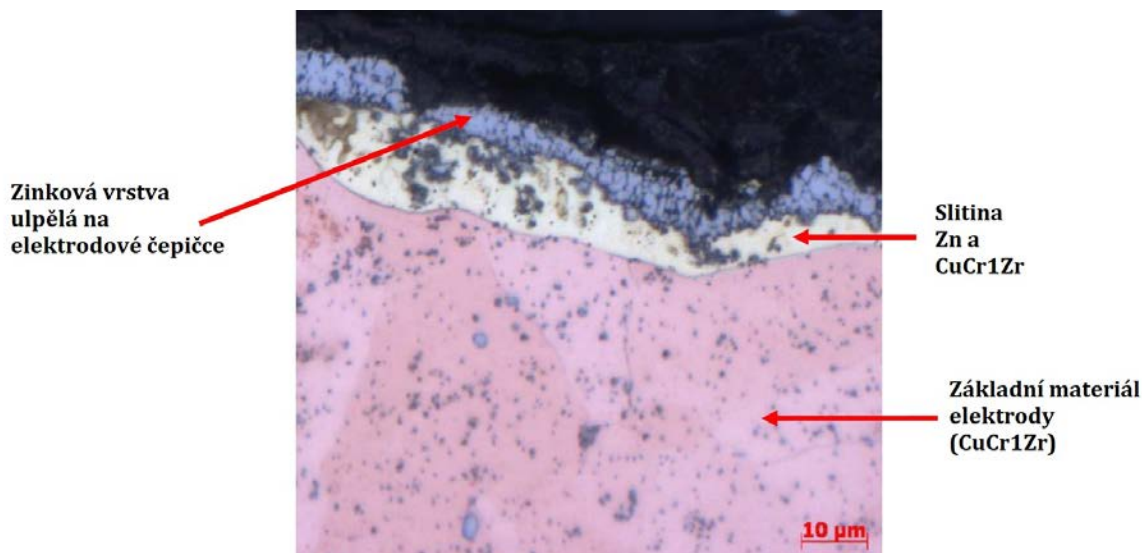


Obrázek 14: Vliv teploty žihání na pevnost v tahu a tažnost mosazné slitiny (ilustrativní příklad). [3]

6.3 Difuze

V přírodě mají všechny atomy tendenci vyrovnávat rozdíly v koncentraci, hybnou silou difuze je gradient koncentrace ∇c . Základ fenomenologické teorii difuze, která se zabývá pozorovatelným makroskopickým výsledkem bez zvažování jednotlivých nahodilých přeskoků atomů, tvoří Fickovy zákony. Potřebný pohyb částic je popsán hustotou difúzního toku J_{dif} definovanou jako počet atomů, který projde jednotkovým průřezem kolmým na směr difuze za jednotku času. Přeskokový pohyb atomů se uskutečňuje mechanismem vakance, kruhovým, intersticiálním nebo výměnou atomů. Při nízkých teplotách se difuze projevuje hlavně na hranicích zrn a při vysokých teplotách probíhá ve stejné míře i v objemu. [3]

Při svařování pozinkovaných plechů je rozhraní tvořeno oblastí s vysokou koncentrací Cu a oblastí s intermetalickými vrstvami Zn-Fe. Dle konkrétní povrchové úpravy to mohou být i další prvky. Pod ulpělými (navářenými) vrstvami zinku dochází ke tvorbě vrstev substitučního tuhého roztoku zinku a mědi, tj. mosaz. Tento jev je ilustrován na Obrázku 11 a reálný snímek je popsán na Obrázku 15. Se změnou chemické struktury se mění i elektrické, tepelné a mechanické vlastnosti na kontaktním povrchu elektrody. Ve většině případů se v legovaných oblastech snižuje elektrická a tepelná vodivost, přičemž se zvyšuje generované teplo a s ním se zvyšuje difúzní rychlost.



Obrázek 15: Strukturální fáze na povrchu opotřebovaných čepiček z materiálu CuCr1Zr po svařování žárově pozinkovaných plechů materiálu HX180BD. [21]

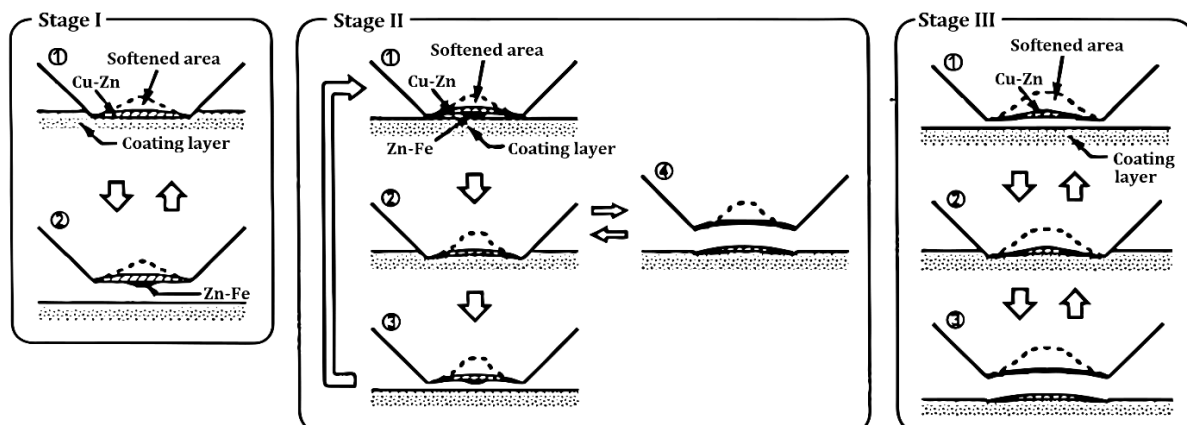
Hu a kol. [17] dospěli k výsledku, že životnost elektrody při svařování elektrolyticky pozinkovaných plechů s povlakem obsahujícím 11,4 hm. % Fe byla o 110 % vyšší než u povlaků obsahujících 7,0 hm. % Fe, respektive tloušťka povlaků byla 9.2 a 8.5 mm. Autoři uvádí předpoklad, že toto zlepšení je způsobeno vytvořením vrstvy slitiny bohaté na Fe na povrchu elektrody, která by mohla zabraňovat vytrhávání mědi z povrchu elektrody. Vyšší obsah Fe v povlaku navíc vedl ke zvýšení kontaktního odporu.

Tabulka 2: Charakteristiky různých fází Fe-Zn [17]

Fáze	Vzorec	Krystalová mřížka	Obsah Fe [hm. %]	Teplota tání Tt [°C]	HV (25 mg)
η	Zn	Hexagonální	~0	419	52
ξ	FeZn ₁₃	Monoklinická	5.2~6.1	530	208
δ	FeZn ₁₀ ~FeZn ₇	Hexagonální	7.0~11.5	672	358
Γ1	FeZn ₂₁ ~Fe ₁₁ Zn ₄₀	FCC	17.0~22.0	přeměna na Γ + δ při 550 °C	505
Γ	Fe ₃ Zn ₁₀ ~FeZn ₃	BCC	24.0~31.0	782	326
α-Fe	Fe	BCC	~100	1538	104

6.4 Vytrhávání materiálu z elektrody

Úbytek materiálu je způsoben opakovaným lokálním natavováním a vylamování křehké vrstvy slitiny, někdy je označováno jako období pittingu. Großmann [11] ve své práci uvádí, že při svařování pozinkovaných ocelí vykazovaly elektrody z materiálu CuCr1Zr a CuZr na povrchu difuzní vrstvu, jejichž tloušťka se po 100 bodových svarech dále již nezvyšovala. Tento jev byl přisouzen vyrovnání účinků mechanismů ulpívání a úbytku materiálu.



Obrázek 16: Model mechanismu opotřebení elektrody při odporovém bodovém svařování Zn-Ni elektrolyticky pozinkovaného ocelového plechu. [18]

Matsuda a kol. [18] ukazuje na Obrázku 16 model procesu opotřebení elektrod při bodovém svařování s konstantně nastavenými parametry. Při svařování elektrolyticky pozinkovaných ocelových plechů dochází během svařování k difuzi Zn do Cu elektrody, která na povrchu elektrody vytváří vrstvy Cu-Zn různých fází. Teplota čela elektrody se nezvýší nad teplotu tání vrstvy Cu-Zn a ta na povrchu zůstává. Intermetalická vrstva Zn-Fe rovněž ulpívá na středě čela elektrody (opakování fáze I, 1-2). S rostoucím počtem svarů se střed čela elektrody deformuje do prohlubně a tlak působící na střed se udržuje díky přítomnosti ulpívající Zn-Fe. Toto způsobuje, že se proud na začátku svařování soustředí do středu a svary se ještě stabilně vytvářejí v ose elektrody (opakování fáze II, 1-3). Deformace do prohlubně je zřejmě způsobena účinkem legování, koncentrací působícího tlaku a zvýšeným odpeňováním ve středu. U svařování pozinkovaného ocelového plechu dochází v pozdějších fázích životnosti elektrody k tvorbě vysoce tvrdé a křehké fáze γ Cu-Zn, která je náchylná k tvorbě trhlin, které napomáhají k odtrhávání celých vrstev (fáze II, 2-4). Maximální teplota dosažená na čele elektrody klesá pod bod tání Zn-Fe. Což je způsobeno klesající hustotou proudu, respektive zvětšením plochy čela elektrody. S postupujícím svařováním již nedochází k ulpívání Zn-Fe vrstev a klesá tlak ve středu elektrody (opakování fáze III, 1-2). Stejně jako ve fázi II dochází

stále k opotřebení elektrody odtrháváním vrstvy γ Cu-Zn (fáze III, 2+3). Deformace středu do prohlubně se dále rozvíjí více do stran. V tomto okamžiku již dochází k soustředění působícího tlaku v okrajích elektrody a nastává nekonzistentní tvorba svarů. Následně je dosaženo životnosti elektrody.

Z tohoto popisu je vidět zásadní moment – konec ulpívání Fe-Zn z důvodu poklesu teploty a tvorba křehké fáze γ Cu-Zn. Tento mechanismus je popsán pro povrchovou úpravu elektrolytického zinku při konstantních svařovacích parametrech. Pro žárový zinek by tento proces byl mírně odlišný. Při některém z typů řízení by byl tento proces také jiný, z důvodu jiných tepelných podmínek. Pro pochopení degradace elektrod vytrháváním materiálu je kromě měření geometrických veličin možné provést analýzu vrstev vytvářených v průběhu životnosti elektrod doplněnou o informace o jejich teplotách tavení. K získání této komplexní analýzy by bylo nutné přistoupit k destruktivním technikám.

7. PŘEHLED DESTRUKTIVNÍCH ZKOUŠEK

Destruktivními zkouškami jsme schopni získat rozměry svarové čochky a mechanické vlastnosti svarů, resp. údaje pro pevnostní výpočty svařovaných konstrukcí. Podle působící síly se rozdělují na statické a dynamické. Mechanické zkoušky statické udávají chování materiálu při pozvolna narůstající síle. Dynamické zkoušky rozlišujeme rázové a únavové. Pro dynamické zkoušky se rychlost deformace $\dot{\epsilon}$ často volí i přes 1000 s^{-1} , což jsou podmínky úměrné nárazu vozidla při 60-80 km/h. Toto vede k výrazné změně deformačního chování a absorpce energie.

[22]

Normalizované destruktivní zkoušky jsou následující:

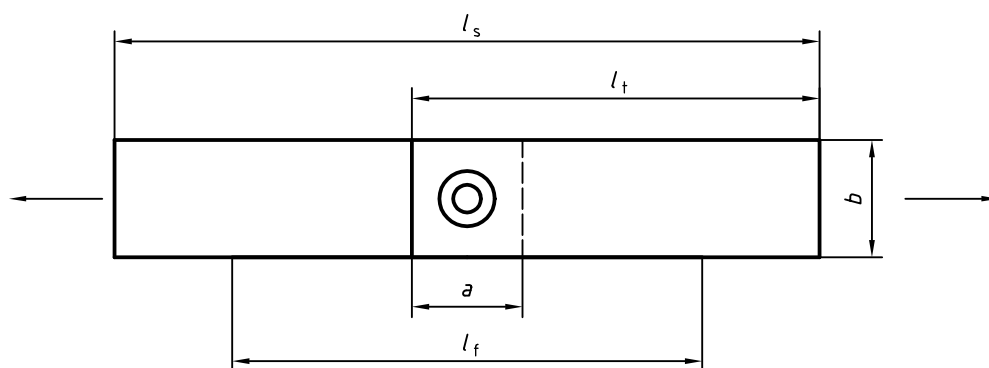
- Odlupovací zkouška dle ČSN EN ISO 10447
- Sekáčová zkouška dle ČSN EN ISO 10447
- Mechanizované odlupovací zkoušení dle ČSN EN ISO 14270
- Křížové zkoušení tahem dle ČSN EN ISO 14272
- Zkouška krutem dle ČSN EN ISO 17653
- Střihová zkouška dle ČSN EN ISO 14273
- Rázová zkouška střihem dle ČSN EN ISO 14323
- Metalografická zkouška dle ČSN EN 1321 nahrazena ČSN EN ISO 17639
- Zkouška tvrdosti podle Vickerse dle ČSN EN ISO 14271

- Únavové zkoušení vícenásobně bodově svař. vzorků dle ČSN EN ISO 18592

V této práci je užito stříhové zkoušky a na části vzorků by proveden metalografický výbrus. Tyto zkoušky jsou podrobněji rozebrány níže.

7.1 Zkouška stříhem

Zkouška stříhem dle ČSN EN ISO 14273 *Odporové svařování – Destruktivní zkoušky svarů – Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů* specifikuje rozměry vzorků a zkušební postup pro smykové zkoušky bodových svarů kovového materiálu o tloušťce 0,5 mm až 10 mm, kde svary mají maximální průměr $7\sqrt{t}$ (kde t je tloušťka plechu). Cílem zkoušky ve smyku je stanovit smykovou sílu, kterou zkušební vzorek vydrží do porušení.



Obrázek 17: Vzorek pro zkoušku stříhem [23]

Pro tloušťky plechů užívané v této práci platí rozměry v Tabulce 3.

Tabulka 3: Rozměry vzorku pro zkoušku stříhem užitý v experimentu [23]

Tloušťka	Překlátování	Šířka vzorku	Délka vzorku	Volná délka mezi čelistmi	Délka zkušeb. ústřížků
t [mm]	a [mm]	b [mm]	l_s [mm]	l_f [mm]	l_t [mm]
$0,5 \leq t \leq 1,5$	35	45 (30)	175	95	10

Hodnoty šířky uvedené v závorce dávají přibližně o 10 % nižší pevnosti. Poloha svaru na vzorku by se měla pohybovat v rozmezí ± 1 mm ve všech směrech. Pro vyhodnocení je nutné zhotovit minimálně 11 vzorků

Vzorek je upnut do čelistí univerzálního trhacího stroje, který splňuje požadavky ISO 7500-1. Pro plechy tloušťky < 3 mm nebo pro plechy rozdílných tlouštěk, jejichž poměr je $> 1,4$ je nutné použít v čelistech podložný plech stejné tloušťky jako vzorek.

Diagramy $F = f(\Delta l)$ zatížení – prodloužení jsou zaznamenány a je určena maximální síla. V současnosti platném vydání normy ČSN EN ISO 14273 z 10/2016 již není popsán způsob porušení vzorků, ten je třeba vyhodnotit dle ČSN EN ISO 14329. Norma rozlišuje symetrické, nesymetrické a částečné vytržení svarové čočky. Porušení může nastat vytržením celé čočky, v dělicí rovině, jako částečné porušení tloušťky nebo porušením v základním materiálu. [23]

8. MONITOROVÁNÍ OPOTŘEBENÍ ELEKTRODOVÝCH ČEPIČEK

V kapitole 4.3 je popsáno hodnocení životnosti svařovacích čepiček dle normy ČSN EN ISO 8166. Z tohoto pohledu je opotřebení hodnoceno nepřímou – nevyhovující svarový spoj znamená nevyhovující opotřebení. Pro porozumění účinkům degradačních dějů na elektrodách je třeba mít hodnocení opotřebení kvantifikované.

Pro potřeby této diplomové práce bylo definováno kvantifikované opotřebení elektrody jako *„Souhrn účinků degradačních dějů působících na elektrodu mající za důsledek měřitelné změny deformační (topografické), metalurgické, chemické a elektrické.“*

Určitá forma sledování a kvantifikace opotřebení je vhodná v aplikacích, kdy chceme životnost čepiček využít do maximálních mezí z ekonomických důvodů.

Určení tohoto momentu, kdy je nutné již ořezovat čepičku dle kvantifikovaného opotřebení může své uplatnění najít také při svařování, kdy se jedny svařovací kleště (potažmo jeden pár čepiček) používají ke svařování odlišných materiálů v různých pořadích. V takovém případě nejsme schopni rozumně predikovat životnost elektrodových čepiček, popřípadě bychom byli nuceni výrazně poddimenzovat životnost kvůli bezpečnosti.

Při měření ve výrobním procesu obecně rozlišujeme čtyři přístupy/způsoby získávání dat:

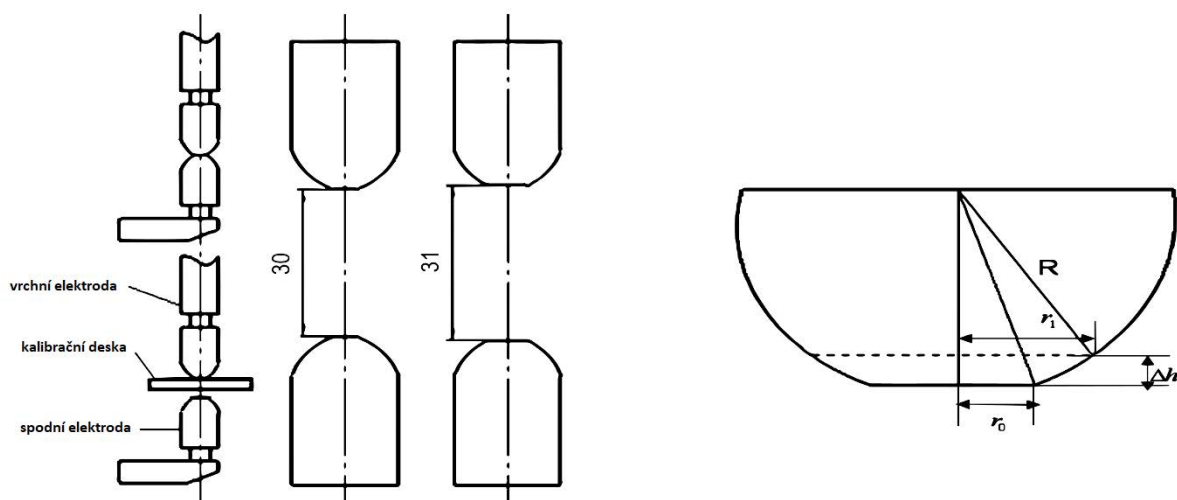
- **Inline měření** zahrnuje umístění měřícího nebo vzorkovacího zařízení přímo do linky nebo toku produktu, který není přerušen. Podobný význam má označení *in situ*. Na základě kontinuálně získávaných dat se velmi často provádí automatizovaná rozhodnutí.
- **Online měření** také obvykle probíhá kontinuálně. Zde se však měření nerealizuje přímo v procesu nebo nepřerušeném toku produktu, ale ve větvi odbočující z hlavního toku.

- Při **měření atline** se analýza stále provádí v procesu nebo v jeho blízkosti. Tato analýza se však provádí mimo linku poté, co byl odebrán vzorek pro testování.
- Pokud výrobní linka nemá kapacitu pro potřebná měření, musí být vzorek doručen do externí laboratoře, kde je provedeno **offline měření**.

8.1 Stav techniky

Dostupné články v problematice monitorování kvality spojů se přímému sledování kvantifikovaného opotřebení elektrodové čepičky věnují v menším množství. Publikované články se vesměs soustřeďují na hodnocení kvality svarových spojů ve čtyřech oblastech zkoušení: magnetickým polem, termografické zkoušení, ultrazvukové zkoušení a sledování parametrů procesu.

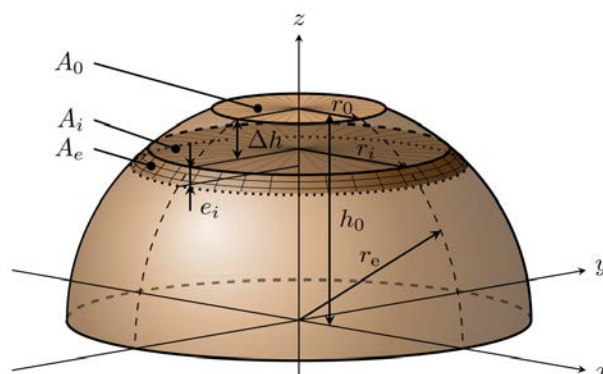
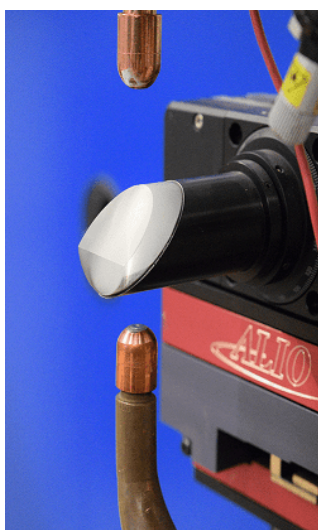
Zhang a kol. [24] udává, že radiální opotřebení elektrody je hlavním faktorem, který vede k nevyhovující velikosti svarových čoček. Tento článek studoval možnosti využití svařovacích kleští pro měření axiálního opotřebení elektrody.



Obrázek 18: Postup měření axiálního opotřebení pomocí servo kleští. (vlevo) Změna kontaktního průměru elektrody z důvodu axiálního opotřebení. (vpravo) [24]

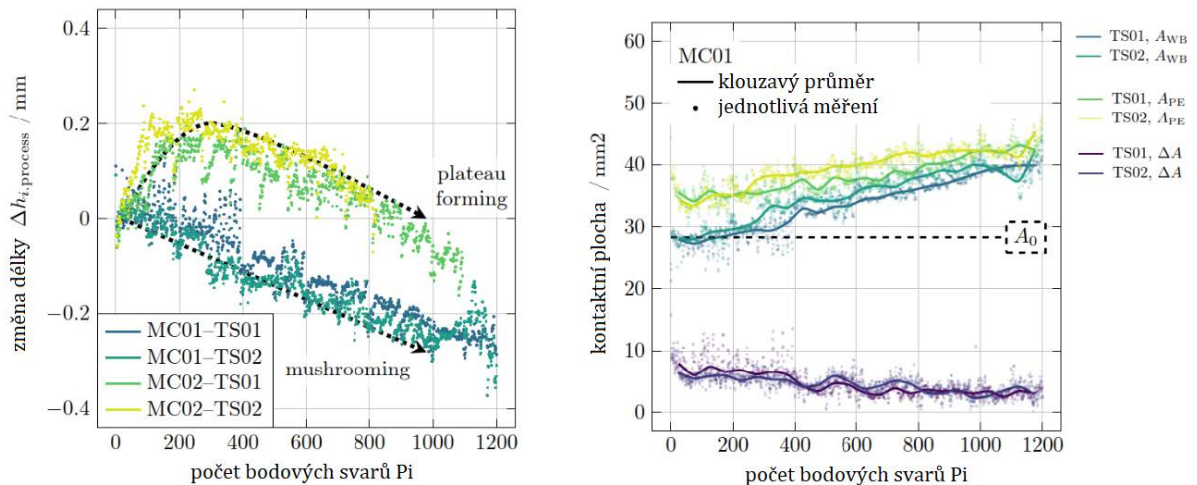
Autoři vytvořili matematický model pro dopočítání radiálního opotřebení pomocí detekce axiálního opotřebení. Byly použity kalibrované servo kleště tvaru C, které jsou schopny nastavovat a měřit vzájemnou polohu čepiček s nejistotou 10 μm . Výsledky měření axiálního úbytku byly ověřeny zařízením využívající laser s nejistotou 0,2 μm a výsledná hodnota průměru kontaktní plochy kamerovým systémem s nejistotou 10 μm . Bylo provedeno od 1200 do 9000 svarů pro 4 různé materiály a maximální chyba výsledku z matematického modelu byla 92 μm v laboratorních podmínkách.

Mathiszik a kol. [19] prováděli v laboratorních podmínkách analýzu opotřebení elektrod pomocí topografických měření. Ukazují na nich hlavní mechanismy opotřebení pro odporové bodové svařování, mushrooming a plateau forming. Pokusy byly provedeny na materiálu HX340LAD + Z100 a 22MnB5 + AS150, na Obrázku 20 označeny MC01, respektive MC02. Zaznamenávají změnu délky elektrody v závislosti na počtu bodových svarů. 3D měření topografie elektrod bylo provedeno pomocí konfokálního mikroskopu viditelného na Obrázku 19 vlevo. Dále byl zaznamenáván pohyb horní a spodní elektrody pomocí laserových triangulačních snímačů připevněných ke svařovacím kleštím pro získání údajů o hloubce vtisku elektrod. Hloubka vtisku e_i byla použita k odhadu kontaktních ploch mezi elektrodou a plechem po dosednutí elektrod, po vypnutí svařovacího proudu a po ztuhnutí svarové čočky.



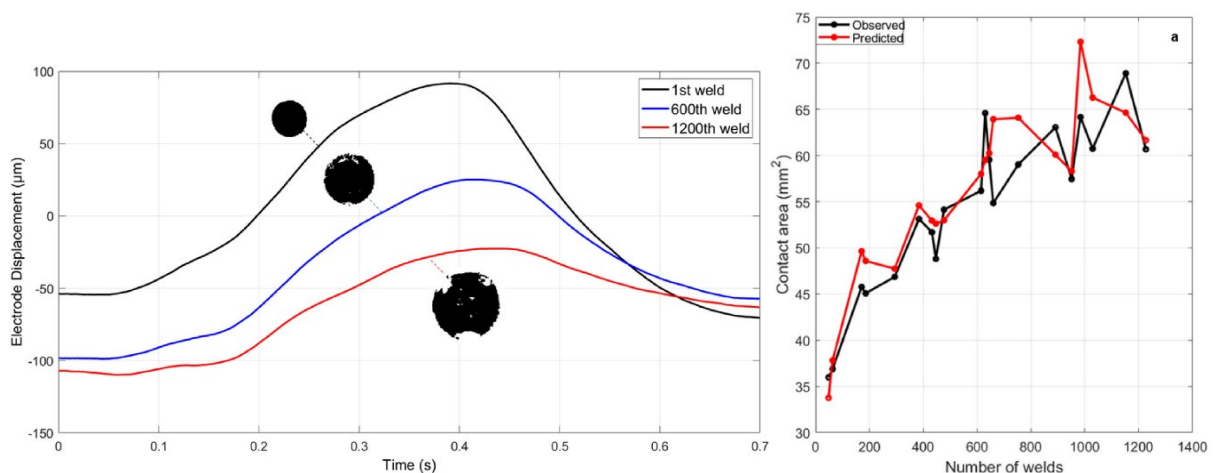
Obrázek 19: Inline měření topologie konfokálním mikroskopem. (vlevo)
Geometrické parametry opotřebení elektrodové čepičky. (vpravo) [19]

V experimentu se na povrchu elektrod tvořili krátery v důsledku vytrhávání materiálu až po 800, respektive 1200 svarech. Kontaktní plocha byla počítána čistě jako plochu kruhu. Autoři uvádějí jako nebezpečnější mechanismus plateau forming z důvodu většího rozptylu hodnot a horší predikovatelnosti. Na Obrázku 20 (vlevo) je vidět rozdílné chování dvou různých materiálů v důsledku dvou různých způsobů deformačního opotřebení, které se projevuje změnou délky elektrody. Na Obrázku 20 (vpravo) je vyobrazeno zvětšování kontaktní plochy elektrod v důsledku mechanismu mushrooming pro materiál MC01.



Obrázek 20: Změny délky elektrody dvou různých materiálů (vlevo). Zvětšování kontaktní plochy elektrod v důsledku mechanismu mushrooming (vpravo) pro test set (TS) 01 a 02. [19]

Panza a kol. navrhuje v článku [25] přístup k nepřímému sledování degradace elektrody během svařování pomocí analýzy signálu posunu elektrody z bezkontaktního snímače zabudovaného do svařovacího stroje a z tvaru kontaktní plochy čepičky získaného z uhlíkových otisků. Při vytváření uhlíkových otisků byl použit kovový plech obalený dvěma vrstvami papíru. Vnější vrstva byla vyrobena z černého uhlíkového pauzovacího papíru, zatímco druhá vrstva byla z čistého papíru. Celý svařovací cyklus byl proveden bez průchodu elektrického proudu. K určení geometrických veličin z naskenovaných snímků otisků byl použit MATLAB Image Processing Toolbox. Průběhy posunu elektrod během svařovacího procesu byly získány z magnetostrikčních lineární snímačů polohy Temposonics R-series. Na základě pevnosti bodových svarů byla kontaktní plocha elektrody označena jako nejreprezentativnější veličina charakterizující degradaci elektrody.



Obrázek 21: Různé křivky posunu elektrod s přidruženými otisky elektrod. (vlevo) Porovnání výsledků neuronové sítě pro predikci kontaktní plochy elektrody. (vpravo) [25]

Z experimentů na více než 1 200 svarových bodech materiálu DP590 na MFDC odporovém svařovacím lisu o výkonu 650kVA s řídicí jednotkou Tecna TE700 byla sestavena neuronová síť, která využívá některé ze signálů posunutí elektrody k predikci kontaktní plochy. Jako vstupy neuronové sítě byl použit maximální posun, střední hodnota posunu, směrodatná odchylka, euklidovská vzdálenost, směrnice křivky, koeficient a šikmosti. Model prokázal směrodatnou odchylkou přibližně 3,73 mm².

Ultrazvukové zkoušení bodových svarů se v automobilovém průmyslu používá již řadu let. UTZ představuje zdaleka nejpoužívanější metodou nedestruktivního zkoušení svarových spojů ve výrobě, a to atline nebo offline. Přestože jsou svary v těchto továrnách prováděny roboty, jejich kontrola se stále provádí ručně a u omezeného počtu svarů. Pokud je zjištěn vadný svar, obvykle to znamená vyřazení nebo opravy na větším množství již svařeného materiálu.

Firma VOGT Ultrasonics GmbH vyvinula systém SPOTline, který poskytuje inline kontrolu během svařovacího procesu. Ultrazvukové sondy umístěné přímo do svařovacích kleští vytvářejí ultrazvukové impulsy potřebné pro testování, které procházejí svarem během svařování. Sondy jsou umístěny na obou stranách svařovacích kleští. Měníče vytvářejí podélnou vlnu, která se přenáší přímo přes čepičku elektrody do bodového svaru, který má být zkoušen.

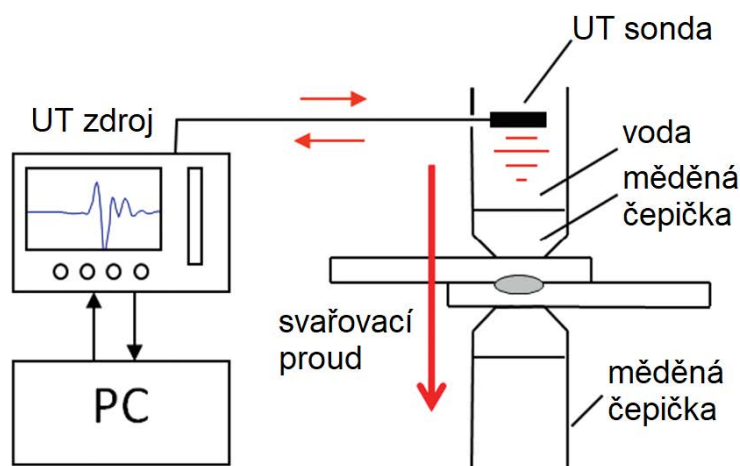


Obrázek 22: Vogt SPOTline – ultrazvukové sondy integrované do svařovacích kleští. [26]

Vazební médium mezi sondou a čepičkou tvoří samotná chladicí voda. Sběr dat začíná s koncem doby stlačení a pokračuje po celou dobu svařování. Během této doby pracují snímače v průchozím režimu a volitelně v režimu pulz-echo s frekvencí pulzů 500 Hz každý – každé 2 ms jedno měření. Údaje o amplitudě a době šíření TOF, které jsou výsledkem průchozího

režimu, se průběžně zaznamenávají a následně analyzují. Volitelně se zaznamenávají data pulz-echo několikrát během svařování a používají se pouze pro teplotní kompenzaci a kontrolu snímače. [26]

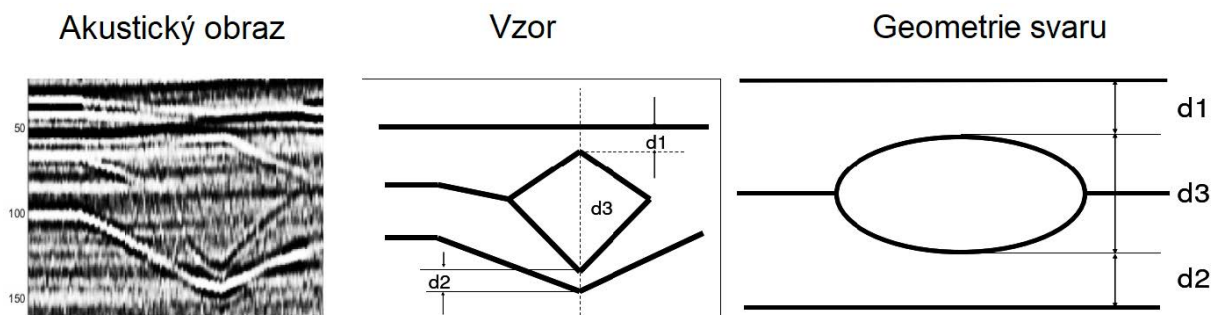
RIWA (Real-Time Integrated Weld Analyzer) je ultrazvukový NDT systém, který poskytuje řešení pro hodnocení odporových bodových svarů v reálném čase. Zařízení se skládá z jedné ultrazvukové sondy, který je umístěna do svařovací elektrody. Sonda generuje ultrazvukové vlny, které procházejí elektrodami do svařovaných plechů. Tyto vlny se odrážejí zpět a jsou přijímány stejnou sondou.



Obrázek 23: Schématické uspořádání systému RIWA. [27]

Sledování kvality bodových svarů může být založeno na měření různých parametrů ultrazvukových vln, ale nejčastěji se používá doba šíření vlny (TOF). Na TOF má vliv mnoho faktorů, zejména:

- teplota materiálu snižuje rychlost zvuku a tím prodlužuje TOF,
- vtisky přibližují elektrody k sobě a zkracují TOF,
- tepelná roztažnost při absenci vtisku vzdaluje elektrody od sebe a prodlužuje TOF.



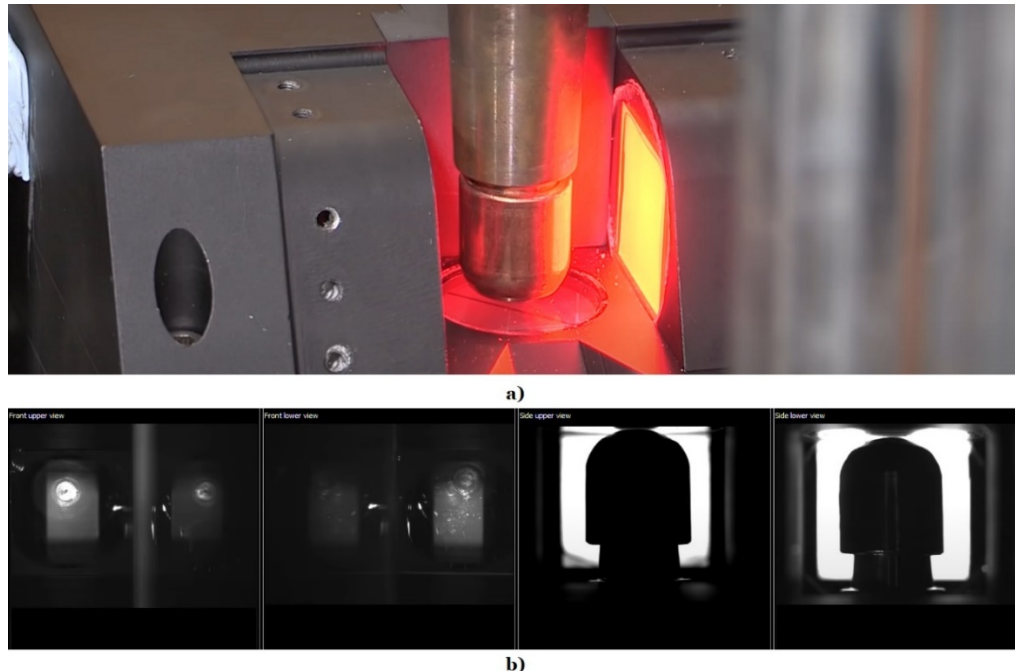
Obrázek 24: Ultrazvukový M-scan během odporového bodového svařování a srovnání s ideální geometrií bodového svaru [27]

System je schopen kromě geometrie svarové čočky určovat hloubku vtisku, zachytit výstřiky a další parametry. Z těchto parametrů pak systém určuje a zaznamenává vyhovující a nevyhovující svarové body. Systém byl vyvinut na University of Windsor Canada a reálné aplikace zajišťuje Tessonics Inc [27].

Dalším průmyslovým řešením je SmartDress, frézka čepiček elektrod s adaptivním řídicím systémem, který je schopen sledovat stav elektrod a vyhodnocovat nutnost ofrézování případně výměnu. Stroj se skládá z pěti částí:

- optický senzor pro monitorování stavu elektrody,
- mechanická frézka s nožem vhodného tvaru,
- nástroj k obroušení čepiček,
- držák pro výměnu čepiček,
- počítačový řídicí systém schopný zpracovávat údaje z optického senzoru.

Řídicí systém vyhodnocuje z optického senzoru parametry průměr kontaktní plochy elektrody, délka elektrody, stav povrchu elektrody. Určuje z nich danou nutnou operaci: abrazivní obroušení, mechanické ofrézování nebo výměna čepičky. [28]



Obrázek 25: Optický senzor pro měření některých parametrů opotřebení elektrodových čepiček SmartDress [28]

9. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

9.1 Cíle experimentální části práce

Cílem experimentální části je návrh způsobu monitorování a kvantifikace opotřebení elektrod. Jak bylo definováno v kapitole 8, opotřebení chápeme pro potřeby této diplomové práce jako souhrn účinků více degradačních dějů. Tato práce se v experimentální části zabývá monitorováním pouze deformačních – topologických změn a klade si za cíl přinést možné způsoby jejich kvantifikace.

Cílem práce není porovnávat materiály a povrchové úpravy mezi sebou. Různé materiály a povrchové úpravy byly vybrány s úmyslem, aby bylo možné sledovat různé průběhy degradačních mechanismů popsaných v kapitole 6. Proto jsou použity plechy hlubokotažné i vysokopevné, vrstva zinku žárového i elektrolytického a další povrchové úpravy zajišťující technologické vlastnosti. Pro každý materiál bylo předem opotřebováno deset čepiček s různým opotřebením, tedy s různým počtem již provedených svarů.

Pro sledování vývoje vybraných parametrů topografie s opotřebením bylo nutné v co největší míře potlačit ostatní proměnné vstupující do procesu potlačit.

Vybrané parametry sledované změny topografie elektrod je vhodné uvést do souvislosti s kvalitou svarových bodů. Opotřebenými elektrodami byly svařeny sady vzorků a na nich provedeny analýzy zkouškou stříhem dle ČSN EN ISO 14273. Průměry čepiček po zkoušce stříhem byly změřeny ručně a na části vzorků byly průměry měřeny pomocí phased array UTZ. Na vzorcích, které byly měřeny UTZ byl také vyhotoven metalografický výbrus.

Motivací tohoto experimentu je popis a kvantifikace důsledků degradačních mechanismů, které mají přímý vliv na kvalitu svarového spoje. Popisem opotřebení konkrétními kvantifikovanými parametry bude možné i určit a porovnávat vliv různých materiálů nebo povlaků. Vybrané parametry by mohli sloužit pro monitorování stavu elektrody a v důsledku přinést maximální využití jejich životnosti.

9.2 Návrh a podmínky experimentu

Řada opotřebení je zvolena 1 až 300 svarových bodů, což by měl být rozsah, na jehož konci dochází z praktických zkušeností k dosažení životnosti u povlakovaných plechů. Při výrobě karoserií automobilů se s ohledem na bezpečnost ukončuje životnost prakticky v polovině této řady a následuje ofrézování.

Řada (počet provedených svarů) je stanovena následovně:

1 – 10 – 25 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 250 – 300

Pro sledování změn topografie jsou zvoleny čtyři parametry. Pro každý materiál a pro každou hodnotu z řady opotřebení jsou vyhodnoceny tyto parametry pro čepičku před svařováním a po definovaném počtu svarů z řady. V kapitole 10 jsou pak závislosti zaneseny do grafů – *vývoj parametrů topografie s postupujícím opotřebením*. Způsob měření těchto parametrů je rozveden v kapitole 9.4 Zpracování dat.

Sledované parametry:

Δl - axiální změna délky elektrody

Δs - změna kontaktní plochy elektrody

Δv_+ - přírůstek objemu materiálu

Δv_- - úbytek objemu materiálu

Axiální změna délky elektrody Δl popisuje deformaci elektrody, v některých publikacích [19] [24] [28] se používá samostatně k monitorování opotřebení z důvodu méně náročného získávání dat. Další autoři se snaží dát do závislosti změnu axiální délky elektrody a změnu kontaktní plochy.

Změna kontaktní plochy elektrody Δs také popisuje deformační mechanismus a především ovlivňuje proudovou hustotu, která má zásadní vliv na tvorbu svarové čocky.

Přírůstek Δv_+ a úbytek Δv_- objemu materiálu popisují kombinaci mechanismu vytrhávání, ulpívání/přilepování a deformaci – přemísťování materiálu.

9.2.1 Použité materiály a vzorky

Pro experimenty bylo použito šest různých kombinací materiálu a povrchové úpravy používané při výrobě automobilů. Z důvodů zachování compliance nemohou být názvy některých povrchových úprav uvedeny. Pro snadnější orientaci jsou materiálům přiřazeny zkratky, které respektují značení v předchozích pracích zpracovaných na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT.

EG	DC05 + ZE50/50
GI	DX54D + Z100
Zn	HX180 BD + Z100
SS	HX180 BD + Z100 + SS
SZ	HX180 BD + Z100 + SZ
PSV	HX180 BD + Z100 + PSV

Materiály označené SS, SZ a PSV mají shodný základní materiál plechu i vrstvu žárového zinku, byla ale na ně nanesena další vrstva zajišťující požadované technologické vlastnosti

DC05 + ZE50/50

Hlubokotažná za studena válcovaná ocel tl. 0,7 mm s galvanickým Zn tloušťky 3,8 µm.

DX54D + Z100

Hlubokotažná za studena válcovaná ocel tl. 0,6 mm s žárovým Zn tloušťky 11,7 µm.

HX180 BD + Z100

Vysokopevná IF ocel tl 0,7 mm s povlakem žárového Zn.

Chemické složení materiálů dle norem je uvedeno v Tabulce 4 a mechanické vlastnosti dle norem v Tabulka 5.

Tabulka 4: Chemické složení materiálů použitých v experimentu. [29] [30]

Materiál	C _{max} [%]	Mn _{max} [%]	P _{max} [%]	S _{max} [%]	Si _{max} [%]	Al _{max} [%]	Nb _{max} [%]	Ti _{max} [%]
DX54D	0,02	0,25	0,020	0,020	-	-	-	-
DC05	0,06	0,25	0,020	0,025	-	-	-	-
HX180BD	0,1	0,70	0,06	0,025	0,50	≤0,1	0,09	0,12

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti materiálů použitých v experimentu [29] [30]

Materiál	Mez kluzu Re [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A ₈₀ [%]
DX54D	120÷220	260÷350	36
DC05	180÷200	270÷330	40
HX180BD	180÷240	290÷360	34

- SS** Anorganický povlak založený na roztoku síranu zinečnatého ZnSO₄, který je za mokra nanášen (stříká nebo válečkuje) na povrch plechu. Následně je sušen. Výsledná hmotnost naneseného povlaku je cca 120 mg/m². Nosným činidlem je síra, která má dobré kluzné vlastnosti. Obsah síry v povlaku je cca 20 mg/m².
- SZ** Anorganický povlak na bázi solí Zn. Aplikace je podobná jako u SS, ale na jiné chemické bázi. Nosným činidlem je draslík. Obsah draslíku v povlaku je cca 10 mg / m².

PSV Anorganický povlak na bázi kyselého vodného sloučeniny (polyelektrolyt, silan, vosk)
Aplikace je podobná jako u SS, ale na jiné chemické bázi. Nosným činidlem je fosfor.
Obsah fosforu v povlaku je cca 6-10 mg / m².

Bylo vytvořeno šest sad definovaně opotřebovaných čepiček. V tomto případě definovaným opotřebovaním rozumíme počet již provedených svarů na nových neopotřebovaných a neofrézovaných čepičkách. V každé sadě je deset dvojic čepiček ze zvolené řady opotřebování. Pro každé opotřebování (10x) a každý materiál (6x) bylo vyhotoveno 5ks vzorků pro stříhovou zkoušku a 1ks pro metalografii + UTZ. Celkově bylo tedy vytvořeno 360 vzorků.

Rozměry vzorků jsou uvedeny v kapitole 7.1.

9.2.2 Použité svařovací zařízení a elektrody

O odporové bodové svařování proběhlo v Laboratoři výuky svářečských technologií na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze. Byl použit pneumaticky poháněný odporový lis DALEX PMS 11-4. Svařovací zdroj je MFDC středo-frekvenční 1000 Hz invertor. Řídicí jednotka má označení MEGA 1 MF 13Z64P QSF/S a software SER MEGA 2, ten umožňuje měření svařovacích parametrů přímo na elektrodách a zaznamenává svařovací parametry pro každý svarový spoj. Chlazení zajišťuje chladicí zařízení PL 80/100 Cool-3 o výkonu 2,7 kW s uzavřeným oběhem.

Tabulka 6: Štítek stroje Dalex PMS 11-4

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

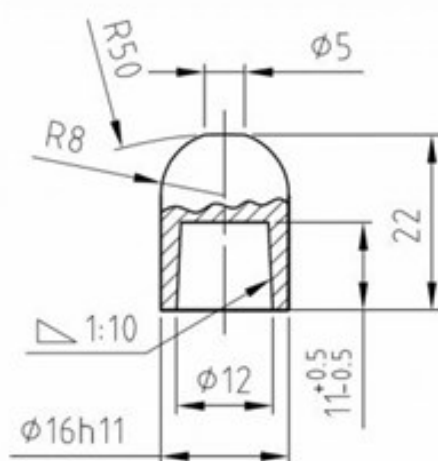
Elektrodové čepičky použité pro experiment mají označení Typ 39 D 1978-2 podle interního předpisu WV. Tyto čepičky jsou přímo určeny pro automobilový průmysl a jsou

běžně používány ve Škoda Auto. Materiál CuCr1Z je slitina s vysokým obsahem mědi s přidaným malým množstvím zirkonia a chromu pro zlepšení jejich mechanický vlastností. Označení materiálu elektrodových čepiček dle normy je ČSN EN ISO 5182 – A 2/2.



Obrázek 26: Svařovací lis DALEX PMS 11-4.

Geometrie elektrod je vyobrazena na Obrázku 27, nejdůležitějším rozměrem je průměr stykové plochy 5 mm. Chemické složení je následující: 98,98 % Cu; 0,9 % Cr; 0,12 % Zr.



Obrázek 27: Geometrie elektrodové čepičky 39 D 1978-2.

9.2.3 Svařovací parametry

Pro svařování byly použity parametry optimalizované uvedené v Tabulce 7. Postup optimalizace svařovacích parametrů byl proveden v souladu s normou ČSN EN ISO 14327 již v předchozích pracích zpracovaných na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT. Podle této normy je diagram oblasti svařování rozmezí svařovacího proudu, která umožňuje bodové

svařování bez rozstřiku s průměrem svarového bodu rovným nebo nad určenou hodnotu při daném čase svařování nebo při dané síle elektrody. V Tabulce 7 jsou uvedeny tyto svařovací parametry, které byly nastaveny po celou dobu svařování konstantní.

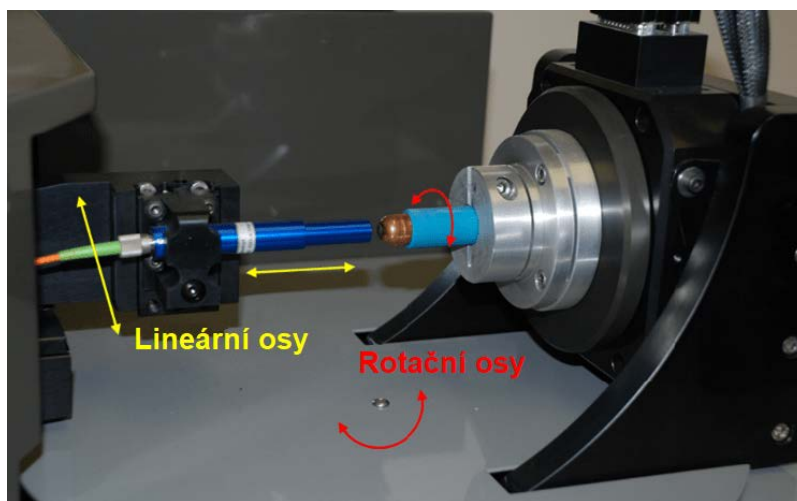
Tabulka 7: Optimalizované parametry materiály použité v experimentu.

Materiál	I [kA]	F [kN]	t [ms]	I [%]	P [V]
DC05 + ZE50/50	6	0,63	200	23,5	2
HX180BD + Z100	7	0,71	240	24	2,4
DX54D + Z100	6	0,63	200	24	2

V tabulce jsou pro pořádek uvedeny i hodnoty napětí v % z maximálního výkonu stroje a síla ve voltech (tlak v pneumatickém válci), jelikož jsou v těchto jednotkách na stroji nastavovány.

9.3 Měření topografie opotřebovaných čepiček

Měření topografie proběhlo na stroji Redlux umístěného v Laboratoři biomechaniky Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS ČVUT.

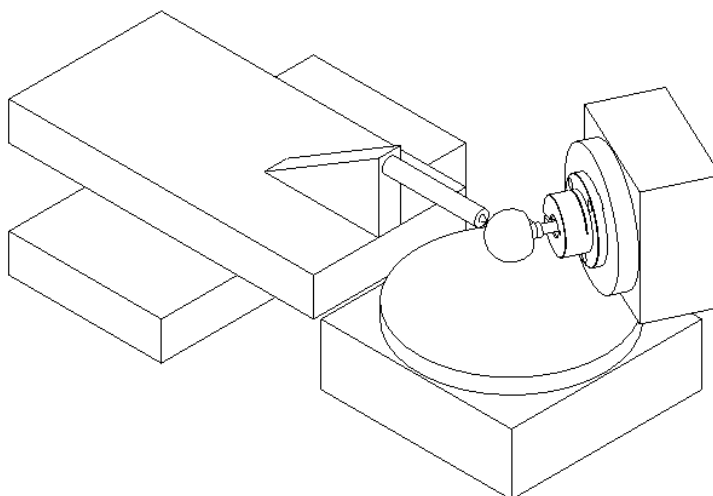


Obrázek 28: Měření opotřebované čepičky na optickém profilometru Redlux

Optický profilometr od společnosti RedLux Ltd. umožňuje měření celého povrchu (natočení až 240°) součásti během jednoho měření. K měření využívá bodový konfokální snímač.

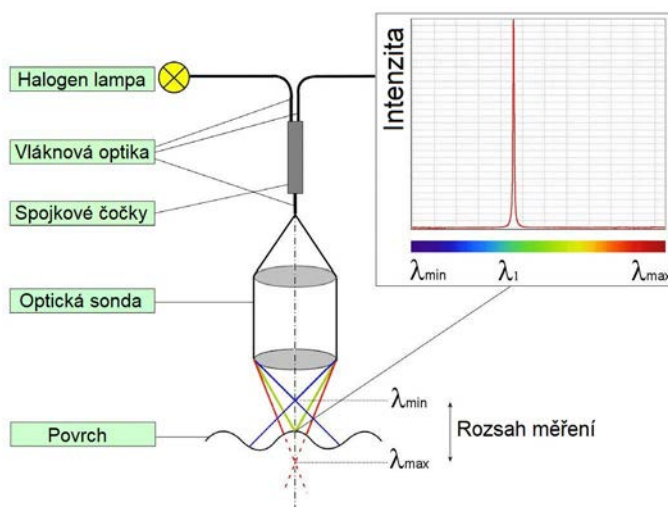
Typická aplikace pro tento stroj je skenování kloubních náhrad. Užívá se jako perspektivní alternativa gravimetrické metody pro stanovení objemového úbytku materiálu. Této typické aplikaci odpovídá vhodné uspořádání os stroje. Stroj se skládá ze dvou posuvných a dvou rotačních os, které jsou na vzduchových ložiskách k dosažení lepších přesností pohybu. Otočné osy se pohybují se vzorkem a posuvné osy pohybují senzorem. Všechny osy používají optické

snímače polohy a pro pohon lineární motory. Před měřením se celý systém musí zkalibrovat pomocí kalibrační hladké koule.



Obrázek 29: Schéma uspořádání os na optickém profilometru Redlux [31]

Rozlišení výsledného mračka bodů je dáno rozlišením dvou lineárních os, rozlišením dvou rotačních os a rozlišením optického senzoru. Rozlišení každé lineární osy je 100 nm, rozlišení každé rotační osy je 10" a rozlišení sondy je 20 nm.

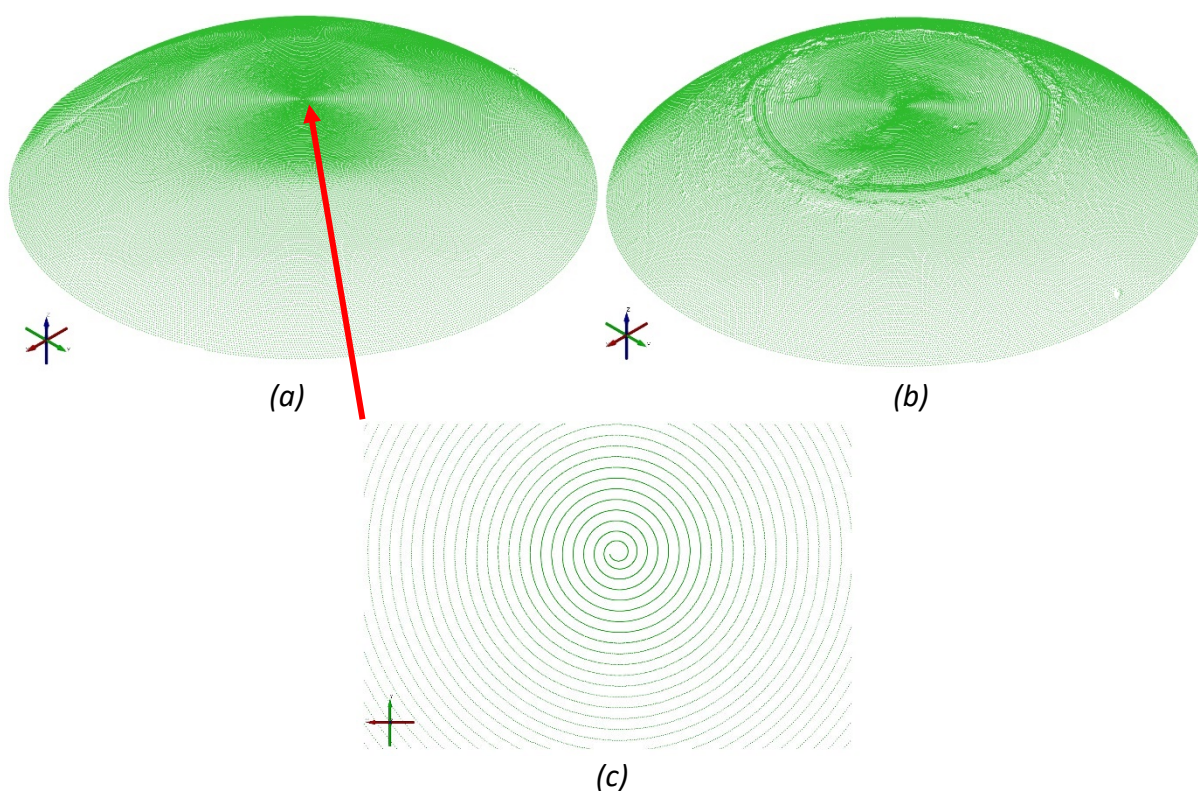


Obrázek 30: Princip měření konfokálním chromatickým snímačem [31]

Senzor využívá chromatickou aberaci čočky a slouží k určení jeho vzdálenosti od měřeného objektu. Chromatická aberace je barevná vada čočky způsobující závislost ohniskové vzdálenosti čočky na vlnové délce světla. Čočky s touto vadou pak lámou světlo každé vlnové délky pod jiným úhlem. Ve viditelném spektru světla je nejkratší vzdálenost u modrého světla, zatímco u červeného je tato vzdálenost nejdelší. Zbylé barvy se nachází v oblasti mezi nimi. V závislosti na vzdálenosti čočky od povrchu je světelný paprsek o konkrétní

vlnové délce λ fokusován na povrchu. Odražený paprsek je následně zpracován ve spektrometru, kde je k vlnové délce přiřazena vzdálenost od povrchu.

Při měření kulových ploch měří stroj s nastavenou frekvencí při kontinuálním pohybu první rotační osy a krokovém pohybu druhé rotační osy. Získáno je takto mračno bodů (point cloud) ve formě soustředných kružnic promítnutých na půlkulovou plochu. Každá kružnice má stejný počet bodů, avšak různý průměr. Výsledkem nejsou mračna bodů s konstantní hustotou bodů, kterou bychom pro kvantifikaci úbytku nebo přírůstku materiálu potřebovali. Toto je vidět na detailu Obrázku 31 (c). Řešení problému je popsáno dále spolu se zpracováním dat.



Obrázek 31: Point cloud naměřených dat z optického profilometru Redlux. Čepička PSV_pred_250 bez opotřebení (a). Čepička PSV_po_250 po 250 svařených bodech (b) Detail středu čepičky (c)

9.4 Způsob vyhodnocování parametrů topografie

V této diplomové práci je zpracován návrh metody monitorování a kvantifikace opotřebení elektrod. Navržený postup lze shrnout do těchto bodů:

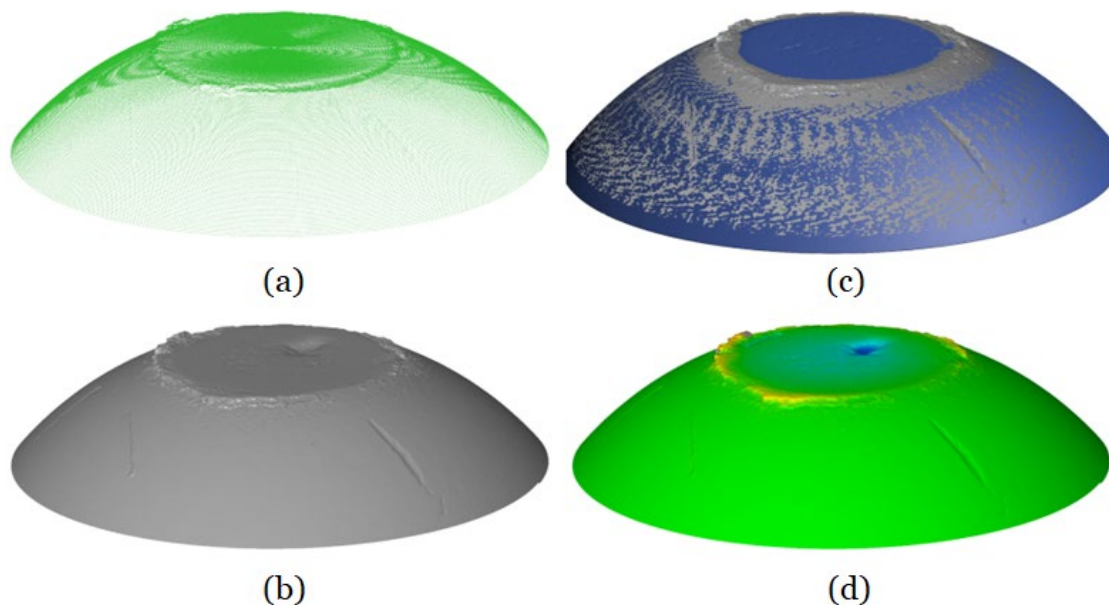
1. Naskenování (point cloud) neopotřebené dvojice elektrod na optickém profilometru Redlux.
2. Provedení zvoleného počtu svařových bodů na jednom materiálu bez ofrézování čepiček.
3. Naskenování dvojice elektrod po zvoleném počtu vyhotovených svařů.

4. Příprava dat v sw GOM Inspect – polygonizace mračen bodů, napasování modelů na sebe, porovnání ploch před a po (urč. deviací).
5. Zpracování dat v sw Matlab – ořezání a vycentrování, filtrace, interpolace do čtvercové sítě pro konstantní hustotu bodů, suma záporných a kladných deviací (objemové změny).
6. Vyhodnocení dalších parametrů sw GOM Inspect – axiální opotřebení, změna kontaktní plochy.

9.4.1 Zpracování dat

Pro zpracování dat byl užit inspekční software GOM Inspect 2018 určený pro podrobné vyhodnocení 3D dat. SW je mimo jiné schopný polygonizace mraku bodů, rozměrové analýzy ve 3D nebo 2D, vyhodnocení tolerancí tvaru a polohy (GD&T) a porovnání rozměrů vůči referenčnímu CAD modelu.

Z optického profilometru Redlux byly importovány naměřené 3D body XYZ ve formátu ASCII. Jeden point cloud naskenované čepičky se skládá přibližně ze 120 tis bodů, který je vidět na Obrázku 32(a). Data bylo nejprve nutné polygonizovat (mesh) přičemž byly i odfiltrovány odlehlé hodnoty (Obrázek 32(b)). Na čepičkách byly ještě před experimentem vytvořeny po obvodu tři zářezy v dostatečné vzdálenosti od kontaktní plochy čepičky. Meshe čepiček se následně napasovaly na sebe metodou nejmenších čtverců aplikovanou na zmíněné zářezy pro správné ustavení v obvodovém směru (Obrázek 32(c)).



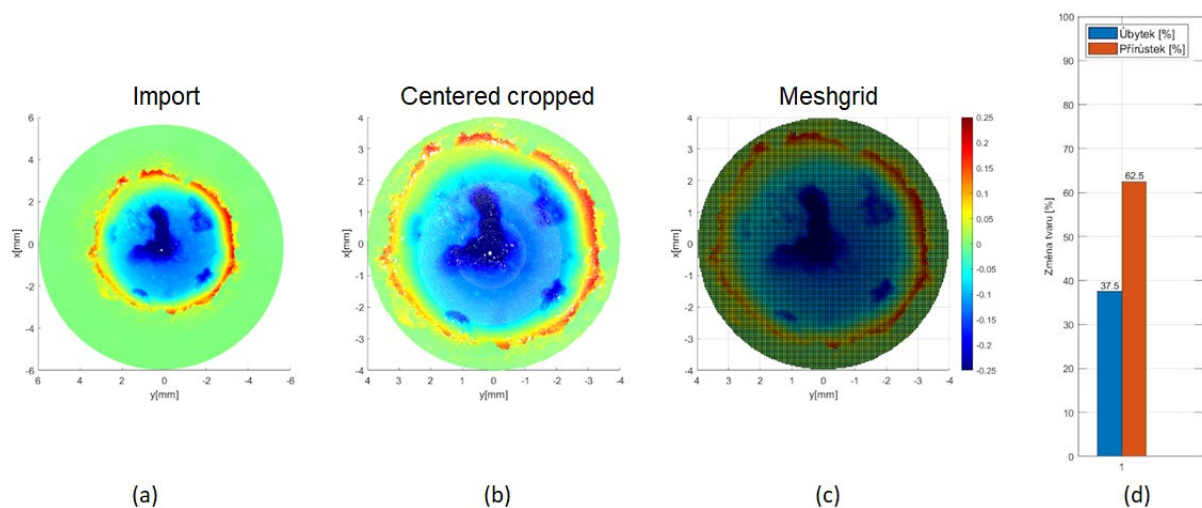
Obrázek 32: Postup získání deviací dvou ploch v sw GOM Inspect. Importovaný point cloud. (a) Polygonová síť (mesh). (b) Čepičky před a po svařování napasované na sebe. (c) Porovnání ploch – deviace. (d)

Funkcí Surface Comparison se v následujícím kroku získaly deviace mezi plochou před a po svařování. Software získává hodnoty deviací vytvořením normály k elementu v každém bodu polygonové sítě (Obrázek 32(d)). Práci lze v softwaru dobře zautomatizovat, ale je nutné důsledně dodržovat logiku v číslování importovaných souborů a pojmenování nových prvků. Pro automatizaci měření vybraných parametrů bylo využito prostředí Microsoft Power Automate a částečně možnost zadávání příkazů jazykem Python.

9.4.2 Parametr Δv – objemové změny

K dalšímu zpracování dat bylo potřeba využít software Matlab. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, naměřená data a ani vypočítané hodnoty deviací nejsou v síti s konstantní krokem, ale v soustředných kružnicích. Abychom mohli korektně vyjádřit objemy a porovnávat mezi sebou různé výsledky, je nutné hodnoty interpolovat do kartézské sítě (*meshgrid*). Postup v softwaru Matlab byl následující. Nejprve se importovala ASCII data z funkce Surface comparison ve formátu XYZ Dev. V prvním kroku se data vycentrovala podle krajních hodnot do počátku kartézských souřadnic a byly eliminovány hodnoty vně kruhu o průměru 9 mm. Poté byla vytvořena uniformní čtvercová síť o hraně 12 mm s rozlišením (*meshRes*) 0,04 mm, na kterou se interpolovala importovaná data pomocí funkce *griddata*. Funkce *griddata* se zvolenou metodou "*linear*" využívá lineární interpolaci založenou na triangulaci. Výsledná plocha má pouze C0 spojitost, což ale tomuto přístupu nevadí, jelikož na konci jsou stejně vyhodnocovány jen hodnoty v uzlových bodech a nedojde ke ztrátě extrémních (odlehle hodnoty jsou již odfiltrovány) deviací v takové míře jako u ostatních metod.

Zvolená metoda interpolace je založena na Delaunayově triangulaci. Tento algoritmus triangulace funguje v rovině tak, že kruh opsaný každému elementu – trojúhelníku neobsahuje uvnitř žádné body z množiny interpolovaných bodů. Výhodou je, že tak maximalizuje nejmenší úhel uvnitř každého trojúhelníku a ve výsledku pak síť obsahuje minimum zploštělých trojúhelníků, které často způsobují při numerických výpočtech problémy. Původní mrak bodů obsahující přibližně 120 tis bodů a je po této interpolaci zmenšen na 85 tis bodů, ale na průměru 9 mm. Jinak řečeno - počet bodů se zmenšil na 71 % a ale plocha byla oříznuta na 33 %, tudíž lze tvrdit, že původní průměrná hustota je nižší než ta nově vytvořené sítě.



Obrázek 33: Postup zpracování dat v software Matlab. Surová Importovaná data deviací. (a) Vystředěné a ořezané hodnoty. (b) Interpolované hodnoty do uniformní sítě. (c) Suma záporných, respektive kladných deviací. (d)

V posledním kroku nám stačí jen určit sumu záporných a kladných deviací a ty prohlásit za přírůstek, respektive úbytek materiálu. Pokud se tyto sumy vynásobí elementární čtvercovou plochou, lze tvrdit, že se jedná o objemy. Tento postup je ve své podstatě obdélníková metoda numerické integrace, kdy funkce není spojitá, respektive ji ani neznáme, ale známe množinu funkčních hodnot v uzlových bodech.

Došlo ale k určitému zjednodušení tím, že nebyla uvažována souřadnice Z – mračno bodů bylo promítnuto do plochy XY ve které se body interpolovaly do kartézské 2D sítě. Pokud by bylo nezbytné se tomuto vyhnout a přiblížit se reálnějším objemům, jsou dvě možnosti. Buď vytvořit model neopotřeбенé čepičky podle rozměrů z výkresu a ten nasítovat s uniformní sítí, což opět přináší pochybnosti o souladu se skutečnou čepičkou. Nebo pro každý model čepičky vytvořit svou vlastní síť a na tu poté interpolovat. Tento postup byl proveden pro jeden vzorek PSV_300. Hodnoty úbytku materiálu jsou $7,15 \text{ mm}^3$ a přírůstku $1,06 \text{ mm}^3$. Hodnoty ze zjednodušeného výpočtu se liší max o 2 %. Vzhledem k potřebě sledovat pouze vývoj objemových změn s opotřebením a malému rozdílu výsledků metod byl zvolen přístup bez potřeby vytvářet trojrozměrnou síť pro každý výpočet a byla použita jedna dvojrozměrná, do které byl model promítnut. Proto vytvořené grafy neobsahují absolutní hodnoty objemů, ale procentuální vyjádření sum záporných a kladných deviací, které popisují, který mechanismus v danou chvíli převládá.

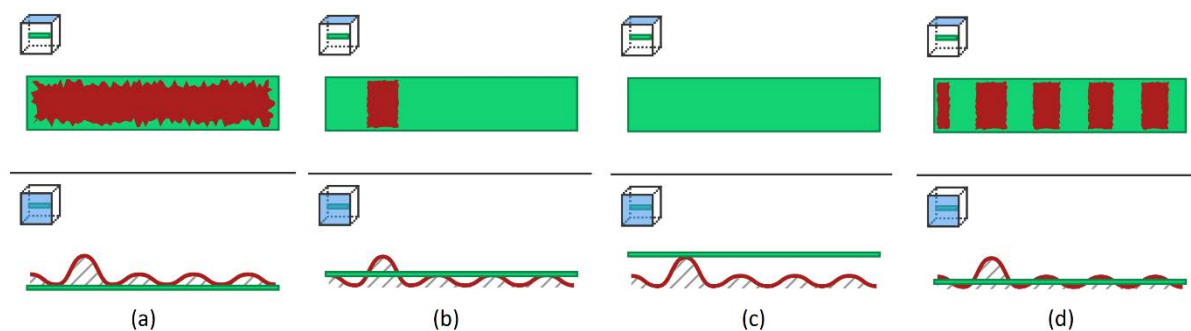


Obrázek 34: Snímky opotřebovaných čepiček. Těsně před prvním ofrézováním (vlevo). Po ofrézování (uprostřed). Opotřebovaná po posledním ofrézování (vpravo).

9.4.3 Parametr Δl – změna axiální délky

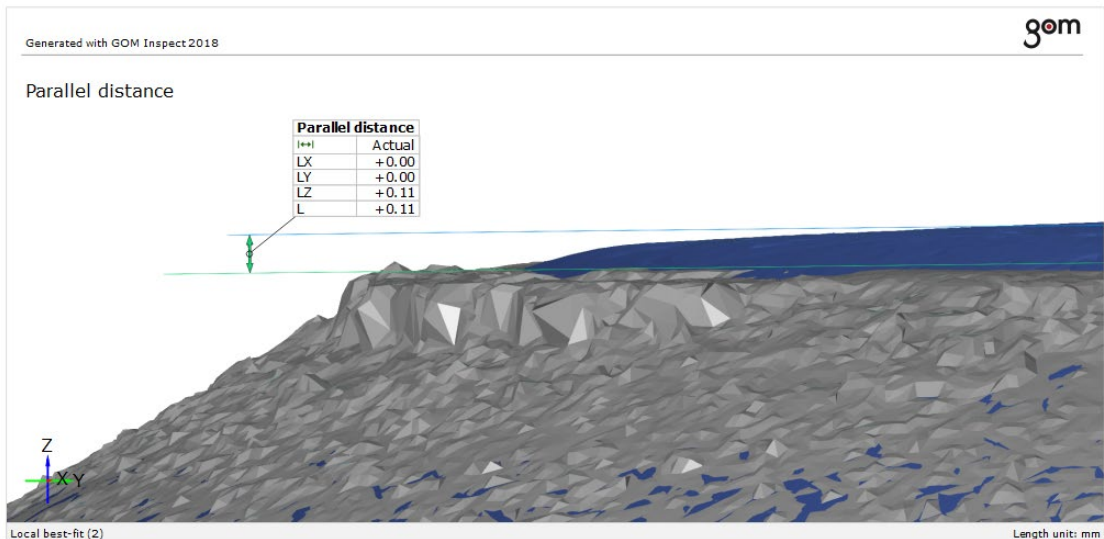
Tento parametr je zvolen především z důvodu jeho ověření pro možnost online monitorování. Jak ukázaly práce [19] [24] [28], je možné jeho měření přímo na stroji bez nutnosti manipulace s čepičkami. Jeho hodnota je složena z účinků dvou dějů, a to mechanické deformace (mushrooming) a ulpívání materiálu plechu a jeho povrchové úpravy na povrchu elektrody.

Měření probíhalo opět v software GOM Inspect 2018. Bylo nutné sestrojít dvě rovnoběžné plochy reprezentující kontaktní plochy elektrodových čepiček.



Obrázek 35: Znázornění metod best fit v GOM Inspect. Chebyshev best fit uvnitř (a), uprostřed (b), vnější. (c); Gaussova best fit vnější. (d)

Metoda pro jejich měření je zvolena *Gaussian best fit outside*. Další možností by byl *Chebyshev best fit* vnější, uvnitř nebo uprostřed. Metoda *Chebyshev best fit vnější* by reprezentovala dotyk s jinou plochou bez působení sil a byla by často ovlivněna malými výčnělky ulpělého materiálu. Ty nejsou v průběhu procesu stabilní, při přitlačení na plech se zbortí nebo jsou jen lehce přilepeny k elektrodám.

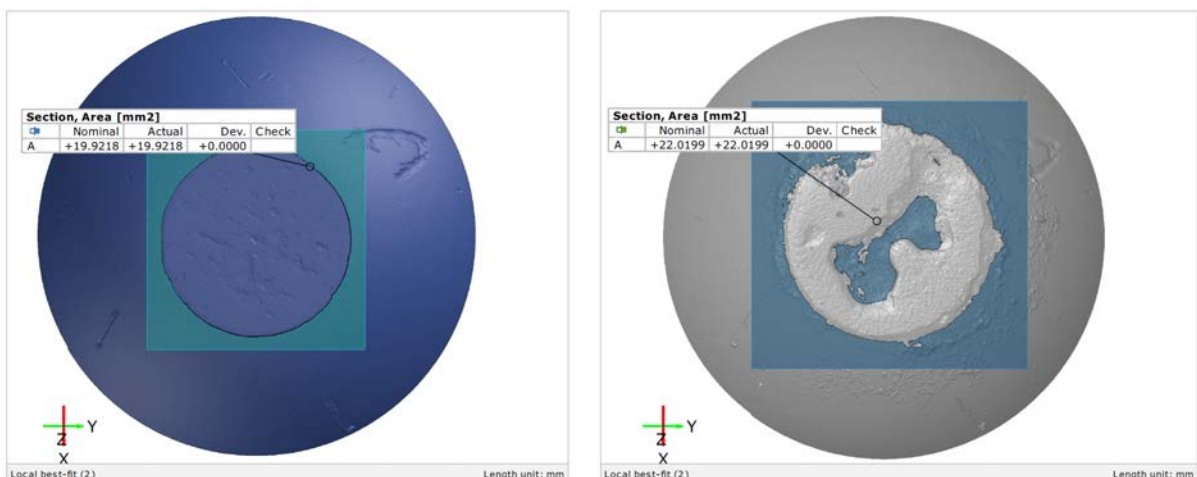


Obrázek 36: Měření změny axiální délky elektrody v GOM Inspect.
Modrá – bez opotřebení, šedá – opotřebená.

Proto byla zvolena zmíněná metoda, která tyto výčnělky odfiltruje a následně interpoluje plochu zbylou množinu bodů. Body vybrané množiny leží na kontaktní ploše uvnitř kružnice o průměru 5 mm.

9.4.4 Parametr Δs – změna kontaktní plochy

Pro měření kontaktní plochy byl zkonstruován průnik plochy vytvořené v předchozí kapitole s *meshem* opotřebované čepičky. Výsledkem jsou uzavřené křivky, jejichž obsah lze v dané rovině změřit, respektive je možné vyhodnotit plochu mezi obvodovou křivkou a křivkami uvnitř (krátery).



Obrázek 37: Měření kontaktní plochy po 150 svarech.

9.5 Provedení zkoušek bodových svarů

Pro uvedení opotřebení do souvislosti s kvalitou svaru (mechanické vlastnosti, rozměry a umístění svarové čočky, vady) je využita řada výše zmíněných elektrod potažmo jimi svařených vzorků. Pro experiment je vhodné mít do maximální míry všechny proměnné vstupující do procesu konstantní. Jediné, co se mění, je opotřebení elektrod. Poté lze za ideálních podmínek (vliv obsluhy, nahodilé jevy) připsat změny kvality svaru vlivu opotřebení. Pro veškeré zkoušky (zk. stříhem, UTZ, metalografie) byly využity laboratoře a zařízení společnosti Škoda Auto a.s. v Mladé Boleslavi.

9.5.1 Zkouška stříhem

Zkouška stříhem byla provedena po pěti kusech pro každé z deseti opotřebení od všech šesti materiálů. Což je celkem 300 vzorků. Použit byl univerzální zkušební trhací stroj ZWICK Z250. Vybrané technické údaje jsou uvedeny v Tabulce 8.

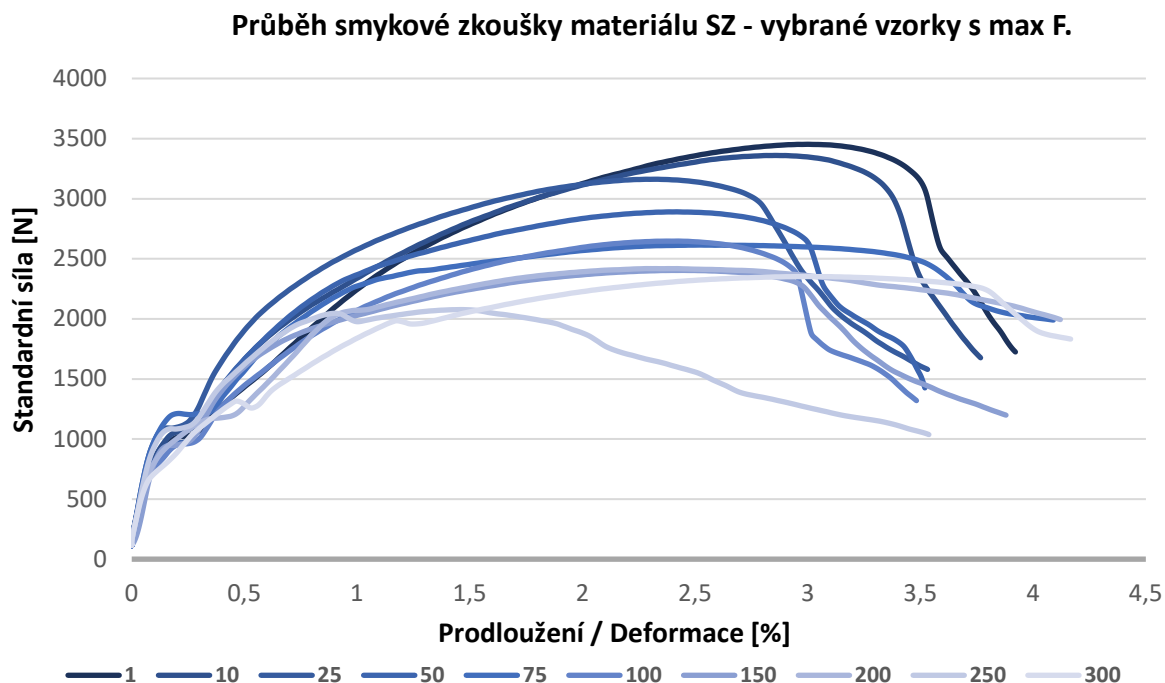
Tabulka 8: Technické údaje trhacího stroje ZWICK Z250.

Zařízení	ZWICK 250
Jmenovité zatížení [kN]	250
Zkušební rychlost [mm/min]	0,0005 ÷ 600
Maximální zdvih [mm]	320
Přesnost měření síly [%]	±0,2 zatížení
Rozlišení dráhy čelistí [μm/impuls]	0,0083
Přesnost měření polohy [μm]	± 2



Obrázek 38: Univerzální zkušební trhací stroj ZWICK Z250 ve Škoda Auto a.s.

Zkouška se řídí normou ČSN EN ISO 14273 Odporové svařování – Destruktivní zkoušky svarů – Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů. Postup je shodný s postupem uvedeným v kapitole 7.1.



Obrázek 39: Graf průběhu smykové zkoušky materiálu SZ – vzorky s maximální F pro dané opotřebení elektrod.

Zkouška spočívala v zaznamenávání síly při konstantní rychlosti posuvu. Průběh je vidět na grafu v Obrázku 39. Pro tento graf byly vybrány pouze vzorky s maximální silou z každé skupiny pěti vzorků se zvoleným opotřebením pro materiál SZ. Výpovědní hodnota tohoto grafu leží ve znázornění největších dosažitelných hodnot F, avšak graf nic neříká o konzistentnosti procesu.

Ostatní data byla zpracována následovně. Pro každou skupinu pěti vzorků byl vypočítán aritmetický průměr a těchto deset hodnot zaneseno do grafu *Průměrná síla přetržení – opotřebení elektrod* pro každý z šesti materiálů.

9.5.2 UTZ a ruční měření průměrů svarový čoček

Norma ČSN EN ISO 14329 Odporové svařování – Destruktivní zkoušky svarů – Typy porušení a geometrická měření odporových bodových, švových a výstupkových svarů předepisuje odlupovací zkoušku jako metodu oddělení plechů pro následné měření průměrů svarových čoček. V tomto experimentu bylo již ze stříhové zkoušky roztrženo značné množství

vzorků, proto jsou využity i ke stanovení průměrů. Zkreslení výsledků kvůli deformaci svarové čočky v jednom směru bylo shledáno nevýznamné. Navíc při uvážení zachování objemu svarové čočky musí prodloužení v jednom směru kompenzovat zkrácení v druhém a během zkoušky je z těchto dvou rozměrů stanovován aritmetický průměr. Přesto nelze tento postup označit za korektní podle normy.



Obrázek 40: Ultrazvukový přístroj Tessonics RSWA F2 [32]

Vzorky připravené pro metalografii, tj. jeden pro každé opotřebení, byly také změřeny ultrazvukem metodou phased array.

Použitým přístrojem je Tessonics RSWA F2 (Frankie). Frekvence sondy je 15MHz a počet snímačů v jedné sondě je 52. Přístroj lze použít pro průměry svarových bodů od 1 do 10 mm.

Při použití techniky phased array je fyzický pohyb sondy, který je nutné při konvenčním ultrazvukovém testování, nahrazeno fokusováním a nakláněním svazku. Toho je dosaženo díky konstrukci sondy, která obsahuje množství malých měničů – elementů. Jednotlivé elementy jsou navzájem izolovány ve vlastním pouzdře. Každý element lze samostatně ovládat a je schopen i samostatně přijímat ultrazvukové signály. Elementy jsou vyrobeny jako piezokompozitní měniče. Pro naklápění svazku jsou jednotlivé elementy buzeny s konstantním zpožděním, a tím je posunuto čelo vlnoplochy. K fokusaci svazku jsou elementy buzeny symetricky, což je použito v případě, kdy je oblast zájmu pouze malá oblast. Popřípadě lze takto skenovat celou plochu. Data získaná odrazy od materiálových nehomogenit z více paprsků lze poté sestavit a zobrazit tak obraz řezu svarem.

9.5.3 Metalografie

Metalografická zkouška se primárně používá jako doplňující metoda zkoumání svarů. Poskytuje informace o mikrostruktuře svaru, velikosti tepelně ovlivněné oblasti a tvaru svarové čochy. Metoda spočívá v přípravě metalografického výbrusu ve středu svarové čochy nebo v požadované poloze s následným pozorováním na mikroskopu.

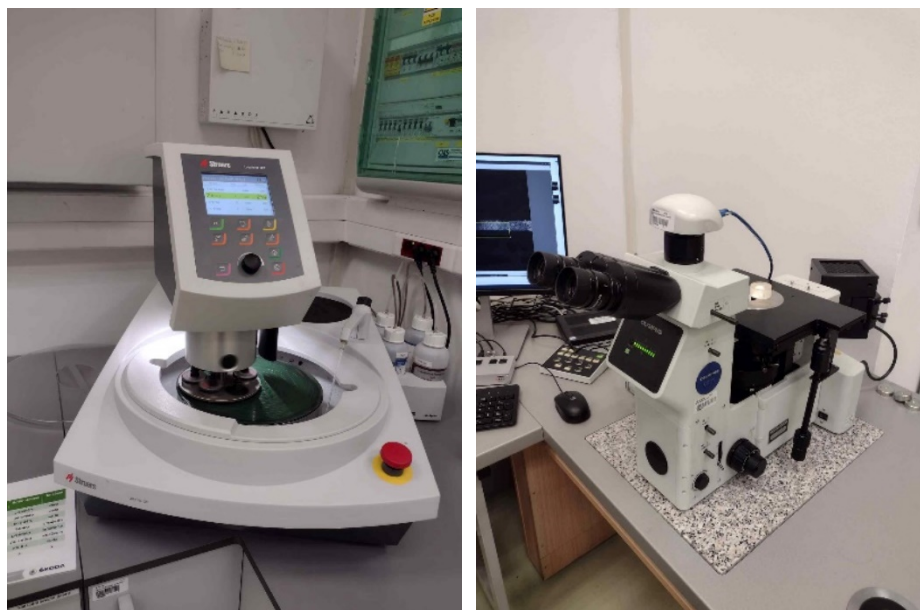


Obrázek 41: Metalografická pila Buehler AbrasiMet (vlevo) a bruska Buehler Alpha (vpravo) ve Škoda Auto a.s.

Někdy se k měření průměrů svarových čoch nesprávně používá metalografie. Při přípravě vzorku (dělení i broušení) může dojít snadno k nepřesnostem v poloze výsledného řezu, což může výrazně zkreslit výsledky.

Pro experiment se osvědčilo vytvořit si přípravek ve formě příložky. Nejprve byla stanovena výška, kterou bruska a leštička odeberou ze vzorku při dodržení zvoleného postupu. Následně je vytvořena daná příložka o šířce rovné šířce kotouče (prořez) plus vzdálenost svěrák – kotouč plus velikost úběru broušení a leštění. Po opření příložky ke svěráku lze snadno upnout vzorek v požadované poloze tak, aby řez šel co nejpřesněji středem svarového bodu. I přesto je značně nevhodné vyhodnocovat průměry svarových bodů touto metodou.

Metalografické výbrusy byly zhotoveny pro jeden vzorek pro každé opotřebení a pro každý materiál (celkem 60 vzorků). Zpracování proběhlo stejně jako ostatní zkoušky v laboratořích Škoda Auto a.s.



Obrázek 42: Poloautomatická leštička Struers LaboPol-30 (vlevo) a metalografický mikroskop Olympus GX71 s digitální kamerou (vpravo) ve Škoda Auto a.s.

Dělení vzorků proběhlo na metalografické pile Buehler AbrasiMet 250. Vzorky byly za studena zality do formy akrylátovou pryskyřicí Struers Clarocit (Powder a Liquid). Vytvrzení proběhlo za atmosférického tlaku a při pokojové teplotě. Akrylátové pryskyřice se používají tam, kde je nutné v krátkém čase vytvořit vzorky a není kladen důraz na zachování hran vzorku po broušení. Broušení vzorků bylo provedeno na brusce Buehler Alpha. Leštění pokračovalo na poloautomatické leštičce Struers LaboPol-30. Mezi jednotlivými kroky byly vzorky vyčištěny v ultrazvukové čističce Struers Lavamin. K naleptání vzorků byl použit 5% roztok kyseliny dusičné v alkoholu (Nital). Vzorky se zviditelněnou strukturou byly poté pozorovány pod inverzním metalografickým mikroskopem Olympus GX71 s digitální kamerou.

10. VÝSLEDKY A DISKUZE

10.1 Vývoj parametrů objemových změn s opotřebením.

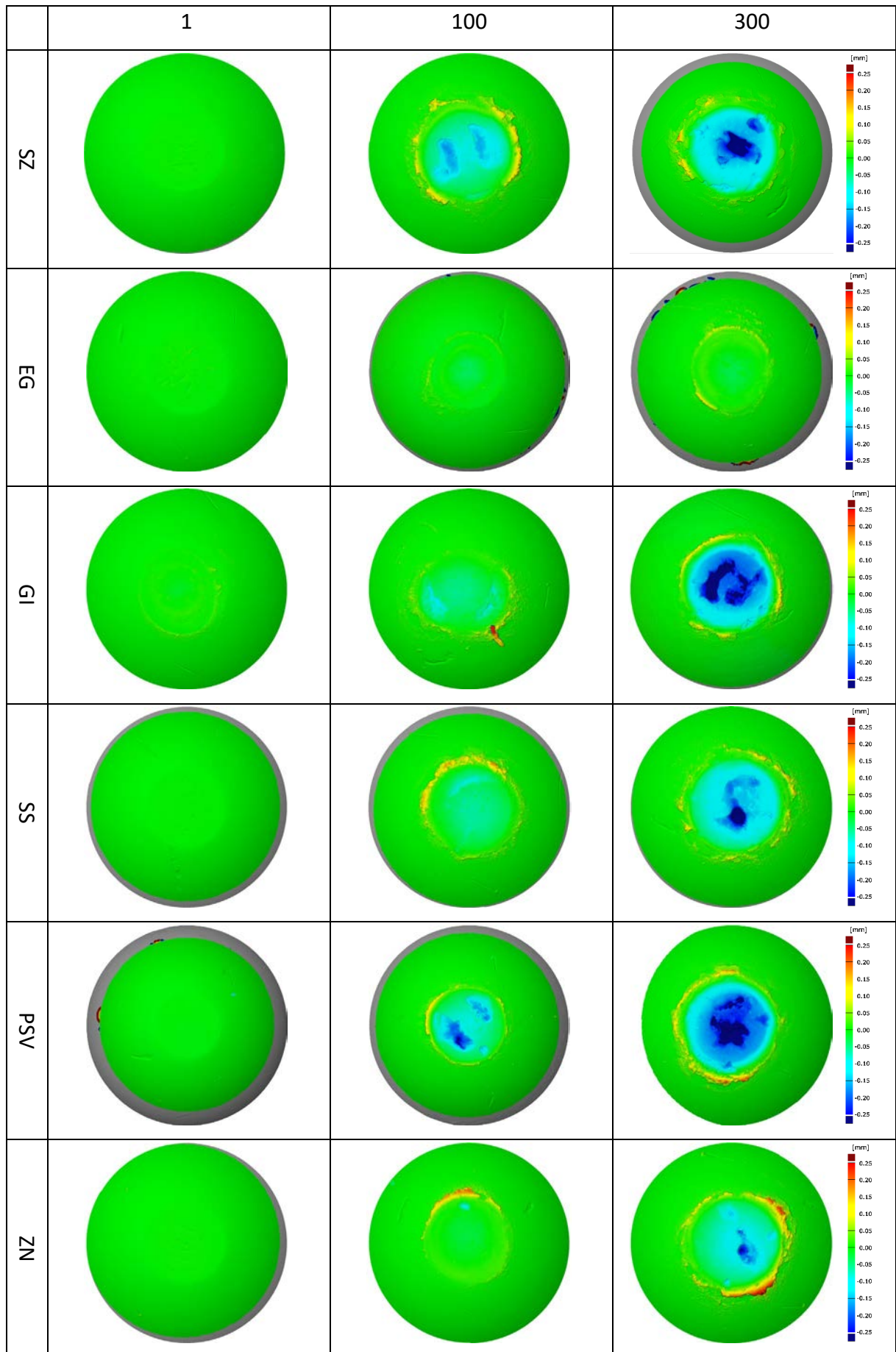
Metodikou popsanou v kapitole 9.4.2 byly vytvořeny grafy vývoje parametrů objemových úbytků a přírůstků v závislosti na opotřebení elektrod. Kvantifikace je zde pomocí poměrů kladných a záporných deviací pro popsaní mechanismu, který v dané fázi převažuje.

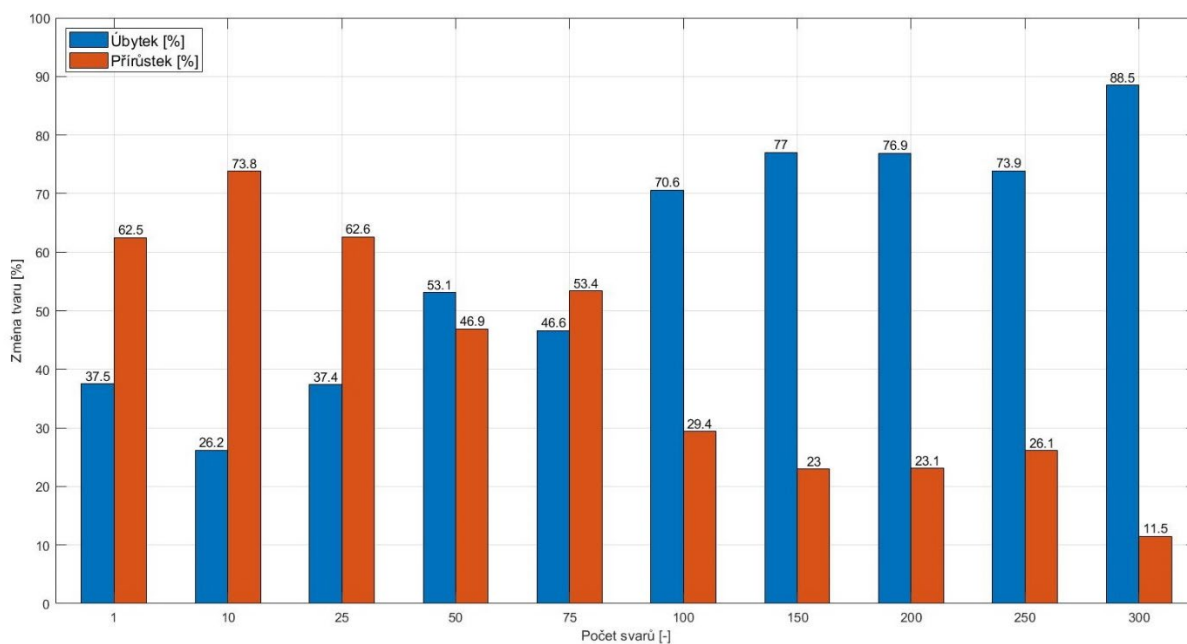
Pro znázornění změn topografie jsou vhodné heatmapy, na nichž jsou barevně odlišeny hodnoty deviací. Měřítko je od -0,25 mm (červená) po 0,25 mm (tmavě modrá). Heatmapy jsou vytvořeny pro všech deset opotřebení z řady 1-300, viz Příloha 1. Zde jsou v Tabulce 9 pro znázornění vyobrazeny jen pro opotřebení 1, 100 a 300.

Na grafech i na heatmapách lze sledovat různé trendy. Pro materiály označené SZ, SS, PSV, GI a částečně i Zn je typický průběh na Obrázku 43. Charakteristický je pro nás bod, kdy prvotní převahu ulpívání materiálu na elektrodě vystřídá výrazné vytrhávání materiálu ze středu elektrody. Tento bod nastává u zmíněných materiálů okolo 100. svaru. U materiálu označeného Zn je poněkud posunut k 150. svaru, avšak křivka si svůj tvar drží. Tento průběh je u hlubokotažného i vysokopevného i s rozdílnými technologickými povlaky. Nejprve materiál přibývá (ulpívá a přemísťuje se), poté dochází k výraznému vytrhávání. Tyto plechy mají společné jedno, a to povrchovou úpravu žárovým zinkem.

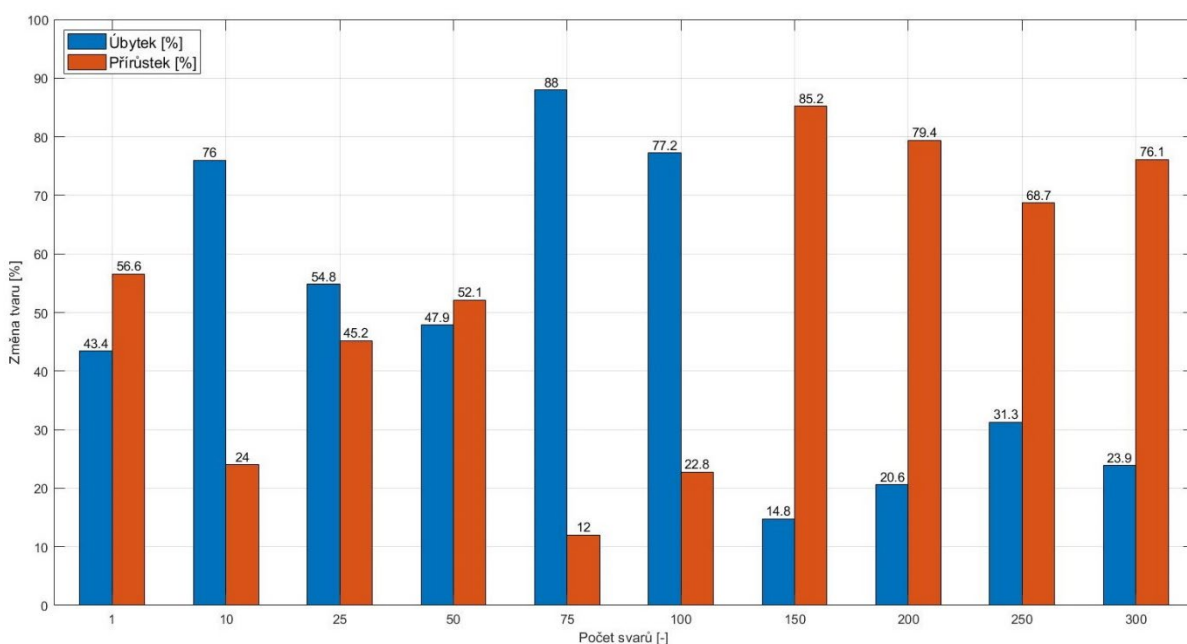
U plechů EG (elektrolytický zinek) lze sledovat opačný vývoj, nejprve materiál ubývá a poté začne jeho ulpívání na elektrodě. Celkově jsou ale objemové změny značně menší a prvotní ubývání lze přisoudit jednoduché deformaci působící silou. Vyobrazeno na Obrázku 44. Všechny průběhy jsou v Příloze 2.

Tabulka 9: Heatmapy topografií elektrod po 1, 100 a 300 svarech, všechny materiály.





Obrázek 43: Vývoj parametrů objemových úbytků a přírůstků v závislosti na opotřebení elektrod pro materiál HX180 BD + Z100 + SZ.

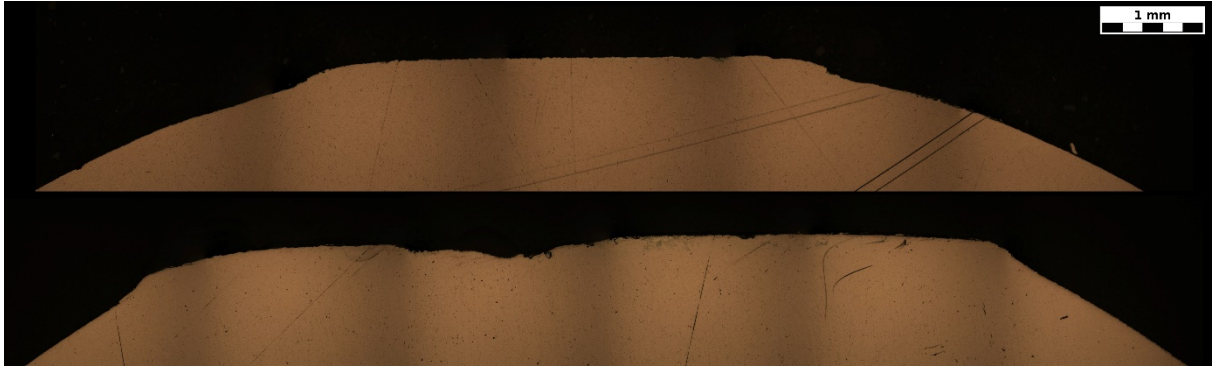


Obrázek 44: Vývoj parametrů objemových úbytků a přírůstků v závislosti na opotřebení elektrod pro materiál DC05 + ZE50/50.

10.2 Změna kontaktní plochy s opotřebením

V kapitole 9.4.4 je popsán postup měření parametru Δs – změna kontaktní plochy. Jak je vidět na Obrázku 45, plocha se s opotřebením významně mění. Dopady této změny jsou popsány v kapitole 3.1. Toto měření bere v potaz krátery vytrhaného materiálu (Obrázek 37), což je rozdíl od jiných přístupů, které například měří pouze průměr kontaktní plochy. Pokud

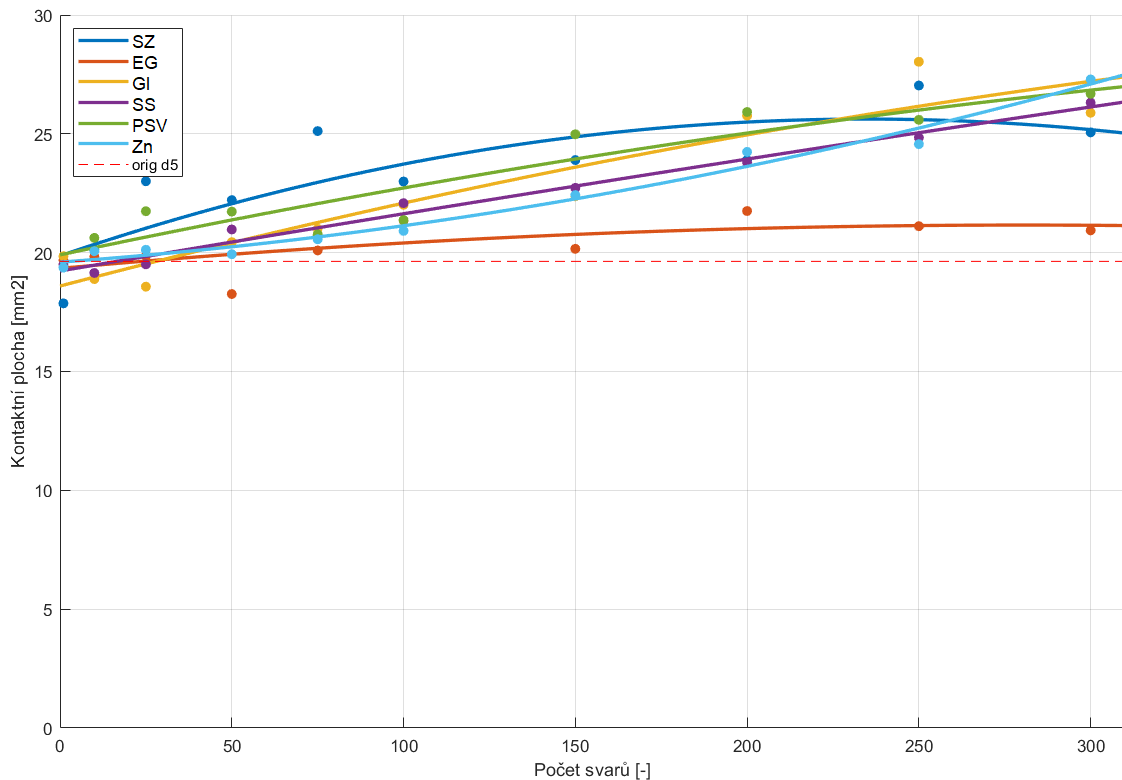
bychom také připustili, že kontaktní plocha je kruhového tvaru a počítali její obsah jen jako obsah kruhu, dopouštíme se nepřesnosti. Například pro vzorek GI 300 je obsah kruhu opsaného ploše 31.45 mm², ale obsah změřený jako průnik roviny a meshe je 25,88 mm².



Obrázek 45: Snímek čepičky svařovací elektrody nepoužité (nahore) a po 300 svařech (dole).

Původní plocha je dle průměru 5 mm rovna 19.63 mm². Maximální změřená plocha 28.03 mm² je na vzorku GI 250, což je nárůst plochy o 42,7 %. Při pohledu na rovnici 2.6 je snadné posoudit vliv tohoto nárůstu na proudovou hustotu.

Stejně jako u objemových změn se nám na grafu odlišně chovají vzorky označené EG.

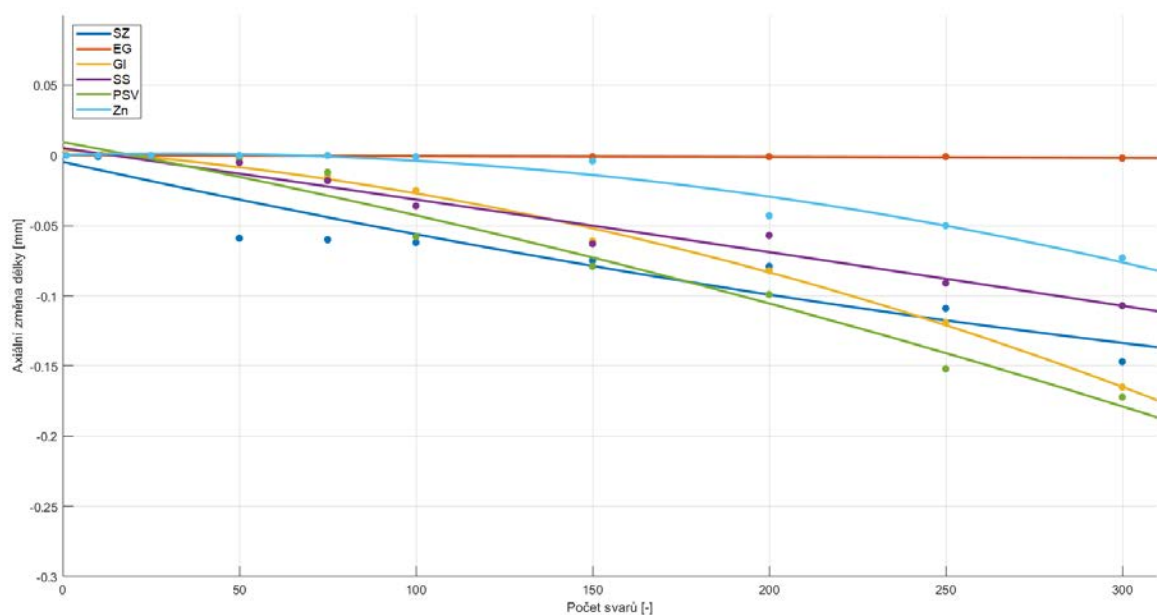


Obrázek 46: Vývoj kontaktní plochy elektrody s počtem svařů. Body proloženy polynomem 2. stupně.

Na grafu jsou naměřené hodnoty proloženy polynomem 2. stupně, avšak řada z nich vykazuje na zvoleném rozsahu spíše lineární závislost (kromě SZ). U materiálů GI a SZ je vidět, že po 250. svaru klesá velikost plochy. Je otázkou, zdali by se s dalším počtem svarů plocha dále výrazněji zvětšovala. Tento jev je vidět na obrázcích v Příloze 1, kde je znatelné, že se krátery více rozšiřují do šířky. Tímto rozšiřováním kráterů dochází vzhledem k velikosti kontaktní plochy ke kompenzaci mechanismu deformace čepičky (mushrooming)

10.3 Změna délky elektrody s opotřebením

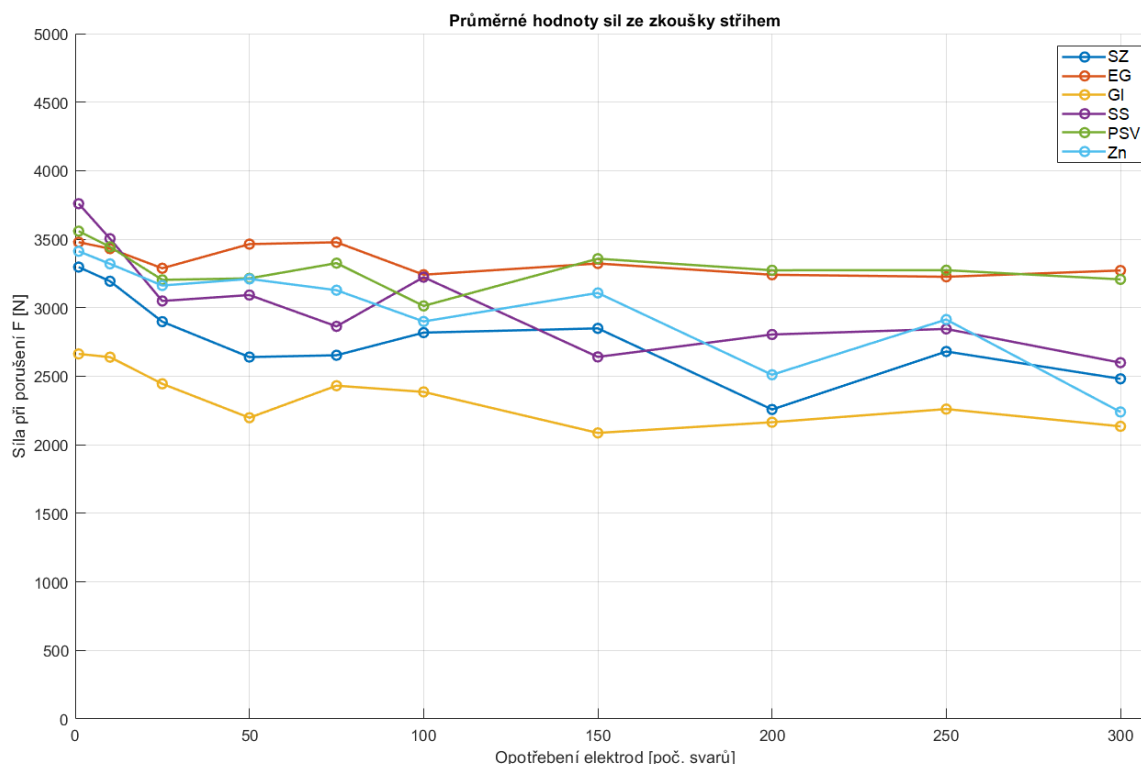
Měření parametru Δl je popsáno v kapitole 9.4.3.



Obrázek 47: Vývoj axiálního opotřebení elektrod s počtem svarů.

Naměřené hodnoty se pohybují v podobných mezích jako ve článku [19], kde autoři dle naměřených změn délky dopočítávají kontaktní plochu a používají je k určování konce životnosti elektrody. Jejich hodnoty jsou vidět na Obrázku 20.

10.4 Vyhodnocení zkoušky stříhem



Obrázek 48: Průměrné hodnoty síly při přetržení ze zkoušky stříhem.

Postup zkoušky stříhem dle ČSN EN ISO 14273 je popsán v kapitole 7.1 a reálné podmínky experimentu jsou v kapitole 9.5.1. Pro znázornění výsledků byl vytvořen graf na Obrázku 48. Průměrné hodnoty z pěti vzorků vytvořených elektrodami se stejným opotřebením jsou zaneseny do grafu v závislosti na opotřebením.

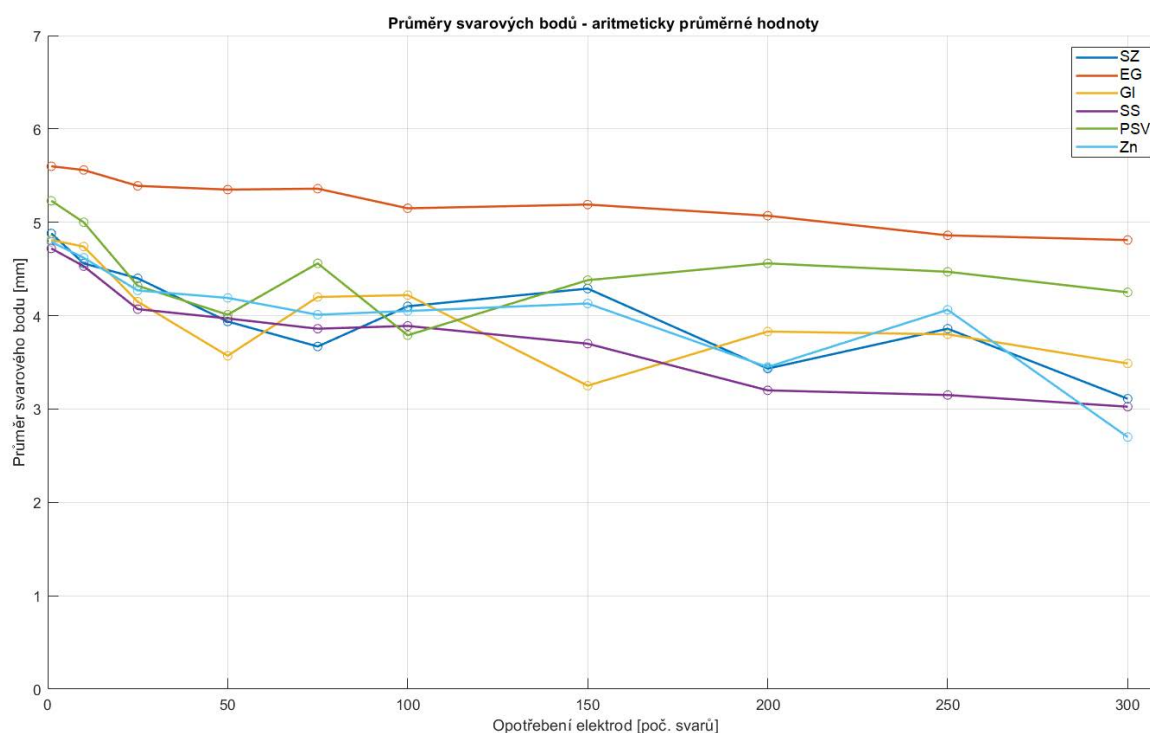
Na grafu se odchyľuje materiál DX54D + Z100 (ozn. GI), což bude způsobeno menší pevností materiálu. Jak již bylo zmíněno, tato práce se nezabývá hodnocením jednotlivých materiálů a povrchových úprav. Zhodnotit ale lze rozptyl a pokles hodnot síly při přetržení s postupným opotřebením elektrody. Pro materiál DC05 + ZE50/50 (ozn. EG) je střížná síla po celou dobu více stálá, směrodatná odchylka hodnot síly je nejmenší a je rovna 100,95N. Toto se již dá označit za důsledek menšího opotřebením čepiček svařovacích elektrod.

Pro materiál HX180 BD + Z100 + PSV (ozn. PSV) je rozptyl oproti ostatním materiálům také menší. Vliv opotřebením je zde nižší, přestože tento materiál je na grafech axiální délky a kontaktní plochy mezi těmi s nejvyšší změnou.

U ostatních materiálů je vidět větší vliv opotřebením na pevnost. PSV, SS a SZ mají stejný materiál plechu a stejnou úpravu žárovým zinkem. Je zde tedy zřetelný vliv technologického povlaku na pevnost bodového svaru.

10.5 Vyhodnocení průměrů svarových čoček

Ruční měření



Obrázek 49: Průměry svarových bodů změřené ručně (aritmetické průměry).

Dle vztahu $d > 3,5\sqrt{t}$ z normy ČSN EN ISO 8166 je minimální velikost svarové čočky 2,71 mm pro materiály SZ, EG, SS, PSV, ZN a 2,92 mm pro materiál GI. K ukončení životnosti dle normy došlo pouze u materiálu Zn a SS v obou případech po 300 svarech. Kritérium je nevyhovující velikost čočky u tří z pěti po sobě následujících svarech. U materiálu EG se nevyhovující svary neobjevily vůbec. U ostatních materiálů se v menší míře objevovaly od 150 svarů, ale stále splňovaly kritérium životnosti. Dalším materiálem s odlišujícím se průběhem je PSV, který si zachová průměr svarové čočky do určité míry konstantní po 150 svarech, stejně jako síla ze zkoušky smykem (Obrázek 48). Tento trend by se dal vysvětlit na Obrázku 46, kde se po 150 svarech u tohoto materiálu méně mění kontaktní plocha. U ostatních materiálů s žárovým zinkem ale není tento trend znatelný, respektive nenastává stagnace kontaktní plochy. Veškeré naměřené hodnoty jsou v Příloze 3.

Měření pomocí UTZ Phased array

Výsledky stanovení průměrů svarových čoček určených z ultrazvuku se neshodují s výsledky z měření posuvným měřítkem. Lze to dát za vinu zvýšené tvorbě nesymetrických svarů. V případě ručního měření je čočka změřena ve dvou na sebe kolmých směrech a tyto hodnoty zprůměrovány. V případě měření ultrazvukem se software snaží napasovat vepsaný

kruh do oblasti, kterou určil jako průchozí pro UT svazky (zelená barva na Obrázku 50). Proto získáváme v některých případech nevyhovující svary již od 25 svarů (Tabulka 10). Lze tedy tvrdit, že při daném nastavení přístroje, kalibraci nebo nastavení software je měření UTZ neprůkazné. Poznatky v praxi toto potvrzují, vyšetřování svarových bodů s phased array bývá náročné na interpretaci a klade značné nároky na operátora. Tato metoda se při výrobě automobilů používá ve větší míře pro inspekci lepených spojů.

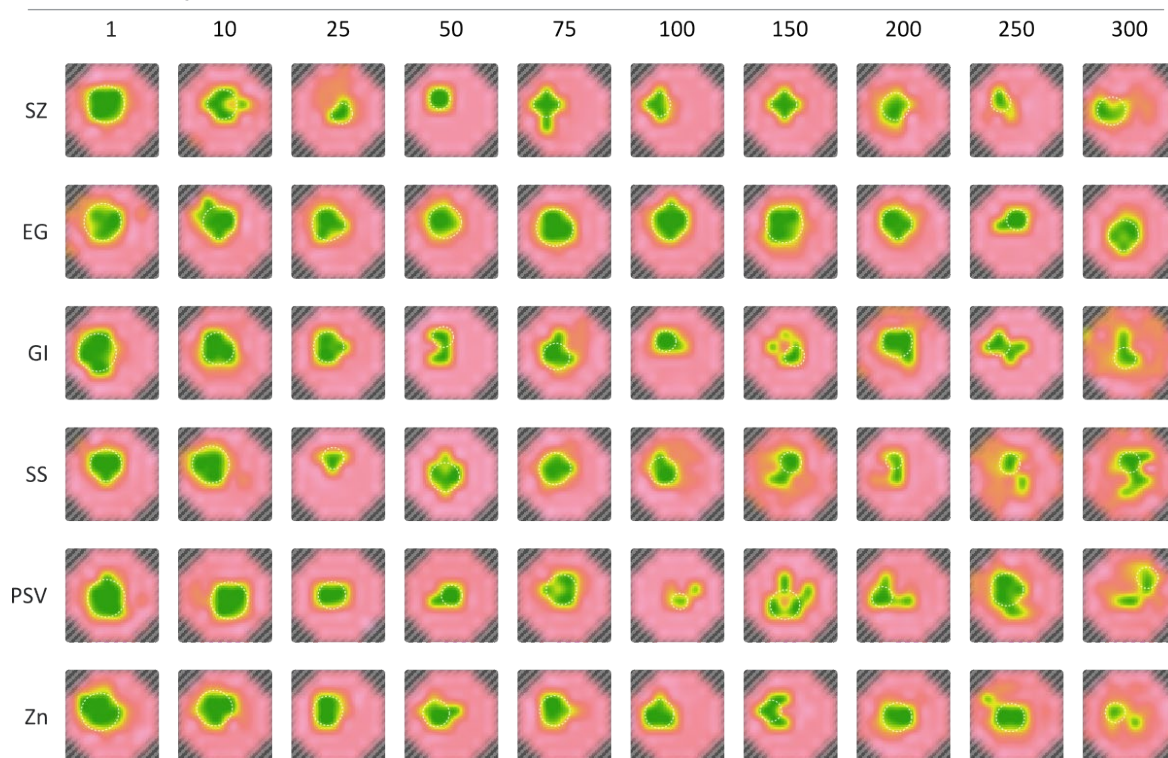
Tabulka 10: Naměřené průměry svarových čoch ultrazvukem metodou phased array.
Nevyhovující průměry označeny červeně

Materiál	Opotřebení									
	1	10	25	50	75	100	150	200	250	300
SZ	3,94	3,17	2,24	2,18	2,68	2,54	2,68	2,93	2,12	3,01
EG	3,95	3,43	3,43	3,43	3,91	3,8	3,95	3,25	2,18	3,22
GI	4,04	3,39	3,25	2,21	2,85	2,18	2,12	3,16	2,29	2,29
SS	3,4	3,95	2,3	3,08	3,4	2,93	2,18	1,73	2,21	2,18
PSV	4,04	3,94	2,93	2,18	3,25	1,7	3,18	2,24	3,49	2,3
Zn	4,04	3,79	3,16	2,85	3,25	3,08	2,3	3,09	3	2,14

Podrobnosti

Uživatel Guest Poznámky Trasa
Přístroj 7134 Číslo dílu A ATP
Měřeno 2023-04-28 07:54:47 Díl

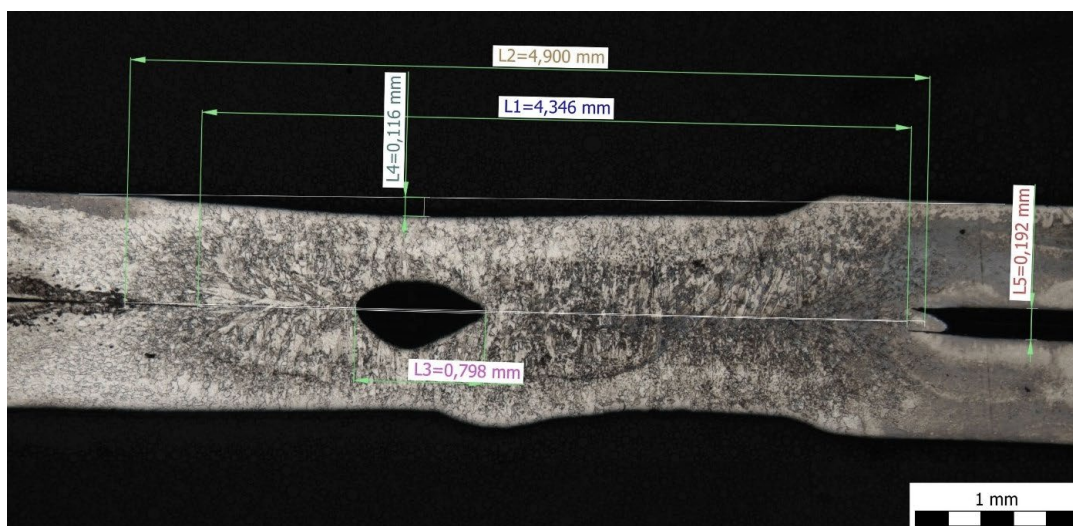
Měřené body



Obrázek 50: Protokol naměřených C-scanů bodových svarů.

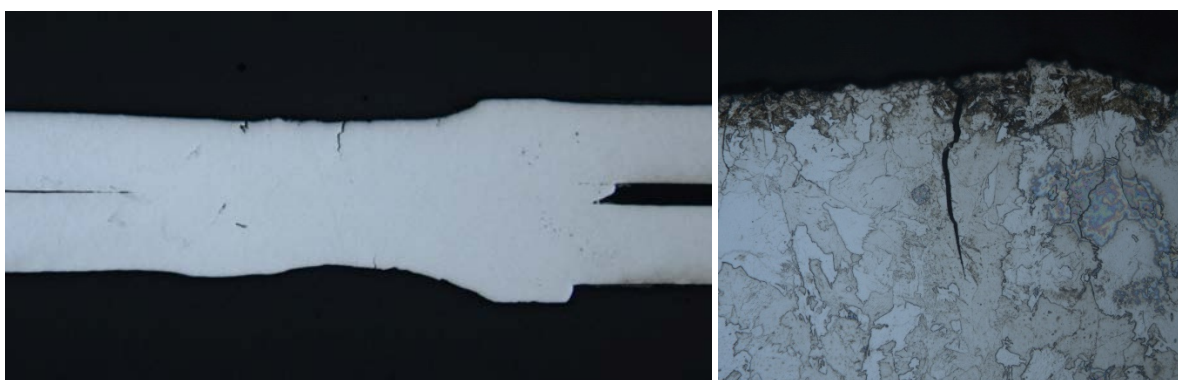
10.6 Vyhodnocení metalografie

Stejné vzorky, na kterých byly změřeny průměry ultrazvukem, byly dále připraveny pro metalografii. Nejčastější zjištěnou vadou byly dutiny (P2011) a nadměrné vtisky (P500), jeden studený spoj (P400) a jedna trhlina (P14002). Označení vad dle ČSN EN ISO 6520-2. Pro určení nevyhovujících vtisků by musela být předepsána kvalita povrchu například jako VW 01105-1 předepisuje OG1-OG4.



Obrázek 51: Metalografický výbrus vzorku PSV 300 - dutina, nadměrný vtisk, mezera mezi plechy.

Vzorky SZ vykazují dutiny u 50. a 75. svaru, nadměrné vtisky nebo převýšení jsou od 200. svaru dále. Na vzorcích ZN byla nalezena malá dutina u 50. svaru. U materiálu EG nebyly nalezeny žádné vady a je vidět, že svary si zachovávají symetrickou svarovou čoučku konstantní velikosti. Vzorky GI vykazují dutiny u svarů 75, 100 a 150, od 250. svaru dále mají značně nesymetrický tvar s převýšením či nadměrným vtiskem. Vzorky SS mají dutiny u 10, 100 a 200 svaru, u svaru 300 byla nalezena trhlina. U materiálu PSV se vyskytují dutiny od 150 svaru dále, svar 200 byl označen jako studený spoj. Veškeré metalografické výbrusy jsou v Příloze 4.



Obrázek 52: Metalografický výbrus vzorku SS 250 – trhlina.

11. ZÁVĚR

V této práci je zpracován návrh způsobu monitorování a kvantifikace opotřebení svařovacích elektrod zaměřený na sledování topografických změn. Sledování a kvantifikaci opotřebení lze využít pro pochopení degradačních dějů, které mají přímý vliv na kvalitu svarového spoje. Využití také nachází v aplikacích, kdy chceme využít životnost čepiček do maximálních mezí z ekonomických důvodů.

Navržený postup se skládá z naskenování nové a opotřebované elektrody na optickém profilometru Redlux, přípravy a zpracování dat a vyhodnocení vybraných parametrů topografie v sw GOM Inspect a Matlab. Po odladění je možné tento postup částečně zautomatizovat od naskenování elektrod přes zpracování dat až po vyhodnocení parametrů topografie v grafech. Citlivost metody je dostatečná pro rozlišení různých průběhů opotřebení, které byly sledovány na šesti sadách vzorků odlišných materiálů a povrchových úprav.

Pro popis a kvantifikaci opotřebení byly definovány tři parametry topografie.

1. Parametr objemových změn kvantifikuje degradační procesy a popisuje, který z mechanismů v danou chvíli převládá. Při svařování plechů s žárovým zinkem vykazují měděné elektrody jiný trend objemových změn než při svařování materiálů s elektrolytickým zinkem. Změny v topografii mají také dopad na tvar vtisku (Příloha 4).
2. Parametr axiální změny délky je vybrán pro své méně náročné měření s možností jeho online monitorování. Rozsah axiálních změn délky elektrody 0÷200 μm je při svařování materiálů s HDG v očekávaných hodnotách ve srovnání s jinými pracemi. U EG je axiální opotřebení elektrody značně menší.
3. Parametr změny kontaktní plochy má u svařování bez řízení elektrického proudu (v praxi se však nevyužívá) značný vliv na proudovou hustotu a tím i na tvorbu svarové čočky. Změna kontaktní plochy dosahovala u některých vzorků až +42 %. U vzorků označených EG a PSV lze po 150. svaru souběžně sledovat trendy kdy je menší nárůst kontaktních ploch, menší pokles velikosti svarové čočky a menší pokles max síly ze stříhové zk. se vzrůstajícím opotřebováním.

Potenciál navržené metody leží ve zkoumání degradačních dějů elektrod nejen u nových povlaků, který by bylo vhodné spojit s dalšími analýzami, jako je například SEM/EDS nebo měření přechodového odporu. Výzvou pro tuto metodu může být také její integrace přímo do svařovacího zařízení a propojení s řídicím systémem pro ofrézování svařovacích čepiček.

Bibliografie

- [1] ZHANG, Hongyan a Jacek SENKARA. *Resistance Welding: Fundamentals and Applications. 2nd ed.* Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4665-5641.
- [2] KIMCHI, Menachem a David PHILLIPS. *Resistance Spot Welding, Fundamentals and Applications for the Automotive Industry.* Springer Nature Switzerland, 2018. ISBN 978-3-031-79575-6.
- [3] CALLISTER, William. *Materials science and engineering: An introduction.* 10th edition. New York: John Wiley & Sons, 2018. ISBN 978-1119472070.
- [4] NEUMANN, Heinz. *Teorie svařování a pájení.* Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-807-4941-719.
- [5] *Resistance welding manual.* Revised 4th. ed. Philadelphia: Resistance Welder Manufacturers' Association (RWMA), 2003. ISBN 0-9624382-0-0.
- [6] KOLAŘÍKOVÁ, Marie. *Svařování vysokopevných manganborových ocelí elektrickým odporem a vliv povrchových úprav na jejich svařitelnost.* Praha, 2019. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [7] HAMED, M. a M. ATASHPARVA. A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding. *Welding in the World.* 2017, 61(2), 269-290. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/s40194-016-0419-4
- [8] *Recommended Practices for Resistance Welding: American National Standard AWS C1.1M/C1.1:2012.* 5th Edition. American Welding Society. ISBN 978-0-87171-803-7.
- [9] BATISTA, Márcio, Valdir FURLANETTO a Sérgio DUARTE BRANDI. Analysis of the Behavior of Dynamic Resistance, Electrical Energy and Force between the Electrodes in Resistance Spot Welding Using Additive Manufacturing. *Metals.* 2020, 10(5). ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met10050690
- [10] ČSN EN ISO 8166: *Odporové svařování - Způsob hodnocení životnosti bodových svařovacích elektrod při konstantním nastavení stroje.* Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [11] GROßMANN, Christoph. *Nutzung vorhandener Standmengenpotentiale, Verschleißverringern durch angepasste Elektrodenwerkstoffe und Elektrodenverschleißdiagnose beim Widerstandspunktschweißen.* Drážďany, 2018. Doctoral thesis. Technische Universität Dresden.
- [12] Resistance Welding: Parameters in resistance welding. In: *SWANTEC Software and Engineering* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.swantec.com/technology/resistance-welding/>

- [13] *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines*. Version 6.0. WorldAutoSteel, 2017. Dostupné také z: <https://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>
- [14] ČSN EN ISO 5182: *Odporové svařování - Materiály pro elektrody a pomocné vybavení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [15] ČSN EN ISO 5821: *Odporové svařování - Elektrodotové čepičky pro bodové odporové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [16] ČSN EN ISO 6520-2: *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 2: Tlakové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [17] HU, X., G. ZOU, S. DONG, M. LEE, J. JUNG a Y. ZHOU. Effects of Steel Coatings on Electrode Life in Resistance Spot Welding of Galvannealed Steel Sheets. *MATERIALS TRANSACTIONS*. 2010, 51(12), 2236-2242. ISSN 1345-9678. Dostupné z: doi:10.2320/matertrans.M2010239
- [18] MATSUDA, H, Y MATSUDA a M KABASAWA. Study of electrode wear mechanism in consecutive spot welding: Spot weldability of Zn-Ni electrogalvanised steel sheet and organic-silicate composite steel sheet (1st Report). *Welding International*. 1997, 11(11), 860-867. ISSN 0950-7116. Dostupné z: doi:10.1080/09507119709447336
- [19] MATHISZIK, Christian, David KÖBERLIN, Stefan HEILMANN, Jörg ZSCHETZSCHE a Uwe FÜSSEL. General Approach for Inline Electrode Wear Monitoring at Resistance Spot Welding. *Processes* [online]. 2021, 9(4) [cit. 2022-12-02]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/pr9040685
- [20] CHANG, H., Y. CHO, S. CHOI a H. CHO. A Proportional-Integral Controller for Resistance Spot Welding Using Nugget Expansion. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 1989, 111(2), 332-336. ISSN 0022-0434. Dostupné z: doi:10.1115/1.3153055
- [21] KOLAŘÍKOVÁ, Marie a KOLAŘÍK LADISLAV. The influence of resistance spot welding on weld joint quality and service life of elektrodas. *Conference METAL 2013 Proceedings*. Brno. ISBN 978-80-87294-41-3.
- [22] SCHMIDOVÁ, Eva, Bohumil CULEK a Petr HANUS. Dynamic Fracture Behavior of the Martensitic High Strength Steel after Spot Welding. *Materials Today: Proceedings*. 2016, 3(4). ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2016.03.014
- [23] ČSN EN ISO 14273: *Odporové svařování - Destruktivní zkoušky svarů - Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů*. 2003. Praha: Český normalizační institut.

- [24] ZHANG, X. Q., G. L. CHEN a Y. S. ZHANG. On-line evaluation of electrode wear by servo gun in resistance spot welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008, 36(7-8), 681-688. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-006-0885-8
- [25] PANZA, Luigi, Manuela De MADDIS a Pasquale Russo SPENA. Use of electrode displacement signals for electrode degradation assessment in resistance spot welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, 76, 93-105. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2022.01.060
- [26] VOGT, G. Inline-Process and Quality Control of Spotwelds of Car Bodies - Ultrasonic Sensors integrated in Resistance Welding Electrodes. *E-Journal of Nondestructive Testing Vol. 13(11) 17th World Conference on Nondestructive Testing*. Shanghai, China, 2008.
- [27] CHERTOV, A, A KARLOFF, W PEREZ, A LUI a R GR MAEV. In-process ultrasound NDE of resistance spot welds. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2012, 54(5), 257-261. ISSN 13542575. Dostupné z: doi:10.1784/insi.2012.54.5.257
- [28] *SmartDress: Adaptive electrode tip dressing technology* [online]. In: . [cit. 2023-06-22]. Dostupné z: <http://smartdress-project.eu/>
- [29] ČSN EN 10130: *Ploché výrobky z hlubokotažných ocelí válcované za studena k tváření za studena - Technické dodací podmínky*. 2007. Praha: Český normalizační institut.
- [30] ČSN EN 10346: *Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky pro tváření za studena - Technické dodací podmínky*. 2016. Praha: Český normalizační institut.
- [31] TUKE, Mike, Andy TAYLOR, Anne ROQUES a Christian MAUL. 3D linear and volumetric wear measurement on artificial hip joints—Validation of a new methodology. *Precision Engineering*. 2010, 34(4), 777-783. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2010.06.001
- [32] RSWA Resistance Spot Weld Analyzer Software Manual. In: *Tessonics Corp.* [online]. 2009 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.tessonics.com/files/rswa/rswa-soft-en-A4.pdf>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Relativní průběh elektrického odporu napříč odporovým bodovým svarem. [2]	14
Obrázek 2: Zjednodušení obvodu na sériově zapojené rezistory. [6]	15
Obrázek 3: Závislost Měrného elektrického odporu na teplotě pro Fe, Mg, Al, Cu [1]	16
Obrázek 4: Omezený průchod proudu přechodovým odporem. [7]	16
Obrázek 5: Závislost kontaktního odporu na síle. Přeloženo z [2].	17
Obrázek 6: Experimentální uspořádání pro měření odporu čtyřvodičovou metodou. Přeloženo z [7].	18
Obrázek 7: Typická křivka dynamického odporu pro uhlíkovou ocel. Přeloženo z [9]	19
Obrázek 8: Průběhy svařovacího proudu dle různých zdrojů. AC, DC, MFDC, kondenzátorový [12] ...	23
Obrázek 9: Tvary svařovacích elektrod dle normy ČSN EN ISO 5821 [15]	26
Obrázek 10: Diagram faktorů ovlivňujících životnost elektrod [4].....	27
Obrázek 11: Řez čelních ploch elektrod – chemické složení po 1500 svarech. (a) GA-2 (Al: 0,78 hm. %.); (b) GA-6 (Al: 0,23 hm. %); (c) HDG-6 (Al: 0,22 hm. %). [11]	29
Obrázek 12: Metalografický výbrus elektrodové čepičky s viditelně orientovanou strukturou po 1200 bodových svarech. [19]	30
Obrázek 13: Typické způsoby deformačního opotřebení elektrody: (a) mushrooming v důsledku radiálního toku materiálu a (b) plateau forming v důsledku axiálního toku materiálu.	31
Obrázek 14: Vliv teploty žíhání na pevnost v tahu a tažnost mosazné slitiny (ilustrativní příklad). [3]	32
Obrázek 15: Strukturní fáze na povrchu opotřebovaných čepiček z materiálu CuCr1Zr po svařování žárově pozinkovaných plechů materiálu HX180BD. [21]	33
Obrázek 16: Model mechanismu opotřebení elektrody při odporovém bodovém svařování Zn-Ni elektrolyticky pozinkovaného ocelového plechu. [18]	34
Obrázek 17: Vzorek pro zkoušku stříhem [23]	36
Obrázek 18: Postup měření axiálního opotřebení pomocí servo kleští. (vlevo) Změna kontaktního průměru elektrody z důvodu axiálního opotřebení. (vpravo) [24]	38
Obrázek 19: Inline měření topologie konfokálním mikroskopem. (vlevo) Geometrické parametry opotřebení elektrodové čepičky. (vpravo) [19].....	39
Obrázek 20: Změny délky elektrody dvou různých materiálů (vlevo). Zvětšování kontaktní plochy elektrod v důsledku mechanismu mushrooming (vpravo) pro test set (TS) 01 a 02. [19].....	40
Obrázek 21: Různé křivky posunu elektrod s přidruženými otisky elektrod. (vlevo) Porovnání výsledků neuronové sítě pro predikci kontaktní plochy elektrody. (vpravo) [25]	40
Obrázek 22: Vogt SPOTline – ultrazvukové sondy integrované do svařovacích kleští. [26]	41
Obrázek 23: Schématické uspořádání systému RIWA. [27]	42
Obrázek 24: Ultrazvukový M-scan během odporového bodového svařování a srovnání s ideální geometrií bodového svaru [27].....	42

Obrázek 25: Optický senzor pro měření některých parametrů opotřebení elektrodových čepiček SmartDress [28].....	43
Obrázek 26: Svařovací lis DALEX PMS 11-4.	48
Obrázek 27: Geometrie elektrodové čepičky 39 D 1978-2.	48
Obrázek 28: Měření opotřebované čepičky na optickém profilometru Redlux	49
Obrázek 29: Schéma uspořádání os na optickém profilometru Redlux [31]	50
Obrázek 30: Princip měření konfokálním chromatickým snímačem [31].....	50
Obrázek 31: Point cloud naměřených dat z optického profilometru Redlux. Čepička PSV_pred_250 bez opotřebení (a). Čepička PSV_po_250 po 250 svařených bodech (b) Detail středu čepičky (c)	51
Obrázek 32: Postup získání deviací dvou ploch v sw GOM Inspect. Importovaný point cloud. (a) Polygonová síť (mesh). (b) Čepičky před a po svařování napasované na sebe. (c) Porovnání ploch – deviace. (d).....	52
Obrázek 33: Postup zpracování dat v software Matlab. Surová Importovaná dat deviací. (a) Vystředěné a ořezané hodnoty. (b) Interpolované hodnoty do uniformní sítě. (c) Suma záporných, respektive kladných deviací. (d).....	54
Obrázek 34: Snímky opotřebovaných čepiček. Těsně před prvním ofrézováním (vlevo). Po ofrézování (uprostřed). Opotřebovaná po posledním ofrézování (vpravo).	55
Obrázek 35: Znázornění metod best fit v GOM Inspect. Chebyshev best fit uvnitř (a), uprostřed (b), vnější. (c); Gaussova best fit vnější. (d)	55
Obrázek 36: Měření změny axiální délky elektrody v GOM Inspect. Modrá – bez opotřebení, šedá – opotřebovaná.....	56
Obrázek 37: Měření kontaktní plochy po 150 svarech.	56
Obrázek 38: Univerzální zkušební trhací stroj ZWICK Z250 ve Škoda Auto a.s.	57
Obrázek 39: Graf průběhu smykové zkoušky materiálu SZ – vzorky s maximální F pro dané opotřebení elektrod.	58
Obrázek 40: Ultrazvukový přístroj Tessonics RSWA F2 [32]	59
Obrázek 41: Metalografická pila Buehler AbrasiMet (vlevo) a bruska Buehler Alpha (vpravo) ve Škoda Auto a.s.	60
Obrázek 42: Poloautomatická leštička Struers LaboPol-30 (vlevo) a metalografický mikroskop Olympus GX71 s digitální kamerou (vpravo) ve Škoda Auto a.s.....	61
Obrázek 43: Vývoj parametrů objemových úbytků a přírůstků v závislosti na opotřebení elektrod pro materiál HX180 BD + Z100 + SZ.	64
Obrázek 44: Vývoj parametrů objemových úbytků a přírůstků v závislosti na opotřebení elektrod pro materiál DC05 + ZE50/50.	64
Obrázek 45: Snímek čepičky svařovací elektrody nepoužité (nahore) a po 300 svarech (dole).....	65

Obrázek 46: Vývoj kontaktní plochy elektrody s počtem svarů. Body proloženy polynomem 2. stupně.	65
Obrázek 47: Vývoj axiálního opotřebení elektrod s počtem svarů.	66
Obrázek 48: Průměrné hodnoty síly při přetržení ze zkoušky stříhem.	67
Obrázek 49: Průměry svarových bodů změřené ručně (aritmetické průměry).	68
Obrázek 50: Protokol naměřených C-scanů bodových svarů.	69
Obrázek 51: Metalograficky výbrus vzorku PSV 300 - dutina, nadměrný vtisk, mezera mezi plechy...	70
Obrázek 52: Metalograficky výbrus vzorku SS 250 – trhlina.	70

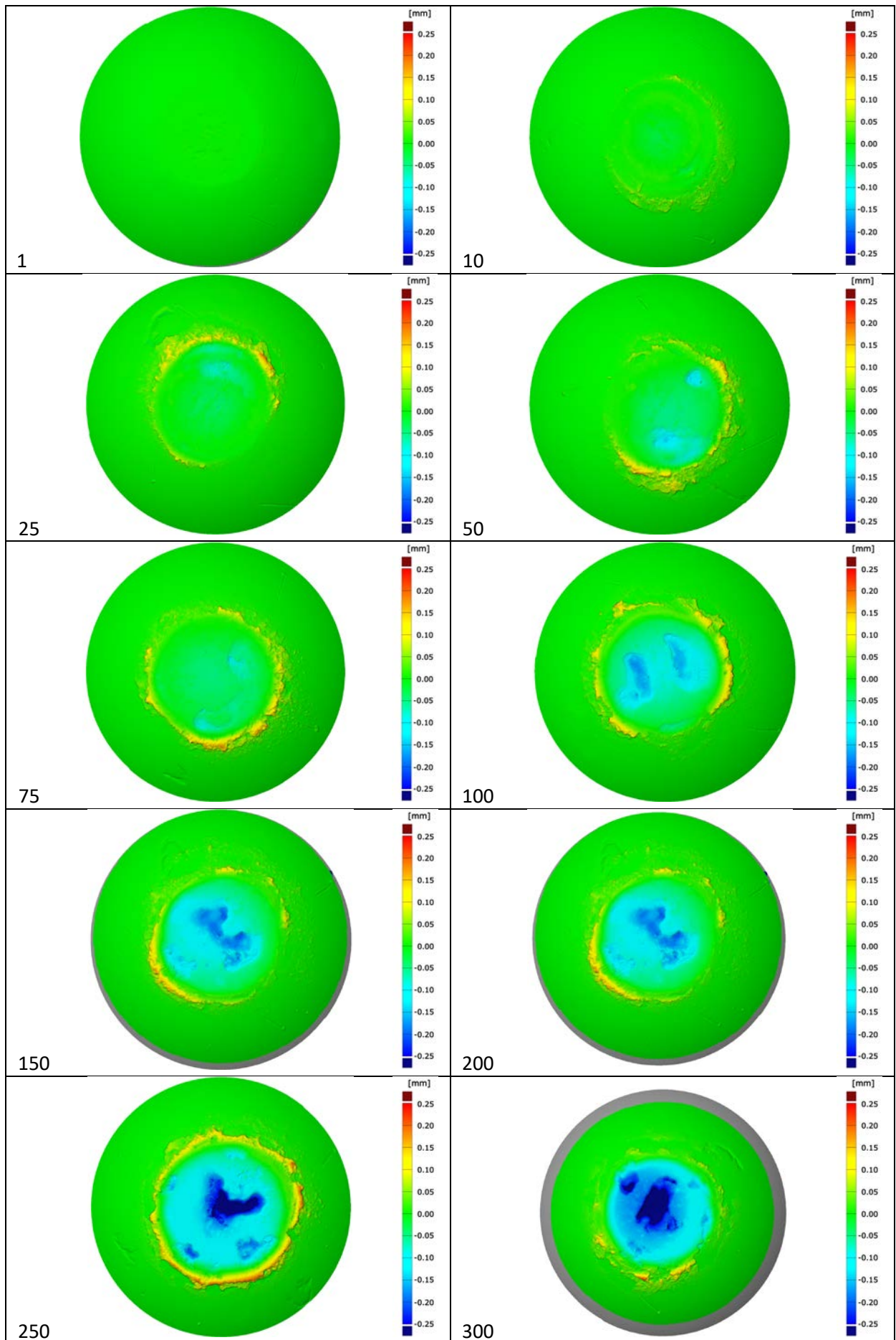
Seznam tabulek

Tabulka 1: Měrný elektrický odpor vybraných materiálů [3].....	13
Tabulka 2: Charakteristiky různých fází Fe-Zn [17]	33
Tabulka 3: Rozměry vzorku pro zkoušku stříhem užitá v experimentu [23].....	36
Tabulka 4: Chemické složení materiálů použitých v experimentu. [29] [30]	46
Tabulka 5: Mechanické vlastnosti materiálů použitých v experimentu [29] [30].....	46
Tabulka 6: Štítek stroje Dalex PMS 11-4	47
Tabulka 7: Optimalizované parametry materiálu použité v experimentu.	49
Tabulka 8: Technické údaje trhacího stroje ZWICK Z250.	57
Tabulka 9: Heatmapy topografií elektrod po 1, 100 a 300 svařech, všechny materiály.	63
Tabulka 10: Naměřené průměry svarových čoček ultrazvukem metodou phased array. Nevyhovující průměry označeny červeně.....	69

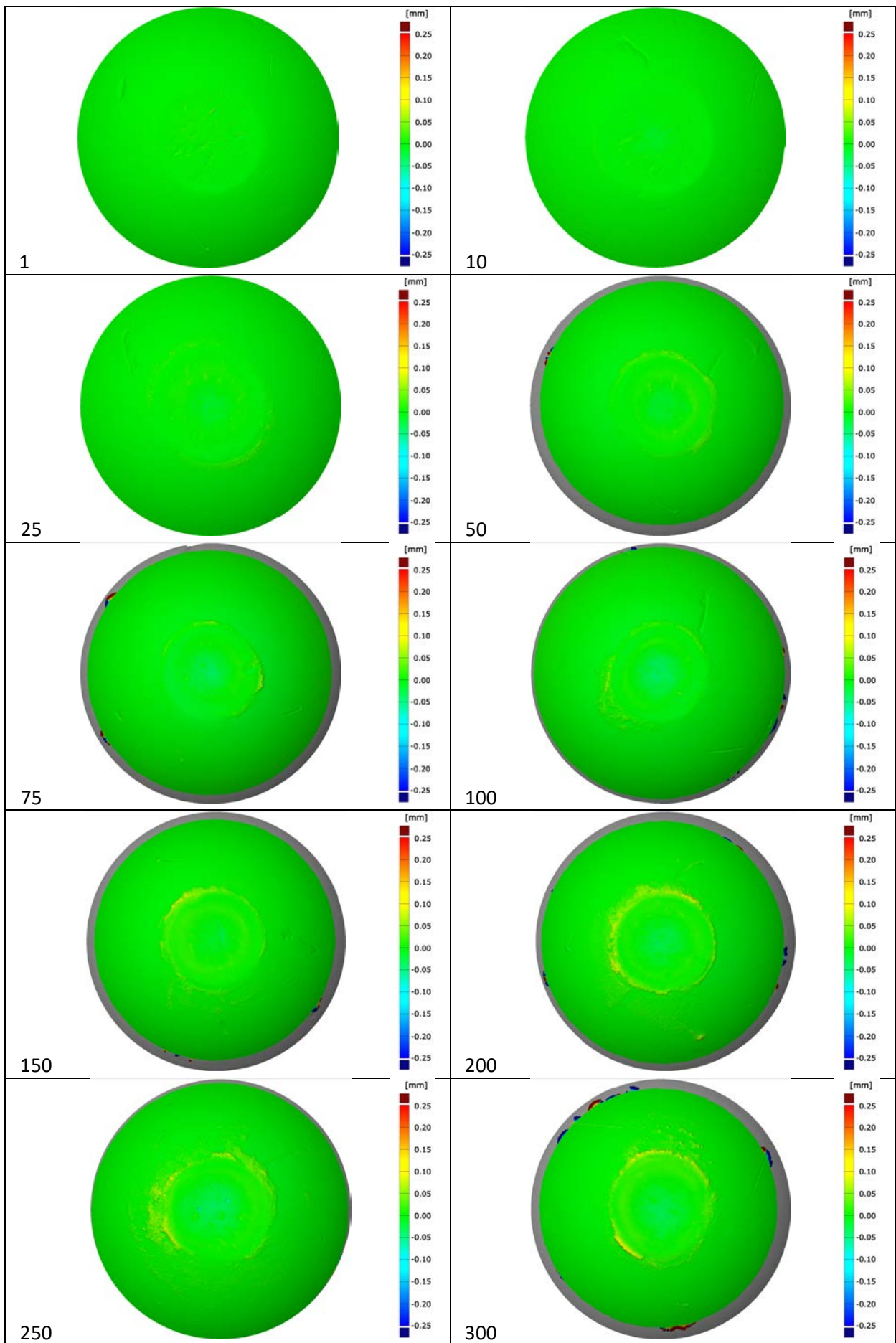
Seznam příloh

Příloha 1: Heatmapy – deviace ploch elektrod před a po opotřebení.....	79
Příloha 2: Průběhy objemových parametrů topografie.	85
Příloha 3: Průměrů svarových čoček po zkoušce stříhem.....	87
Příloha 4: Metalografické výbrusy svarových čoček.	88

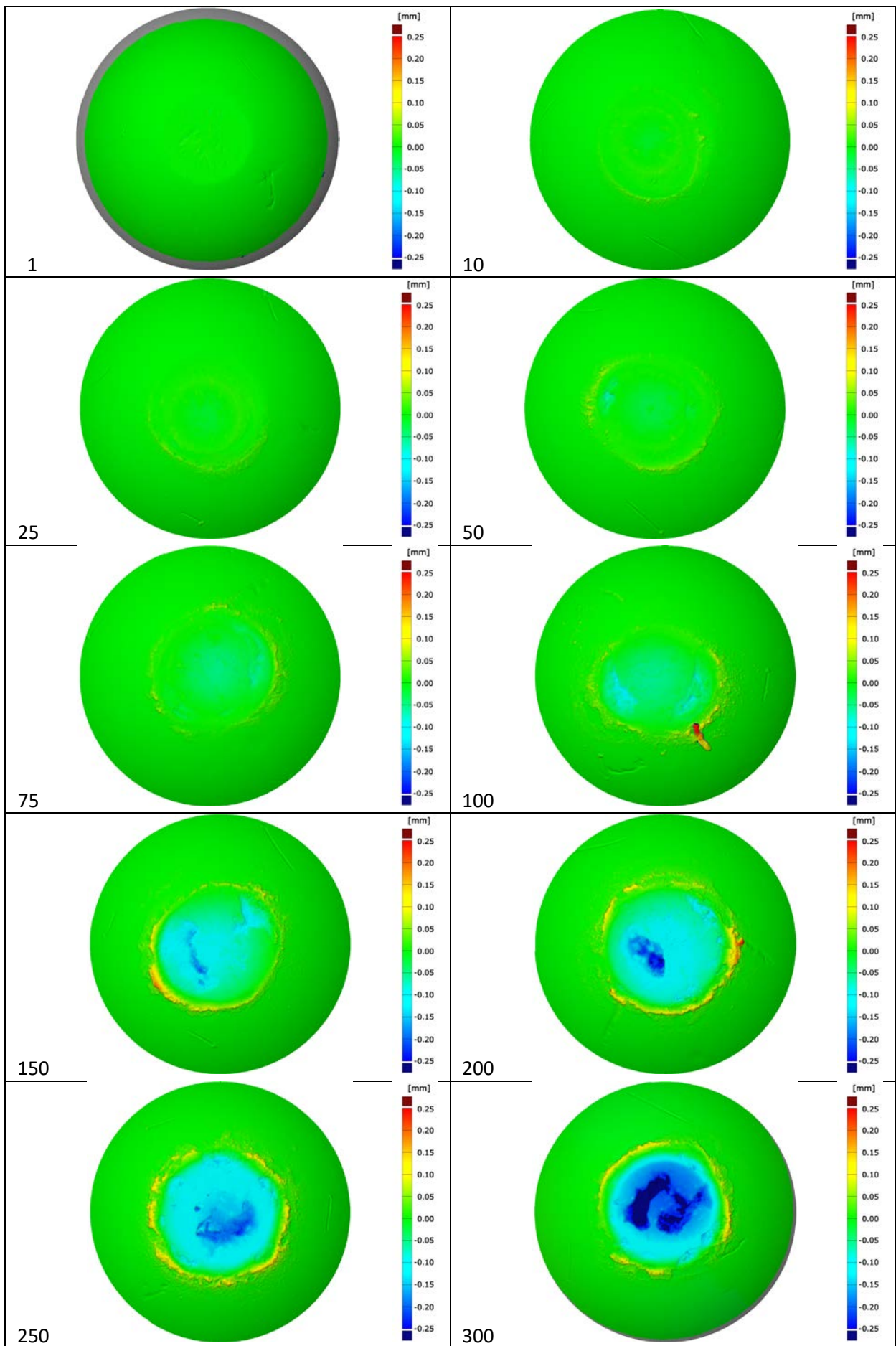
PŘÍLOHA 1



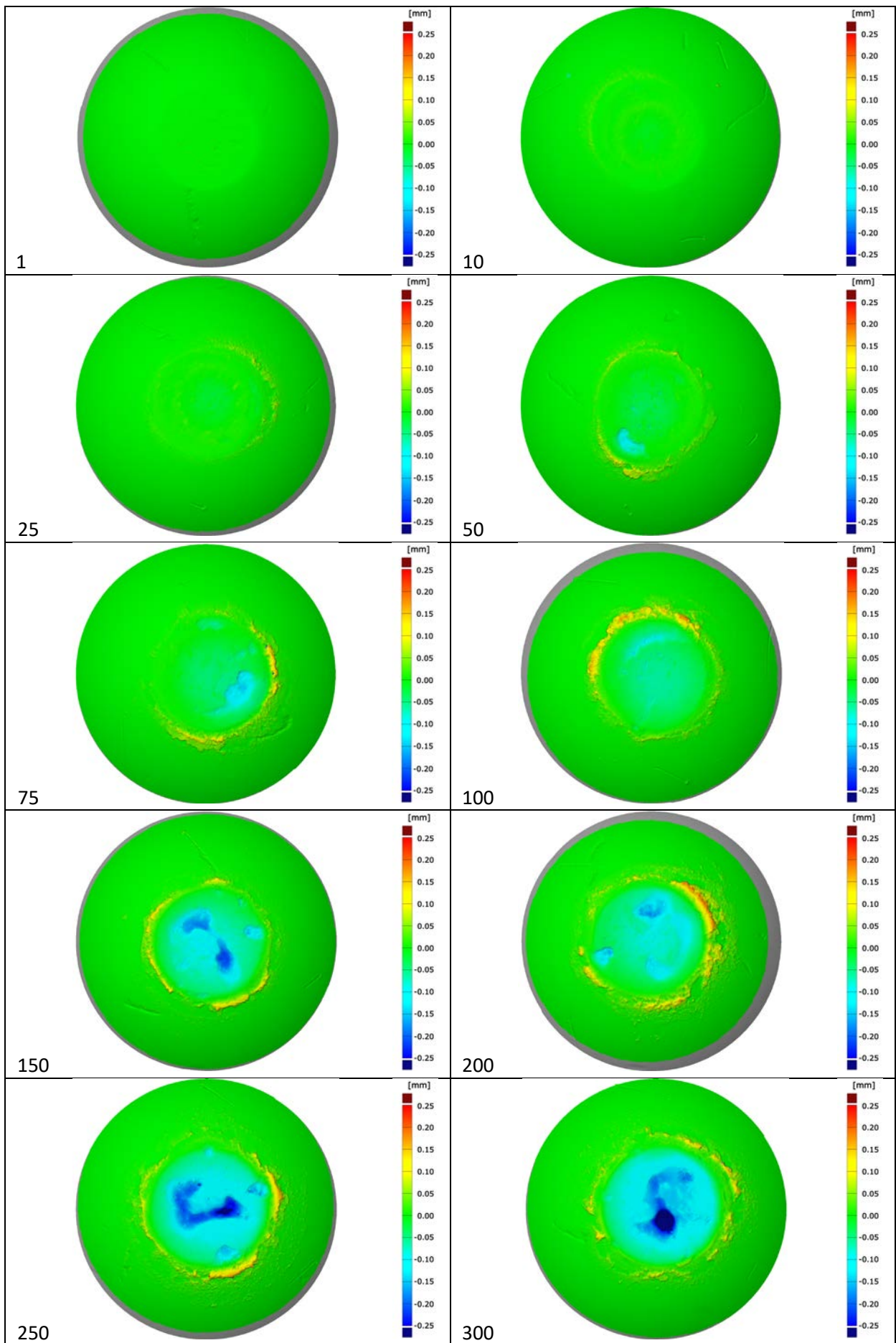
Naskenované čepičky s povrchovou úpravou SZ.



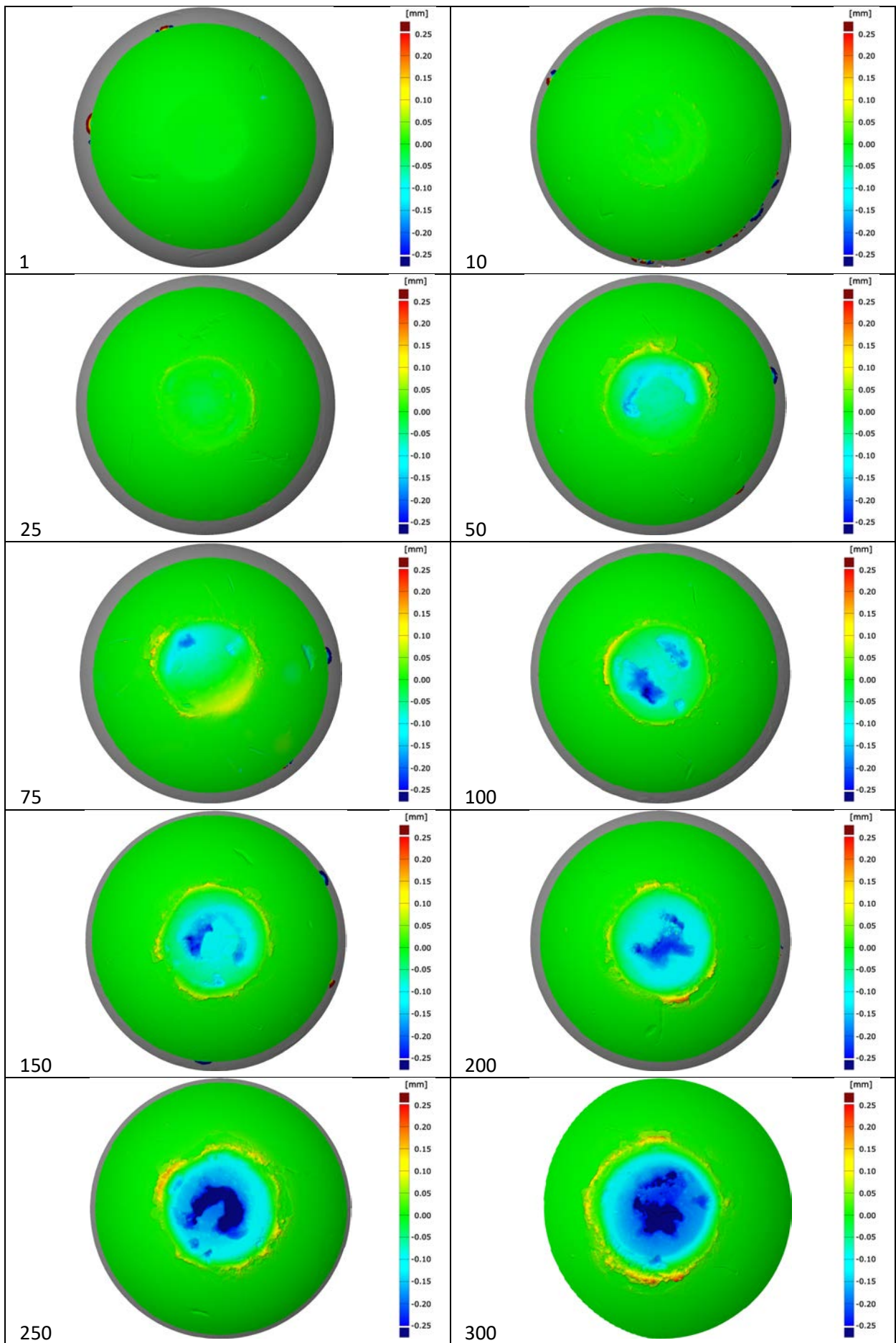
Naskenované čepičky s povrchovou úpravou EG.



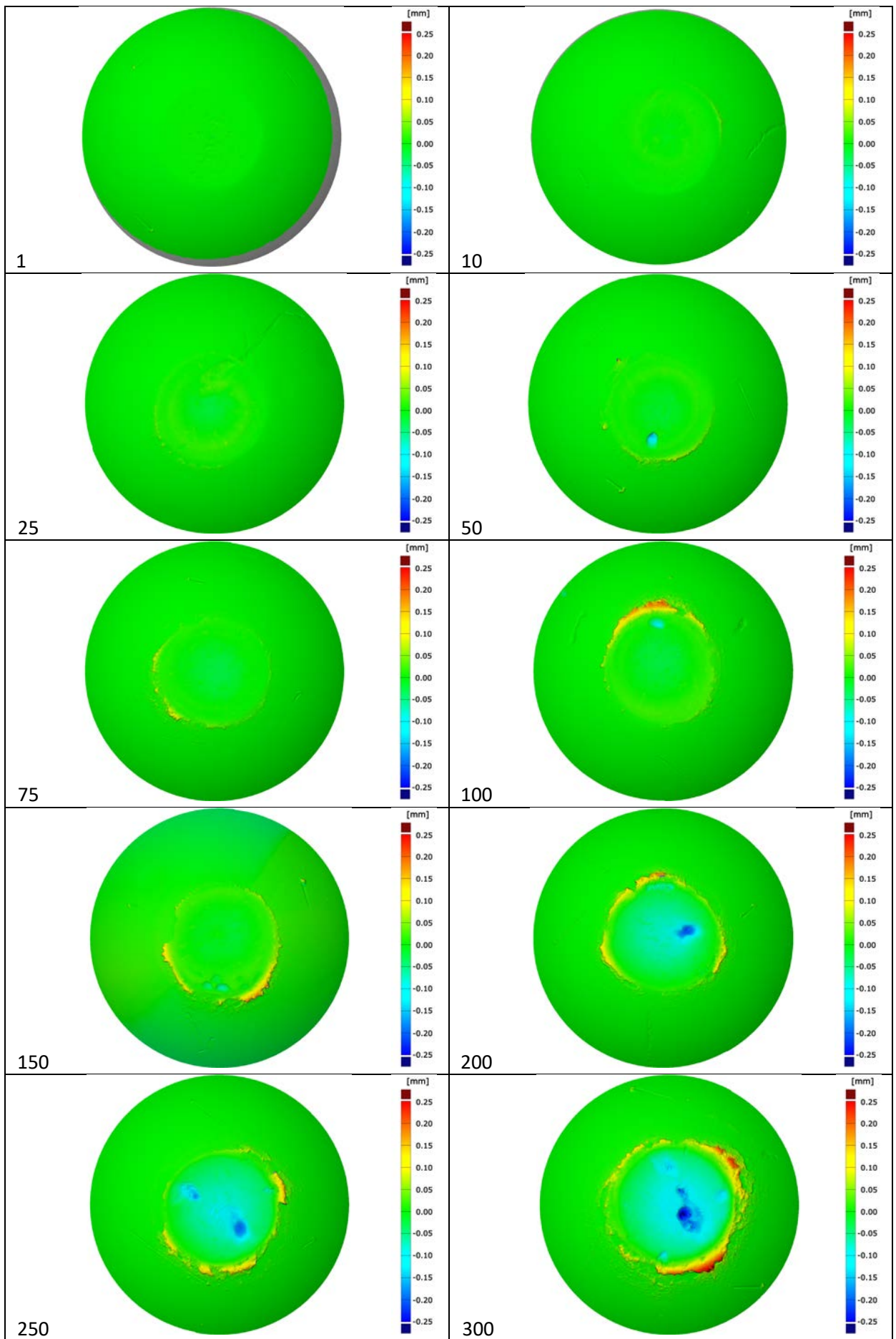
Naskenované čepičky s povrchovou úpravou GI.



Naskenované čepičky s povrchovou úpravou SS.

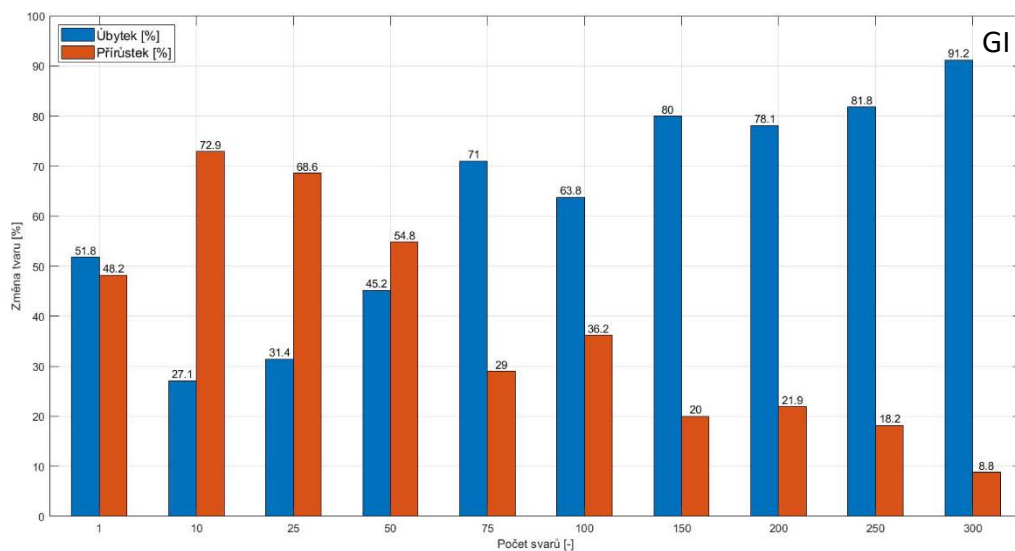
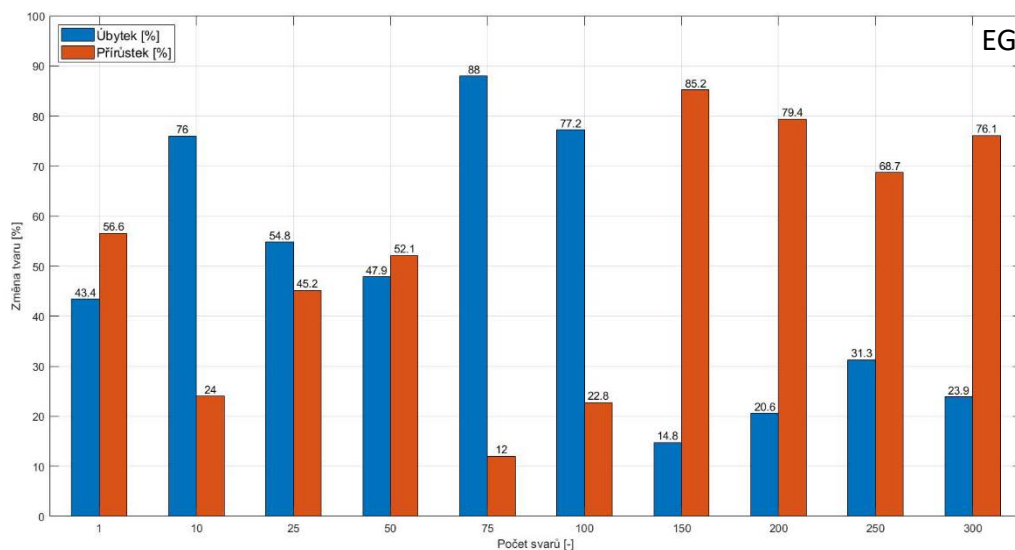
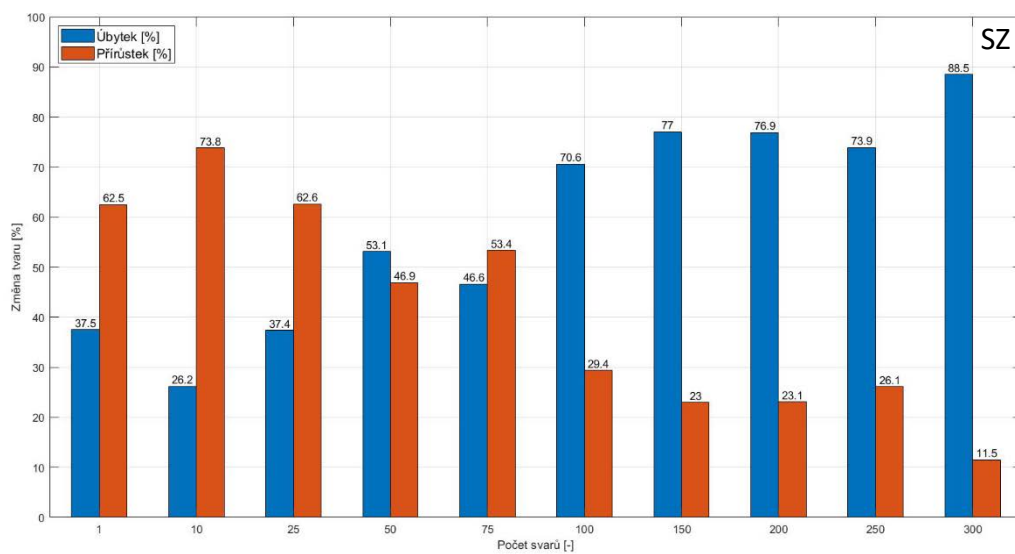


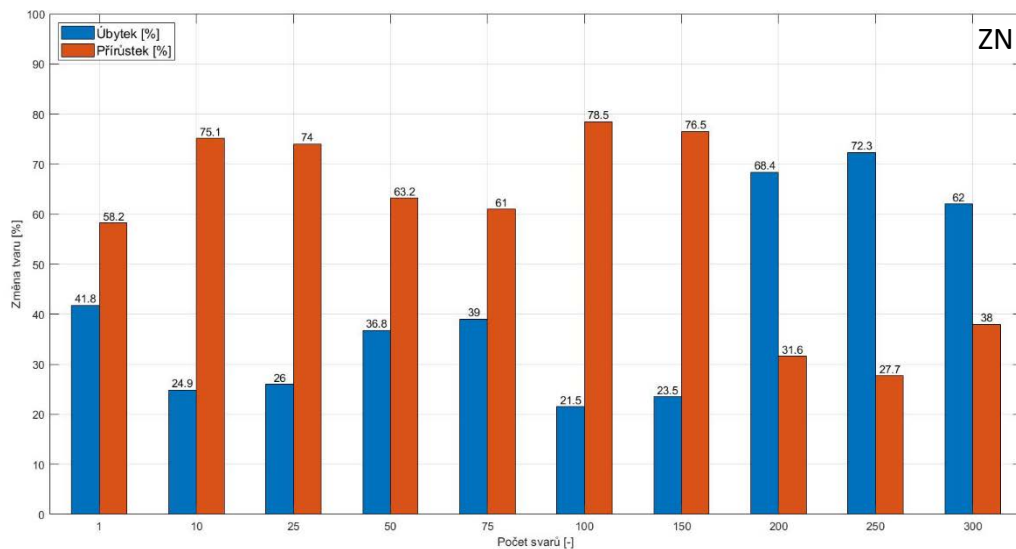
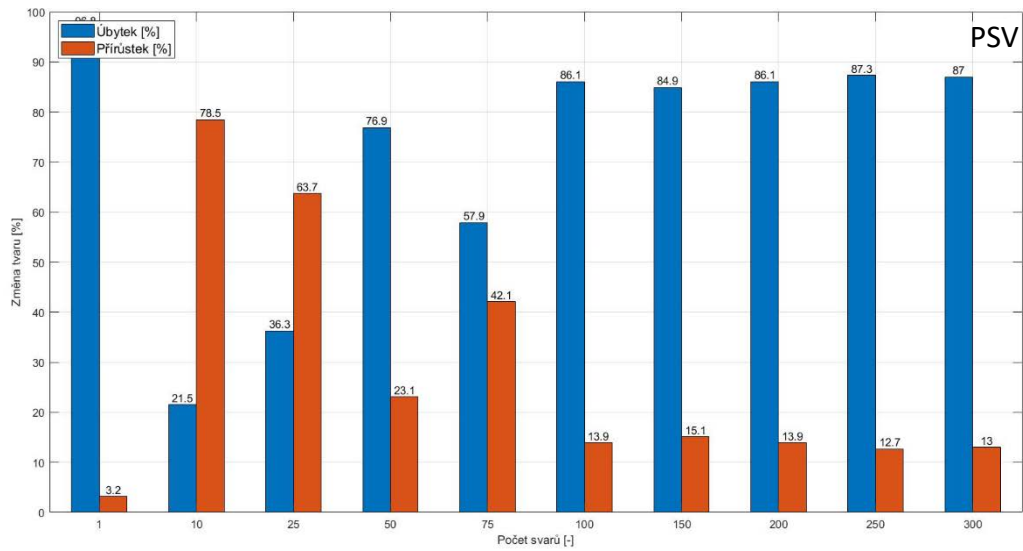
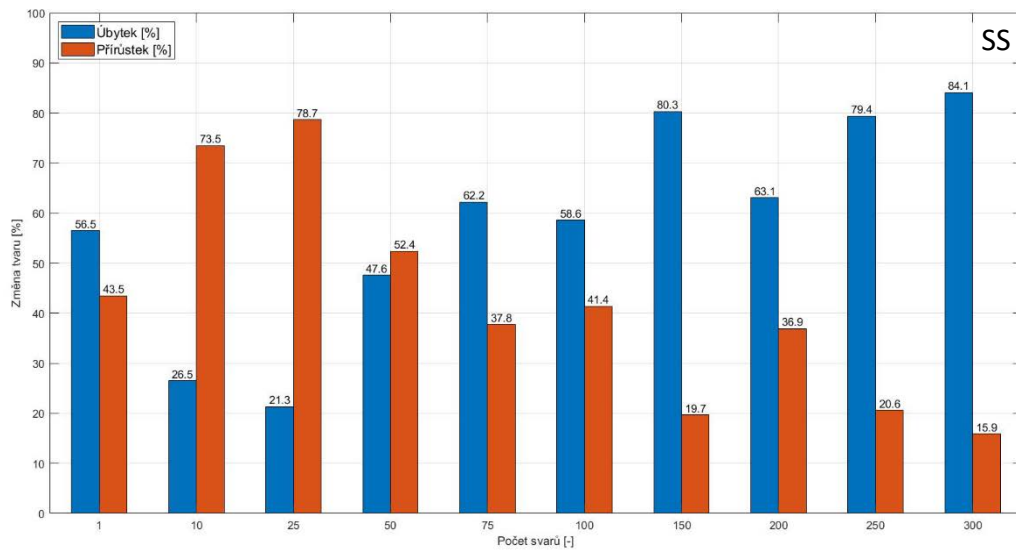
Naskenované čepičky s povrchovou úpravou PSV.



Naskenované čepičky s povrchovou úpravou Zn.

PŘÍLOHA 2





PŘÍLOHA 3

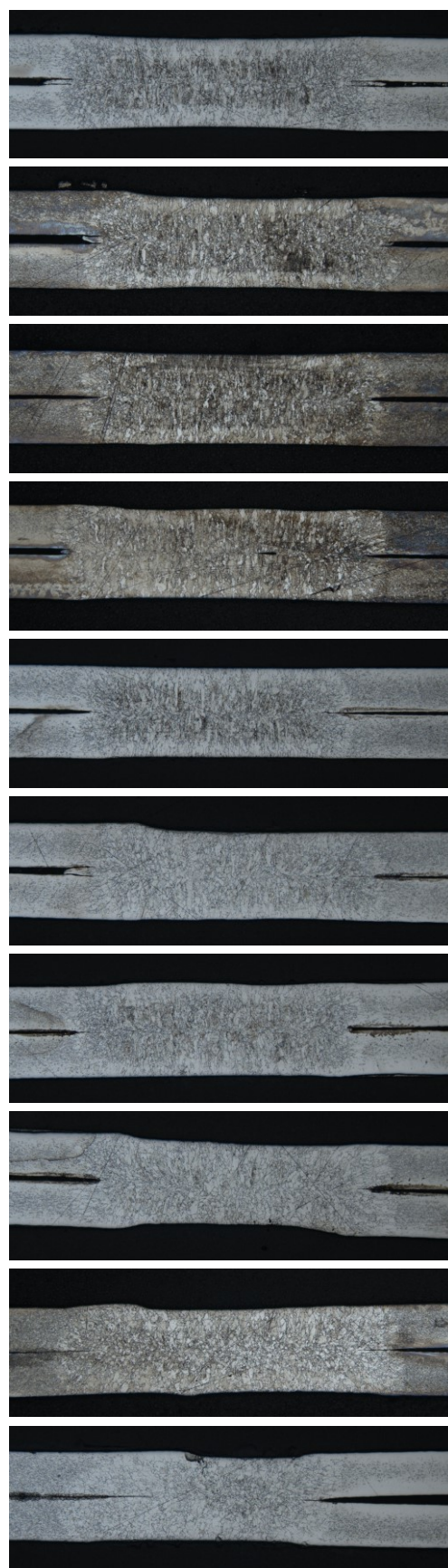
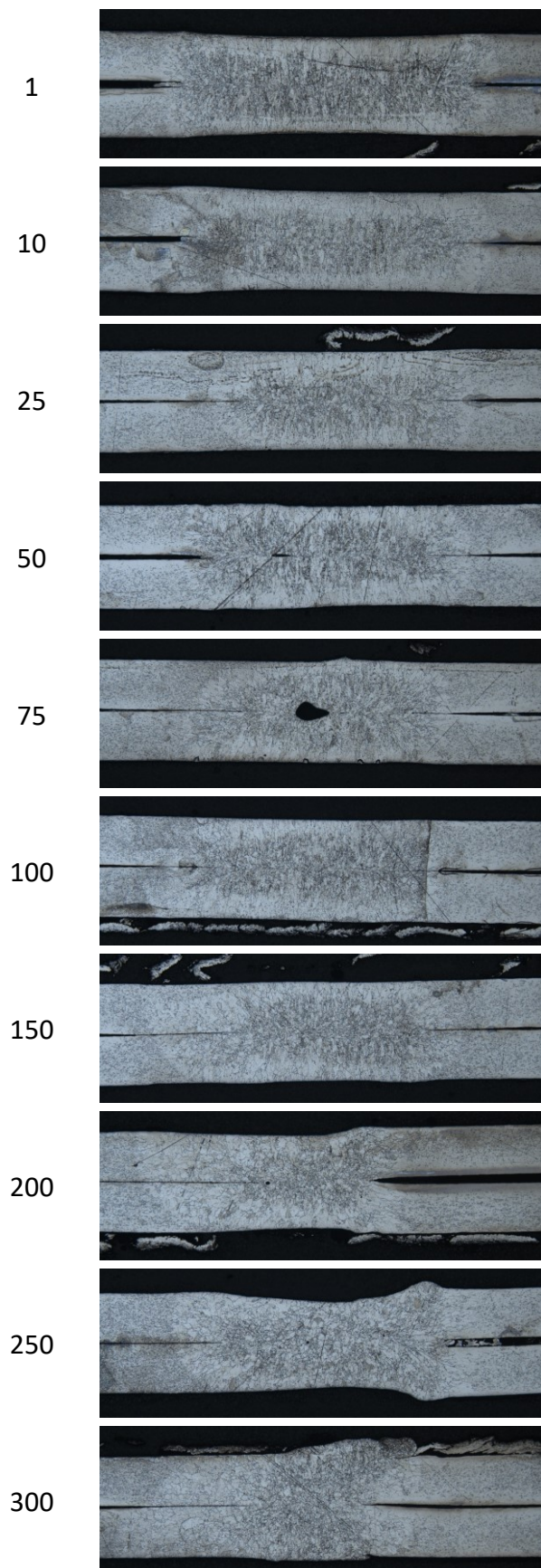
Ruční měření průměrů svarových čoček po zkoušce stříhem

Číslo svaru		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		1	10	25	50	75	100	150	200	250	300
SZ min 2,92831	Op.	SZ_1	SZ_10	SZ_25	SZ_50	SZ_75	SZ_100	SZ_150	SZ_200	SZ_250	SZ_300
	d [mm]	4,80	4,60	4,50	4,20	3,40	3,90	4,70	3,20	4,30	3,00
		4,60	4,50	3,80	4,00	3,70	4,20	4,50	3,00	3,50	2,90
		5,00	4,40	4,70	3,95	4,05	4,15	4,40	4,10	4,10	3,20
		4,70	4,60	4,75	3,60	3,20	4,25	4,25		4,00	2,95
		5,30	4,70	4,25		4,00	4,00	3,60		3,40	3,50
	PRŮMĚR	4,88	4,56	4,40	3,94	3,67	4,10	4,29	3,43	3,86	3,11
SM ODCH	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,1	0,4	0,5	0,3	0,2	
EG min 2,92831	Op.	EG_1	EG_10	EG_25	EG_50	EG_75	EG_100	EG_150	EG_200	EG_250	EG_300
	d [mm]	5,3	5,8	5,6	4,65	5,55	5	5	5,05	4,5	5,25
		5,6	5,7	5,25	5,45	5,35	5,25	5,1	5,1	5,3	3,8
		5,6	5,7	5,6	5,5	5	5	5,3	4,9	5,2	4,6
		5,7	5,4	5,4	5,55	5,5	5,3	5,45	5,3	4,1	5,4
		5,8	5,2	5,1	5,6	5,4	5,2	5,1	5	5,2	5
	PRŮMĚR	5,60	5,56	5,39	5,35	5,36	5,15	5,19	5,07	4,86	4,81
SM ODCH	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1	0,5	0,6	
GI min 2,711088	Op.	GI_1	GI_10	GI_25	GI_50	GI_75	GI_100	GI_150	GI_200	GI_250	GI_300
	d [mm]	4,75	4,8	4	3,7	4,25	4,05	3,85	3,4	3,2	3,9
		4,8	4,6	3,9	3,8	3,8	4,7	3	4,3	3,8	3,74
		4,9	4,75	4,3	3,95	4,3	4,1	2,9	4,2	3,9	3,5
		4,85	4,85	4,25	3,6	4,25	3,9	3,1	3,95	4,1	3,6
		4,75	4,7	4,3	2,8	4,4	4,35	3,4	3,3	4	2,7
	PRŮMĚR	4,81	4,74	4,15	3,57	4,20	4,22	3,25	3,83	3,80	3,49
SM ODCH	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	
SS min 2,92831	Op.	SS_1	SS_10	SS_25	SS_50	SS_75	SS_100	SS_150	SS_200	SS_250	SS_300
	d [mm]	4,45	5,2	4	3,8	3,7	3,95	4	3,3	2,6	3,3
		4,7	3,8	4,25	3,95	3,9	4	3,6	3	3	2,6
		4,8	4,85	4,3	3,9	4	3,9	3,4	3,1	3,6	3,6
		4,75	4,7	4	4,2	4,05	3,75	3,8	3	2,65	2,6
		4,9	4,1	3,8	4	3,65	3,85		3,6	3,9	
	PRŮMĚR	4,72	4,53	4,07	3,97	3,86	3,89	3,70	3,20	3,15	3,03
SM ODCH	0,2	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,5	0,4	
PSV min 2,92831	Op.	PSV_1	PSV_10	PSV_25	PSV_50	PSV_75	PSV_100	PSV_150	PSV_200	PSV_250	PSV_300
	d [mm]	5,3	4,9	3,6	3,8	4,5	4	2,8	4,4	4,1	5
		5,2	4,95	4,4	3,75	4,8	3,9	4,6	4,7	4,35	4,8
		5,1	5	4,35	4,4	4,6	3,8	4,7	4,9	4,4	4,5
		5,3	5,1	4,7	4,1	3,9	3,55	5	4,6	4,6	4,95
		5,25	5,05	4,55	4	5	3,7	4,8	4,2	4,9	2
	PRŮMĚR	5,23	5,00	4,32	4,01	4,56	3,79	4,38	4,56	4,47	4,25
SM ODCH	0,1	0,1	0,4	0,2	0,4	0,2	0,8	0,2	0,3	1,1	
Zn min 2,92831	Op.	Zn_1	Zn_10	Zn_25	Zn_50	Zn_75	Zn_100	Zn_150	Zn_200	Zn_250	Zn_300
	d [mm]	4,5	4,4	3,8	4	3,75	4,25	3,6	2,8	3,8	2,1
		4,8	4,35	4,3	4,2	4,25	4,3	4	4		
		4,85	4,75	4,55	4,25	3,85	4,15	4,25	2,9	3,5	2
		5	4,95	4,3	4,2	4	3,95	4,6	3,75	4,5	
		4,8	4,65	4,4	4,3	4,2	3,6	4,2	3,8	4,45	4
	PRŮMĚR	4,79	4,62	4,27	4,19	4,01	4,05	4,13	3,45	4,06	2,70
SM ODCH	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,5	0,4	0,9	

PŘÍLOHA 4

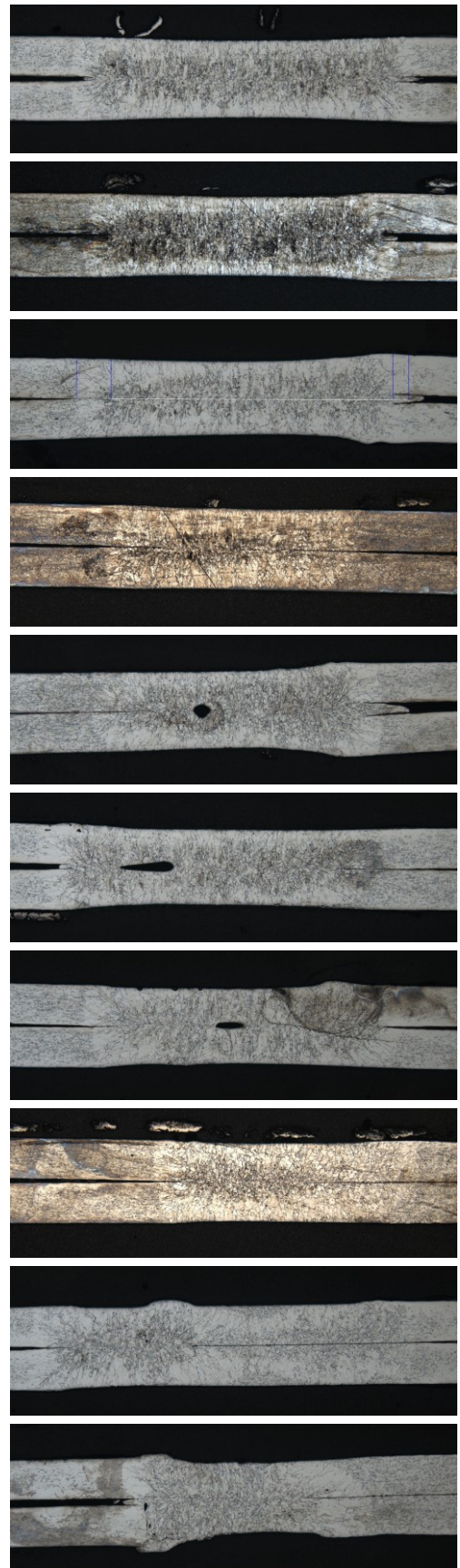
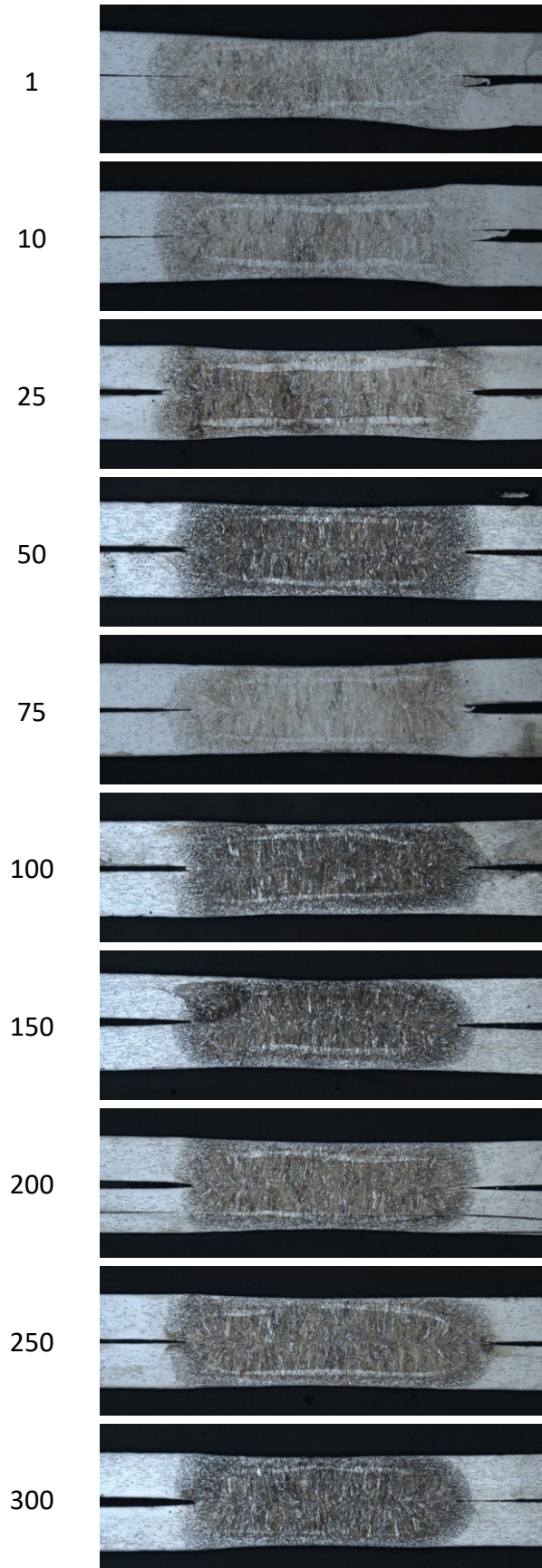
SZ

ZN



EG

GI



SS

PSV

