



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Vliv přitlačné síly na dynamický odpor při
bodovém odporovém svařování**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Vít Janouch

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

STUDIJNÍ PROGRAM: N0715A270001 Výrobní inženýrství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janouch** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **483237**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv přitlačné síly na dynamický odpor při bodovém odporovém svařování

Název diplomové práce anglicky:

Influence of electrode force on dynamic resistance in spot resistance welding

Pokyny pro vypracování:

- Popis odporového svařování a svařovacích parametrů včetně jejich vlivu na svařovací proces.
- Návrh experimentu a jeho realizace.
- Vyhodnocení výsledků
- Závěr.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Zhang, H., Senkara, J.: Resistance Welding: Fundamentals and Applications, CRC Press, 2nd. Edition, 2011
- [2] Kang Zhou, Lilong Cai: Study on effect of electrode force on resistance spot welding process, Journal of Applied Physics 116, 084902 (2014); doi: 10.1063/1.4893968
- [3] Savage W.F., Nippes E.F., Wassell F.A.: Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds, Welding Research Supplement, 1978, s43-50, http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1978_02_s43.pdf
- [4] databáze WoS a Scopus

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

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

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za odborné vedení, vstřícný přístup, cenné rady a v neposlední řadě i za velmi přátelský vztah. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Pavlovi Steinbauerovi Ph.D. za pomoc při řešení úskalí při měření a také Janu Plesníkovi za rady při zpracování dat. Poděkování patří i mé rodině, přátelům, blízkým a velmi šikovně slečně a především dobrému člověku BcA. Aničce Zatloukalové za podporu a trpělivost během celého studia. V neposlední řadě mé poděkování patří i muzice, která tvoří podstatnou část mého života a je mi vždy oporou.

„Happiness is only real when shared“ – Christopher McCandless.

Anotace

Název diplomové práce: Vliv přitlačné síly na dynamický odpor při bodovém odporovém svařování

Autor práce: Bc. Vít Janouch

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

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: 78 stránek, 15 tabulek, 28 obrázků, 13 grafů

Klíčová slova: bodové odporové svařování, dynamický odpor, svařovací proud, svařovací napětí, přitlačná síla elektrod, metody měření, vizuální kontrola, zkouška ultrazvukem, metalografická zkouška, mechanizovaná zkouška stříhem, průměr svarové čočky

Abstrakt: Tato diplomová práce je zaměřena na zkoumání vlivu přitlačné síly elektrod a vlivu opotřebení elektrodoých čepiček na dynamický odpor při bodovém odporovém svařování. Práce obsahuje popis odporového svařování zejména bodového odporového svařování a zabývá se průběhem dynamického odporu, popisem a měřením svařovacích parametrů. V experimentální části této práce byly vyhodnoceny průběhy dynamického odporu v závislosti na přitlačné síle elektrod a opotřebení elektrodoých čepiček. Na svařených vzorcích byla také provedena vizuální kontrola, zkouška ultrazvukem, metalografická zkouška, mechanizovaná zkouška stříhem a také byly měřeny průměry svarových čoček. Z výsledků práce vyplývá, že přitlačná síla má na průběh dynamického odporu zásadní vliv a také ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti svaru.

Annotation

Title of the final thesis:	Influence of electrode force on dynamic resistance in spot resistance welding
Author:	Bc. Vít Janouch
Supervisor:	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE
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:	78 pages, 15 tables, 28 pictures, 13 graphs
Keywords:	resistance spot welding, dynamic resistance, welding current, welding voltage, electrode force, measurement methods, visual inspection, ultrasonic testing, metallographic testing, lap-shear test, nugget diameter
Abstract:	<p>This diploma thesis is focused on the investigation of the influence of the electrode force and the effect of electrode tip wear on the dynamic resistance during resistance spot welding. The thesis contains a description of resistance welding especially resistance spot welding and deals with the dynamic resistance waveform, description and measurement of welding parameters. In the experimental part of this thesis, the dynamic resistance waveforms such as a function of electrode force and electrode tip wear were evaluated. The samples were tested by visual inspection, ultrasonic testing, metallographic testing, lap-shear test and weld nugget diameters were measured too. The results of the thesis show that the electrode force has a significant effect on the dynamic resistance waveform and affects the final mechanical properties of the weld.</p>

Obsah

1	Úvod	10
2	Odporové svařování	11
3	Bodové svařování	12
3.1	Vnesené teplo a dynamický odpor při bodovém svařování	13
3.2	Geometrie bodového svaru	18
3.3	Vady bodových svarů	19
3.4	Kontrola kvality bodových svarů	21
3.4.1	Vizuální kontrola povrchových vad	21
3.4.2	Zkouška ultrazvukem	22
3.4.3	Metalografická zkouška	22
3.4.4	Mechanizovaná zkouška stříhem	23
4	Svařovací parametry a jejich vliv na bodové svařování	24
4.1	Svařovací proud	24
4.2	Svařovací čas	25
4.3	Přítlačná síla elektrod	26
5	Měření veličin v průběhu svařování	27
5.1	Měřené veličiny	27
5.1.1	Elektrický proud	27
5.1.2	Elektrické napětí	28
5.1.3	Přítlační síla elektrod	29
5.2	Vypočtené veličiny	30
5.2.1	Vnesená energie	30
5.2.2	Dynamický odpor	30
5.3	Elektrický šum a jeho potlačení	31
5.4	Komerčně dostupná měřící zařízení	32

6	Návrh experimentu.....	35
6.1	Popis experimentu	35
6.2	Použité materiály	37
6.3	Zařízení použité pro svařování a záznam	39
7	Vyhodnocení experimentu	41
7.1	Úskalí při měření a ověření správnosti měření	41
7.2	Ověření nastavení velikosti přitlačné síly.....	45
7.3	Naměřené závislosti dynamického odporu	48
7.3.1	Vliv přitlačné síly elektrod na dynamický odpor	48
7.3.2	Vliv opotřebení elektrodových čepiček na dynamický odpor	51
7.4	Vizuální kontrola povrchových vad.....	53
7.5	Zkouška ultrazvukem.....	58
7.6	Metalografická zkouška.....	59
7.7	Mechanizovaná zkouška stříhem.....	63
7.7.1	Typy porušení svarového spoje	64
7.7.2	Maximální síly potřebné k porušení svarů.....	67
7.8	Měření průměrů svarových čoček	69
8	Závěr.....	72
	Bibliografie.....	74

Seznam použité symboliky

$Q [J]$	celkové vnesené teplo
$R [\Omega]$	celkový dynamický odpor
$I [A]$	svařovací proud
$U [V]$	svařovací napětí
$t [s]$	svařovací čas
$R_1 [\Omega]$	odpor materiálu horní elektrody
$R_2 [\Omega]$	přechodový odpor mezi horní elektrodou a svařovaným materiálem
$R_3 [\Omega]$	odpor horního svařovaného materiálu
$R_4 [\Omega]$	přechodový odpor mezi svařovanými materiály
$R_5 [\Omega]$	odpor dolního svařovaného materiálu
$R_6 [\Omega]$	přechodový odpor mezi dolní elektrodou a svařovaným materiálem
$R_7 [\Omega]$	odpor materiálu dolní elektrody
$t_{E1} [mm]$	hloubka vtisku horní elektrody
$t_{E2} [mm]$	hloubka vtisku dolní elektrody
$d_{E1} [mm]$	průměr vtisku horní elektrody
$d_{E2} [mm]$	průměr vtisku dolní elektrody
$t_1 [mm]$	tloušťka horního plechu
$t_2 [mm]$	tloušťka dolního plechu
$t_s [mm]$	velikost spáry
$t_r [mm]$	minimální zbytková tloušťka plechu
$t_L [mm]$	hloubka natavení plechu
$d [mm]$	průměr svarové čočky
$P [V]$	přítlační síla elektrod
$P_r [kN]$	reálná přítlační síla elektrod
$t_p [mm]$	tloušťka plechu
$t_{Emax} [mm]$	maximální hloubka vtisku elektrody
$F [kN]$	zatěžující síla
$\Delta L [mm]$	absolutní prodloužení
$F_{max} [kN]$	maximální síla potřebná k porušení svaru
$F_{min} [N]$	minimální hodnota síly potřebné k porušení svaru
$d_{min} [mm]$	minimální průměr svarové čočky

1 Úvod

Historie odporového svařování sahá až do roku 1887, kde tuto metodu nezávisle na sobě patentovali nejprve E. Thompson (USA) a poté i N.N. Benardos (RU). V této době však nebylo možné odporové svařování využívat v průmyslu, a to především kvůli nedostatečnému výkonu zdrojů střídavého proudu a elektrických prvků pro regulaci. [1; 2; 3]

Průlom nastal v roce 1925, kdy se odporové svařování začalo intenzivně rozvíjet především díky rozmachu automobilového průmyslu a později i kvůli potřebě spojování ocelových plechů samonosných karosérií. Tato metoda se pro tyto účely ukázala jako velmi vhodná, jelikož se jedná o velmi efektivní a produktivní způsob spojování plechů. Přičemž je tato metoda schopna částečně kompenzovat i drobné nepřesnosti vzniklé při výrobě plechových výlisků. Tato metoda poté našla uplatnění nejen v automobilovém průmyslu, ale také v průmyslu potravinářském a dalších odvětvích. [1; 2; 3]

Díky průběžným inovacím a zdokonalování odporového svařování se tato metoda stala důležitou součástí moderního průmyslu. Její výhody jsou rychlost svařování, pevnost spoje, možnost svařování různých materiálů s různými povlaky atd. Tuto metodu svařování lze také dobře automatizovat. Čas svařování se pohybuje v poměrně malých časových úsecích, což vede k vysoké produktivitě. Produktivita například v automobilovém průmyslu hraje významnou roli, jelikož se průměrný počet bodových svarů na karosérii jednoho automobilu pohybuje kolem 5000 svarů (v závislosti na typu a velikosti automobilu). Z toho vyplývá, že metoda odporového svařování je vhodná především pro hromadnou a sériovou výrobu, nicméně ji lze nalézt i v kusové výrobě. [1; 3]

Tato diplomová práce se zabývá popisem odporového svařování především bodového odporového svařování, a to zejména se zaměřením na průběh dynamického odporu během svařování. Dále se tato práce zabývá kontrolou kvality bodových svarů, svařovacími parametry, jejich vlivem na proces svařování a problematikou měření veličin v průběhu svařování. Experimentální část práce je věnována zkoumání vlivu přítláčné síly elektrod a také vlivu opotřebených elektrodových čepiček na dynamický odpor při bodovém odporovém svařování a s tím spojeným účinkem na kvalitu a geometrii svarového spoje.

2 Odporové svařování

Odporové svařování je metoda spojování materiálů založená na průchodu elektrického proudu za působení tlaku. Průchodem proudu uzavřeným elektrickým okruhem dochází vlivem elektrického odporu k lokálnímu ohřevu svařovaných dílů. Toho je dosaženo díky odporovému teplu tzv. Joulovu teplu. Při přesáhnutí teploty tání dojde k lokálnímu natavení materiálů a k následnému vzniku svaru. Dle konstrukčního uspořádání elektrod lze odporové svařování dělit na tyto metody: [1; 3]

Bodové svařování

Při této metodě se dva či více přeplátovaných plechů umístí mezi dvě měděné elektrody, které se stlačí a následným průchodem proudu vlivem odporu dojde ke svaření těchto materiálů. Po svaření vznikne bodový svar, který je tvořen svarovou čoučkou. [2; 4]

Švové svařování

Obdobná metoda jako bodové svařování, ale s rozdílným tvarem elektrod, které jsou při této metodě ve tvaru kotoučů. Díky tvaru elektrod a pohybu materiálu v průběhu svařovacího procesu lze vytvářet souvislý či přerušovaný svar. Pomocí švového svařování se vyrábějí například trubky, pивní sudy, palivové nádrže a další. [2; 4]

Výstupkové svařování

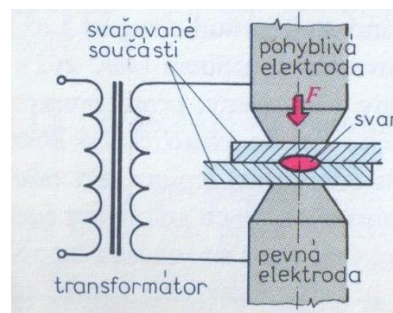
Principiálně analogická metoda jako v předchozích případech s tím rozdílem, že svařované díly nejsou hladké, ale mají na sobě přirozeně nebo záměrně vytvořené výstupky, díky kterým dochází ke kontaktu svařovaných dílů pouze v těchto místech. Svar poté vzniká v místě kontaktu svařovaných dílů. Jako příklad lze uvést použití navařovacích matic. [2; 4]

Stykové svařování

Při této metodě se svar vytváří v celé styčné ploše dvou (nejčastěji rotačních) dílů, které jsou k sobě přiloženy tak, aby jejich kontaktní plochy byly rovnoběžné. Tuto metodu lze rozdělit na pēchovací a na odtavovací stykové svařování. Liší se tím, že při odtavovacím stykovém svařování vzniká a zaniká (vlivem oddalování a přibližování jednoho z dílů) krátký elektrický oblouk, který napomáhá rychlejšímu natavení ploch spojovaných materiálů. [2; 4]

3 Bodové svařování

Bodové odporové svařování je díky automobilovému průmyslu jedním z nejběžnějších způsobů odporového svařování. Při svařování touto metodou se dva či více přeplátovaných plechů umístí mezi dvě, nejčastěji měděné (tedy dobře vodivé) elektrody, které na tyto plechy působí tlakovou silou. Při následném průchodu elektrického proudu o vysoké intenzitě uzavřeným okruhem dochází vlivem elektrického odporu k lokálnímu ohřevu a k následnému natavení svařovaných materiálů. Teplo vznikající při průchodu proudu se nazývá odporové teplo, tzv. Joulovo teplo. Schéma bodového svařování je na Obr. 1. [3; 4]



Obr. 1 - schéma bodového svařování [5]

Mezi podmínky bodového svařování patří dobrá elektrická vodivost, dobrá tvárnost a malá tepelná vodivost svařovaného materiálu. Pro zajištění průchodu proudu elektrickým obvodem je nutná čistota přechodových ploch a dostatečná přitlačná síla elektrod. Přitlačná síla elektrod vytváří na materiál tlak, který má pozitivní vliv na výslednou strukturu svaru. Při působení přitlačné síly i po ukončení svařování dochází v podstatě k prokování svaru, což má za následek srovnatelné či lepší mechanické vlastnosti svaru než základního (svařovaného) materiálu. [3; 4]

Bodové svařování je velmi rychlou a produktivní metodou, kterou lze snadno automatizovat. Rychlost svařování při bodovém svařování se v závislosti na tloušťce spojovaných materiálů pohybuje od 40 ms až do 2 s a rychlosti ohřevu, respektive ochlazení, zde dosahují až $100\,000\text{ °C} \cdot \text{s}^{-1}$. Za takto krátký čas je nutné, aby bylo dosaženo předepsaných rozměrů a geometrie svarové čočky a především i požadované pevnosti svarového spoje. Vznik svarového spoje je nerovnovážný děj, kde podmínkou pro svařovací proces je existence teplotních a deformačních gradientů. [3]

3.1 Vnesené teplo a dynamický odpor při bodovém svařování

V návaznosti na princip vzniku tepla při bodovém odporovém svařování je vhodné uvést i vztah pro jeho výpočet. Celkové množství tepla vzniklého vlivem elektrického odporu lze dle Jouleho zákona vyjádřit následujícím vztahem:

$$Q = \int_0^t R(t) \cdot I(t)^2 \cdot dt \quad (1)$$

kde Q – celkové vnesené teplo [J]

R – celkový dynamický odpor [Ω]

I – svařovací proud [A]

t – svařovací čas [s]

Celkový dynamický odpor, který ve výpočetním vztahu pro celkové vnesené teplo reprezentuje pouze jedno číslo, je však složen z několika dílčích odporů. Ty jsou proměnlivé v čase a mohou být závislé na teplotě, přitlačné síle a dalších faktorech. Mezi dílčí odpory patří odpory materiálů elektrod, přechodové odpory mezi elektrodami a svařovanými materiály, odpory svařovaných materiálů a přechodový odpor mezi svařovanými materiály. Rozdělení těchto odporů na schématu pro bodové svařování ukazuje Obr. 2. Vztah pro výpočet celkového dynamického odporu z jednotlivých dílčích odporů je následující:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 \quad (2)$$

kde R – celkový dynamický odpor [Ω]

R_1 – odpor materiálu horní elektrody [Ω]

R_2 – přechodový odpor mezi horní elektrodou a svařovaným materiálem [Ω]

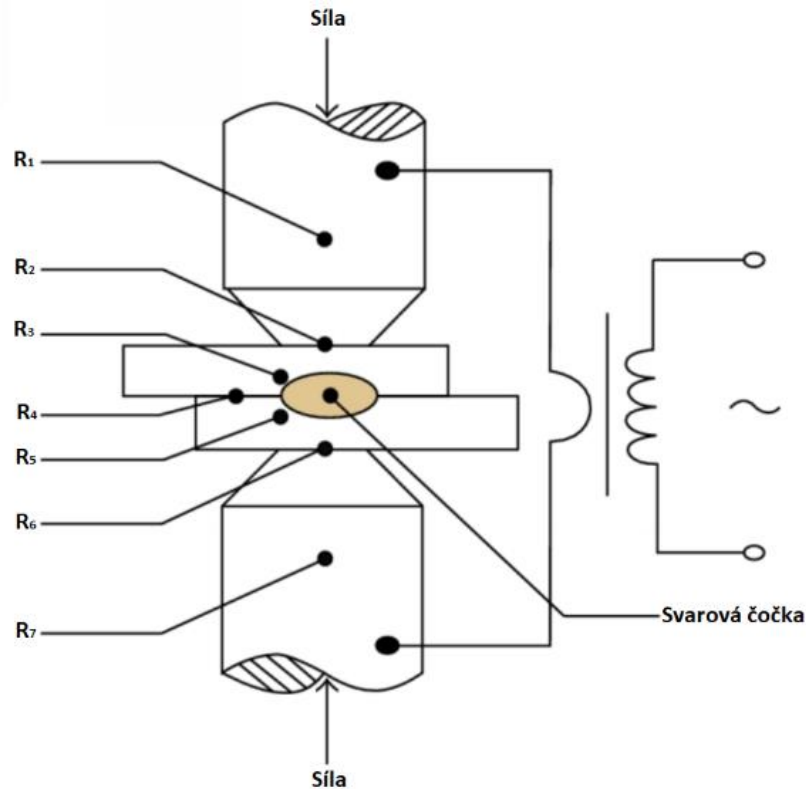
R_3 – odpor horního svařovaného materiálu [Ω]

R_4 – přechodový odpor mezi svařovanými materiály [Ω]

R_5 – odpor dolního svařovaného materiálu [Ω]

R_6 – přechodový odpor mezi dolní elektrodou a svařovaným materiálem [Ω]

R_7 – odpor materiálu dolní elektrody [Ω]



Obr. 2 - rozdělení dílčích odporů celkového dynamického odporu [6]

Důležité je poznamenat, že všemi dílčími odpory protéká v uzavřeném obvodu stejně velký proud. Podíl dílčích odporů na celkové vnesené teplo je úměrný jejich velikosti. Největší vliv na vznik tepla má hodnota přechodového odporu mezi svařovanými materiály. To je velmi důležité proto, aby nejvíce tepla bylo vyvinuto právě mezi svařovanými materiály a došlo tak k vytvoření svarového spoje. Zbylé dílčí odpory nemají vliv na vytvoření spoje a pouze snižují svařovací proud, což je nežádoucí. [3]

Odpory materiálu elektrod (R_1, R_7)

Odpor materiálu elektrody je při bodovém odporovém svařování nežádoucí a je snaha ho minimalizovat. Jeho velikost závisí především na použitém materiálu, a proto jsou ve většině případů elektrody, respektive elektrodové čepičky, vyrobeny ze slitiny na bázi mědi, tedy z materiálu s vysokou elektrickou vodivostí. Materiály elektrodových čepiček upravuje norma ČSN EN ISO 5821 Odporové svařování – Elektrodové čepičky pro bodové odporové svařování. Odpor materiálu je obecně silně závislý i na teplotě materiálu, kde dochází k jeho výraznému nárůstu při vzrůstající teplotě. Z tohoto důvodu jsou při bodovém svařování elektrodové čepičky intenzivně chlazeny, ve většině případů vodou. [2; 7; 8]

Přechodové odpory mezi elektrodami a svařovanými materiály (R_2, R_6)

Přechodový odpor mezi elektrodou a svařovaným materiálem bude tím větší, čím větší bude odpor materiálu dotýkajících se dílů. Tyto odpory závisí na velikosti, drsnosti a především na čistotě styčných ploch elektrod a svařovaného materiálu. Při svařování často dochází k tvorbě oxidických vrstev, které jsou i při malých tloušťkách nevodivé. Vodivost těchto vrstev narůstá až se zvyšující se teplotou. Dalším parametrem, kterým lze přechodový odpor ovlivnit, je přitlačná síla elektrod. Při použití malé přitlačné síly dochází k horšímu elektrickému kontaktu a zvyšuje se tak i hodnota přechodového odporu. Přechodové odpory mezi elektrodami a materiálem jsou při svařování nežádoucí a je snaha je minimalizovat. Pokud však v tomto místě vzniká teplo vlivem nežádoucího přechodového odporu, mají elektrodové čepičky za úkol toto teplo rychle odvést z místa styku. Proto jsou elektrodové čepičky (jak již bylo zmíněno) vyrobeny ze slitiny mědi a také intenzivně chlazeny. [2; 3; 7]

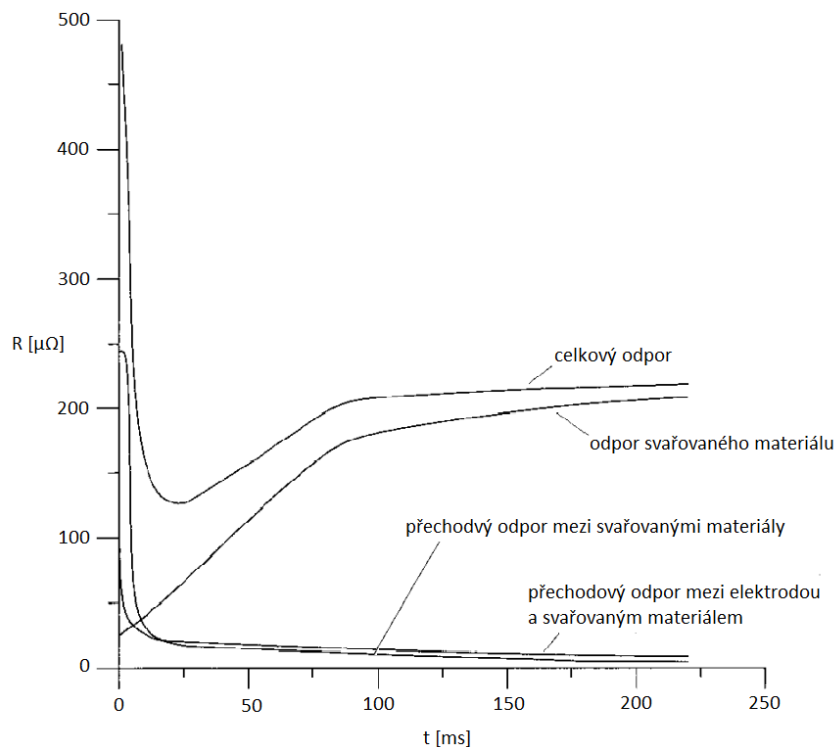
Odpory svařovaných materiálů (R_3, R_5)

Odpor svařovaného materiálu závisí na použitém materiálu, jeho tloušťce, na efektivním průřezu, kterým protéká proud, a také především na teplotě, jelikož s rostoucí teplotou tento odpor výrazně stoupá. Drobný vliv na tento odpor má i mechanické a tepelné zpracování svařovaného materiálu. Při vyšších teplotách (nad 800 °C) tento odpor pro ocel v závislosti na tepelném součiniteli elektrického odporu vzrůstá lineárně. Při teplotách nižších tato závislost lineární není. [2; 3; 7]

Přechodový odpor mezi svařovanými materiály (R_4)

Přechodový odpor mezi svařovanými materiály musí být ze všech dílčích odporů nejvyšší, tak aby došlo k vývinu tepla ve správném místě a k vytvoření náležitého svarového spoje. Tento odpor závisí na ploše styku, na čistotě a drsnosti povrchů a na teplotě. S rostoucí teplotou přechodový odpor mezi svařovanými materiály prudce klesá až do okamžiku, kdy na styku materiálů vznikne tekutá fáze, při které zcela zanikne. Dalším aspektem, který působí na přechodový odpor mezi svařovanými materiály je přitlačná síla elektrod. Platí zde stejná analogie jako u přechodového odporu mezi elektrodami a svařovanými materiály. Zvýšení tohoto odporu a s tím spojeným zvýšením množství tepla je možné snížením přitlačné síly elektrod. Malá přitlačná síla však mimo další problémy nese nevýhodu v tom, že nízký tlak neudrží jádro roztaveného kovu v místě svarové čocky a dojde k jeho rozstříku. [2; 3; 7]

Typické průběhy dílčích odporů jsou zobrazeny na Obr. 3. Tyto průběhy korespondují s předchozím popisem dílčích odporů a je jasně patrné, že přechodový odpor mezi svařovanými materiály má na začátku svařování největší vliv na vývoj tepla. V grafu nelze nalézt průběh odporu materiálu elektrod, jelikož (jak již bylo zmíněno) je jeho velikost vzhledem k materiálu elektrod a k intenzivnímu chlazení zanedbatelná. [3; 9]

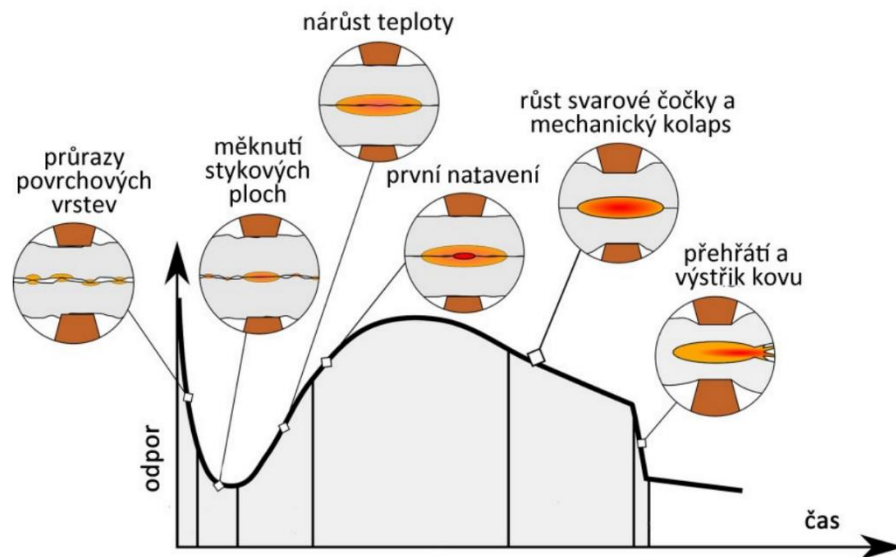


Obr. 3 – typické průběhy dílčích odporů při bodovém odporovém svařování [9]

Vznik svarového spoje metodou bodového odporového svařování je charakteristický prudkým a intenzivním ohřevem v omezeném prostoru až na teplotu tavení a následným rychlým ochlazováním, při stálém působení přitlačné síly elektrod. Tento děj neboli metalurgický proces odporového svařování, znázorňuje v závislosti na čase a dynamickém odporu Obr. 4. [3]

V první fázi, kde hraje největší roli především přechodový odpor mezi svařovanými materiály, dochází k výraznému poklesu dynamického odporu, což je doprovázeno průrazem povrchových vrstev svařovaných materiálů. Dále dochází k měknutí stykových ploch a při dalším nárůstu teploty i k prvotnímu natavení svařovaných materiálů. S narůstající teplotou přebírá dominantní vliv na celkový dynamický odpor odpor svařovaných materiálů. Dále

dochází k růstu svarové čočky a k mechanickému kolapsu svařovaných materiálů. Pokud teplota svařovaných materiálů přesáhne určitou mez, nebo přítlačná síla elektrod není dostatečně vysoká, může dojít k přehřátí a k následnému rozstříku roztaveného kovu. To může mít za následek například vznik pórů. [3]



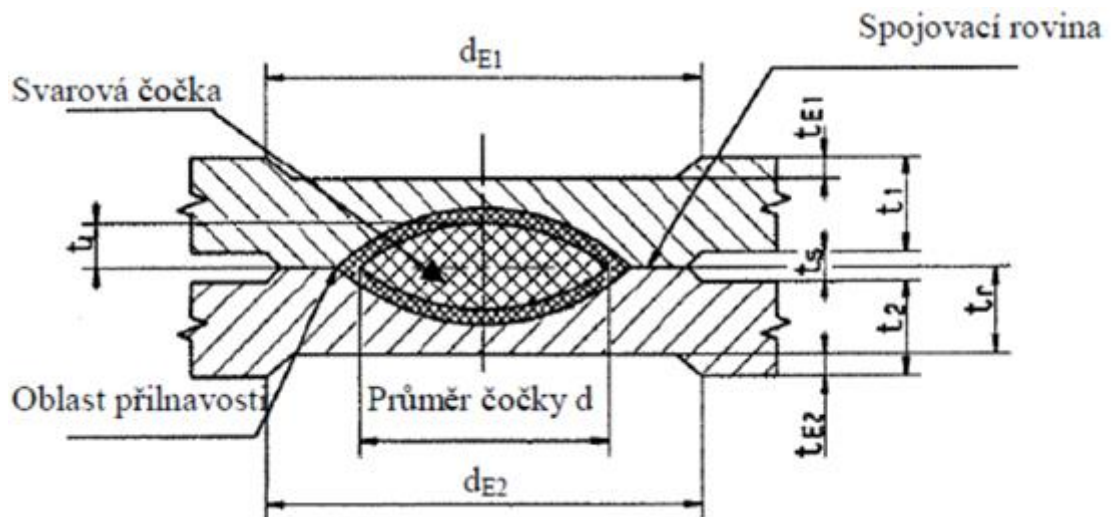
Obr. 4 - metalurgický proces během odporového svařování [3]

Pokud jsou svařovací podmínky správně nastavené, je výsledkem svařování svarová čočka o požadované geometrii a velikosti. K dosažení požadované svarové čočky je nutné, aby došlo k procesu tavení nejprve na rozhraní svařovaných materiálů, později postupujícím směrem dovnitř svařovaných materiálů, a tedy k natavení přiměřeného objemu obou dílů. Tloušťka svarové čočky musí být menší než součet tlouštěk svařovaných materiálů, čemuž příznivě napomáhá odvod tepla skrze chlazené elektrodové čepičky. K odvodu tepla dochází i do svařovaného materiálu a vytváří se tak tepelně ovlivněná oblast. [3]

Po vypnutí svařovacího proudu dochází k postupnému ochlazení svaru. Předchozím roztavením kovu došlo k porušení původní struktury materiálu, zmizí charakteristická struktura základního materiálu a objeví se nové krystalografické útvary, tzv. dendrity. Orientace dendritů poté kopíruje směr maximálního odvodu tepla. V tepelně ovlivněné oblasti může docházet k zakalení struktury, přičemž stupeň zakalení závisí na druhu základního materiálu a na svařovacím režimu. [3]

3.2 Geometrie bodového svaru

Na geometrii a rozměry bodového svaru je při bodovém svařování kladen velký důraz. To je především kvůli tomu, že jak geometrie, tak průměr svarové čočky mají velký vliv na finální vlastnosti bodového svaru, ať už se jedná o mechanické vlastnosti, či vzhled finálního výrobku. Geometrie bodového svaru je zobrazena na Obr. 5. [4]



Obr. 5 - geometrie bodového svaru [4]

t_{E1}	hloubka vtisku horní elektrody (maximálně 20 % tloušťky plechu t_1)
t_{E2}	hloubka vtisku dolní elektrody (maximálně 20 % tloušťky plechu t_2)
d_{E1}	průměr vtisku horní elektrody
d_{E2}	průměr vtisku dolní elektrody
t_1	tloušťka horního plechu
t_2	tloušťka dolního plechu
t_s	velikost spáry (maximálně 20% střední tloušťky plechů t_1 a t_2)
t_r	minimální zbytková tloušťka plechu
t_L	hloubka natavení plechu
d	průměr svarové čočky

Nejdůležitějším parametrem je velikost svarové čocky. Průměr svarové čocky má totiž největší vliv na výslednou pevnost svarového spoje. Jedná se o střední průměr plochy lomu ve spojovací rovině plechů, který se měří při mechanizované zkoušce stříhem, po úplném oddělení obou plechů. Samotný průměr svarové čocky však zcela nezaručuje strukturní integritu spoje neboli pevnost spoje. Další parametr, na kterém závisí výsledná pevnost spoje, je i hloubka natavení plechu. [4; 10]

Na pevnost svarového spoje má vliv i tepelně ovlivněná oblast. Ta je především závislá na svařovacím režimu, popřípadě na typu řízení svařovacího procesu. Svarová čocka se v závislosti na svařovacím režimu může odlupovat přímo v tepelně ovlivněné oblasti, nebo může docházet k houževnatému porušení a vytrhnutí svarové čocky společně s částí plechu. Způsoby porušení svarového spoje se zabývá praktická část této práce.

Dalším důležitým parametrem geometrie bodového svaru je hloubka vtisku elektrody, která nesmí přesáhnout 20 % tloušťky plechu. Tento požadavek je důležitý především v automobilovém průmyslu, kde se na karoserii automobilu vyskytuje velké množství bodových svarů, které nesmí být po lakování viditelné, tak aby nebyl narušen výsledný vzhled karosérie automobilu. [4]

3.3 Vady bodových svarů

U spojů vytvořených bodovým svařováním se mohou vyskytovat různé vady, které poté ovlivňují jak kvalitu samotného spoje, tak jeho celkovou pevnost. Vady lze rozdělit na vnitřní a vnější, přičemž se u bodových svarů mohou často vyskytovat současně. Hlavními příčinami vzniku vad bodového svaru bývá zejména nesprávné nastavení svařovacích parametrů, kvalita a čistota kontaktních ploch (povrch plechu a povrch elektrodové čepičky) či poruchy funkce stroje. Klasifikaci vad bodových svarů upravuje norma ČSN EN ISO 6520-2 Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 2: Tlakové svařování. Norma vady bodových svarů rozděluje do šesti skupin, které jsou uvedeny níže, přičemž je nutné poznamenat, že norma nezahrnuje vady, které vznikly jiným způsobem než svařováním (například přidavným napětím atd.). [10; 11]

P1 Trhliny

Příčinou vzniku trhlin bývá ve většině případů špatná svařitelnost materiálu, při které dojde k zakalení materiálů a vlivem vnitřního pnutí dojde ke vzniku trhliny. Trhliny jsou ve svaru nepřipustné a z hlediska dynamického namáhání snižují únosnost svarového spoje. Pro potlačení jejich vzniku je možné použít měkký svařovací režim či nechladit elektrody (dochází potom však k většímu opotřebení elektrodových čepiček). [3; 10]

P2 Dutiny

Ke vzniku dutin dochází vlivem nevhodně zvolených svařovacích parametrů, primárně při příliš dlouhém ohřevu. Vliv na vznik dutin může mít i jakost povrchu a nečistoty mezi svařovanými plechy. Dutiny bývají doprovázeny rozstříkem svarového kovu. [3; 10]

P3 Pevné vměstky

Vměstky vznikají v důsledku znečištěného, jinými slovy nevhodně připraveného, povrchu svařovaných plechů i elektrodových čepiček. Vměstky pak mohou snižovat mez únavy svarového spoje. [3; 10]

P4 Studené spoje

Vznik studeného spoje je zapříčiněn nedostatečným natavením materiálů. Důvodem nedostatečného natavení může být nesprávné nastavení svařovacích parametrů, opotřebení elektrod, nebo například působení bočních proudů. [3; 10]

P5 Vady tvaru a rozměru

Do této skupiny spadá velké množství různých vad, které mohou mít vliv na výslednou odolnost svařované konstrukce. Mezi nejčastější vady z této skupiny patří například malý průměr svarové čochky, velká hloubka vtisku elektrod, nesymetrický tvar svarové čochky, či nedostatečný průvar. [3; 10]

P6 Ostatní vady

Jedná se o skupinu vad, do které se řadí vady, které nejsou uvedeny v předchozích případech. Nejčastější vada v této skupině je rozstřík svarového kovu (zejména mezi plechy), který vzniká především při nesprávně zvolených svařovacích parametrech. [3; 10]

3.4 Kontrola kvality bodových svarů

Kontrola bodových svarů probíhá ve snaze předcházet vadám, které by mohly negativně ovlivnit výslednou kvalitu svarového spoje. Kontrolu bodových svarů lze provádět různými zkouškami, které jsou schopny ověřit správnost geometrie bodového svaru i odhalit jeho vady. Zkoušky bodových svarů lze dělit na zkoušky destruktivní a nedestruktivní. U destruktivních zkoušek dochází k poškození či úplnému zničení svařovaných dílů. Naopak u nedestruktivních zkoušek nedochází k poškození dílů. V závislosti na dané zkoušce lze zjišťovat jak vady povrchové, tak i ty vnitřní. Volba vhodných zkoušek je v průmyslové praxi závislá na mnoha aspektech. V následujícím textu jsou uvedeny pouze zkoušky, které jsou použity v experimentální části této diplomové práce. Mezi další metody kontroly bodových svarů lze uvést například odlupovací zkoušku, sekáčovou zkoušku, zkoušku tvrdosti a mikrotvrdosti.

3.4.1 Vizuální kontrola povrchových vad

Vizuální kontrolu bodových svarů upravuje norma ČSN EN ISO 17 637 – Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola. Jedná se o velmi jednoduchou, levnou, nenáročnou a rychlou nedestruktivní zkoušku bodových svarů, která bývá ve výrobním procesu vzhledem ke své finanční a časové nenáročnosti velmi často zařazována jako první. Pokud je odhalen nevyhovující svar, není nutné, aby na něm probíhaly další a zároveň náročnější zkoušky, čímž dojde k úspoře času i nákladů. [12; 13]

Vizuální kontrolu provádí zkušený personál za předepsaných podmínek pomocí jednoduchých nástrojů, jako jsou různá měřítka a lupy. Při této zkoušce je zjišťováno, zda svary vyhovují výkresové dokumentaci. Mezi parametry stanovené výkresovou dokumentací patří například počet a rozmístění svarů. Touto zkouškou lze odhalit pouze některé vady svarového spoje. Jednou z nich může být například studený či přehřátý spoj. Studený spoj se vyznačuje mělkým vtiskem elektrod do materiálu a malým opalem povrchu svařovaného materiálu. Naopak přehřátý spoj se vyznačuje hlubokým vtiskem elektrod do materiálu a velmi tmavým opalem povrchu svařovaného materiálu. Takový spoj může mít za následek vznik vnitřních prasklin a křehkost spoje. Ideální svar by měl mít přiměřený opal a vtisky elektrod by měly být identické, přičemž by jejich hloubka neměla přesahovat 20 % tloušťky plechu. [12; 13]

3.4.2 Zkouška ultrazvukem

Zkouška ultrazvukem bodových svarů také patří do skupiny nedestruktivních zkoušek používaných k posouzení kvality svarového spoje. Jedná se o rychlou, citlivou a poměrně přesnou metodu zkoušení, která dokáže odhalit i vnitřní vady svaru. Tato zkouška využívá vlastností ultrazvukových vln šířících se pevnou látkou, jejich odrazu a následné detekce necelistvostí ve svaru. Odražené signály jsou zachycovány ultrazvukovou sondou, analyzovány ultrazvukovým zařízením a projevují se ve formě ech na echogramu. Pomocí této zkoušky lze identifikovat různé vady, jako jsou póry, trhliny, nehomogenita materiálu, nepřítomnosti svaru nebo studené spoje. Typy těchto vad se hodnotí podle velikosti a rozmístění jednotlivých ech na echogramu. [12; 13]

Zkoušku ultrazvuk lze provádět manuálně, lze ji ale i poměrně snadno automatizovat. Vždy je však nutné, aby byla zajištěna dobrá akustická vazba mezi sondou a zkoušenou součástí. Při této zkoušce se pro zkoušení bodových svarů využívají přímé sondy neboli sondy s měničem vysílající podélné vlny, jejichž svazek prochází materiálem v kolmém směru. Tyto sondy bývají osazeny vodní předsádkou nebo předsádkou z plexiskla a průměr měniče sondy se volí podle průměru svarové čočky zkoušeného svaru. Pro kontaktní zkoušení při zkoušce ultrazvukem se využívají frekvence 2 až 5 MHz a při imerzním zkoušení frekvence až do 25 MHz. Frekvence poté zásadně ovlivňuje citlivost dané metody s ohledem na zkoušený materiál. Vysoká citlivost je velmi důležitá především u zkoušení tenkých plechů, jak tomu je u svarů vzniklých bodovým svařováním. [12; 13]

3.4.3 Metalografická zkouška

Metalografická zkouška svarů je důležitou destruktivní zkouškou, která se řídí normou ČSN EN ISO 17639 - Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů. Tato zkouška se obvykle provádí jako doplňková zkouška u svarů s vysokou důležitostí. Při této zkoušce se svařované díly upravují na specifické rozměry a dále dochází k jejich rozříznutí v ose průměru svarové čočky. Takto připravený vzorek se posléze zalévá nebo lisuje zalévací nebo lisovací hmotou do tvaru puků. Puky obsahující jeden či více vzorků jsou poté broušeny, leštěny a leptány tak, aby byl zajištěn požadovaný vzhled ploch vzorků bez škrábanců a jiných nežádoucích jevů pro jeho následnou analýzu. [12; 14]

Na makroskopech či mikroskopech lze poté takto připravený vzorek hodnotit. Hodnocení může probíhat přímo nebo při pořízení snímků zkoušených vzorků až později. Na vzorcích lze hodnotit mikrostrukturu svaru, výskyt pórů, prasklin, bublin či jiných necelistvostí, které by mohly mít negativní vliv na výsledné vlastnosti svarového spoje. Dále lze také hodnotit geometrii svarů jako jsou například průměry svarových čoček, velikost tepelně ovlivněné oblasti, či hloubky vtisků elektrod do materiálu. Na vzorcích z metalografické zkoušky je také možné provádět zkoušky tvrdosti, přičemž se tvrdost měří v oblasti svarové čočky, tepelně ovlivněné oblasti i v oblasti základního materiálu, který nebyl svařováním nijak ovlivněn. [12; 14]

3.4.4 Mechanizovaná zkouška stříhem

Mechanizovaná zkouška stříhem spadá do skupiny destruktivních zkoušek a řídí se normou ČSN EN ISO 14273 - Odporové svařování – Destruktivní zkoušky svarů – Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů. Při této zkoušce se získávají důležité informace o pevnosti svarového spoje, jeho schopnosti odolávat mechanickým zatížením a pohlcovat deformační energii. Po mechanizované zkoušce stříhem lze získat i informace o velikosti svarové čočky. [12; 15]

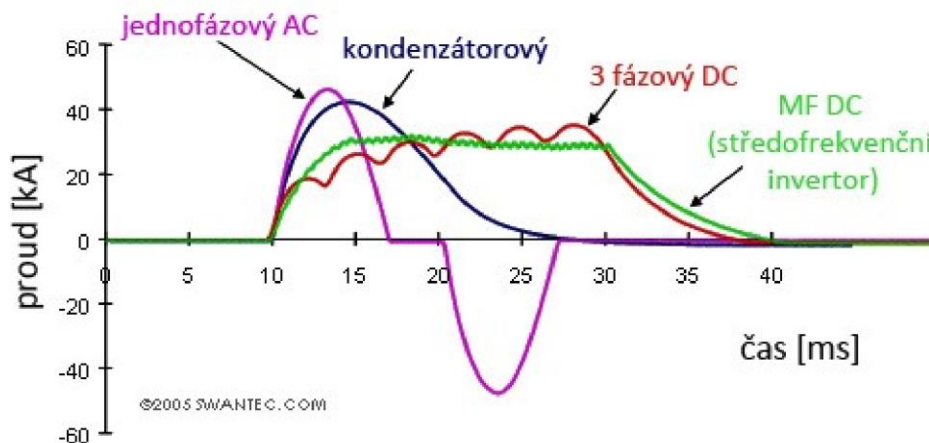
Při této zkoušce je vzorek upnut do čelistí univerzálního zkušebního stroje. Následně je zapnut chod hydraulického válce a dochází tak k postupnému oddalování čelistí konstantní rychlostí, čímž také dochází k postupnému zatěžování vzorku. Společně se zatěžováním je na monitoru počítače vykreslován tzv. pracovní diagram, tedy průběh zatěžující síly v závislosti na absolutním prodloužení. Zkouška končí v okamžiku, kdy dojde k částečnému nebo k úplnému porušení svarového spoje. Při úplném porušení je svar zatěžován až do okamžiku, kdy dojde k úplnému rozdělení plechů na dva samostatné díly a získáme tak celý průběh síly. Při částečném porušení je získána pouze maximální síla potřebná k porušení svaru, ke které dochází z pravidla při prvním vytržení svarové čočky z jednoho z plechů. U této zkoušky lze také zkoumat způsob porušení svaru a po úplném porušení svarového spoje je možné měřit průměr svarové čočky. [12; 15]

4 Svařovací parametry a jejich vliv na bodové svařování

Při bodovém odporovém svařování lze v závislosti na řídicím systému svařovacího zařízení nastavovat celou řadu parametrů. Pro účely této práce bude výčet omezen pouze na tři základní svařovací parametry, kterými jsou svařovací proud, svařovací čas a přitlačná síla elektrod. Tyto parametry jsou pro správné vytvoření svarového spoje naprosto zásadní a jejich kombinací a velikostí je tvořen tzv. svařovací režim. Optimálních výsledků svařování lze dosáhnout pouze vhodnou kombinací svařovacích parametrů. Je však vždy nutné brát ohled i na další faktory, které mohou ovlivnit tvorbu svarové čočky, jako je například průměr elektrod, čistota svařovaných materiálů, jeho vlastnosti, úprava povrchu, doba přitlaku a další. [3; 16]

4.1 Svařovací proud

Svařovací proud je u bodového odporového svařování hlavním parametrem ovlivňujícím proces svařování. Jeho vliv na proces svařování vychází z rovnice pro výpočet Joulova tepla, kde se jako jediný parametr vyskytuje v kvadratickém tvaru. Průběh svařovacího proudu a tím pádem i jeho vliv na proces svařování závisí na použitém svařovacím zdroji. Mezi základní zdroje patří: zdroj pro AC (Alternating Current) - svařování střídavým proudem, DC (Direct Current) - svařování stejnosměrným proudem, CD (Capacitor Discharge) - kondenzátorové svařování a zdroj pro MFDC (Medium Frequency Direct Current) - svařování stejnosměrným proudem středních frekvencí. Schéma průběhů svařovacích proudů různých svařovacích zdrojů znázorňuje Obr. 6. [3; 16; 17]



Obr. 6 - schéma průběhů svařovacího proudu různých svařovacích zdrojů [3]

Obecně platí, že při použití nízkého svařovacího proudu je i vnesené teplo nízké, což má za následek špatnou penetraci a malý průměr svarové čočky. Vyšší svařovací proud vede ke zvýšené tvorbě tepla, tedy i velikosti svarové čočky a tím pádem i ke zvýšení pevnosti svarového spoje. Nadměrný svařovací proud však může vést k nadměrné tvorbě tepla, a v důsledku i k přehřátí svarového spoje. Se zvyšujícím se svařovacím proudem také roste oblast svařovaného materiálu ovlivněného plastickou deformací, a s tím související hloubka vtisku elektrod do materiálu. Hloubkou vtisku může být poté ovlivněna jak kvalita svarového spoje, tak i vzhled, což je například u pohledových dílů v automobilovém průmyslu zásadní. Závislost růstu svarové čočky (potažmo pevnosti svarového spoje) na velikosti svařovacího proudu není lineární, ale intenzita růstu s narůstajícím proudem postupně klesá. To je způsobeno příliš velkým teplem vneseným do svařovaného materiálu a následným rozstříkem roztaveného kovu. [16; 17; 18]

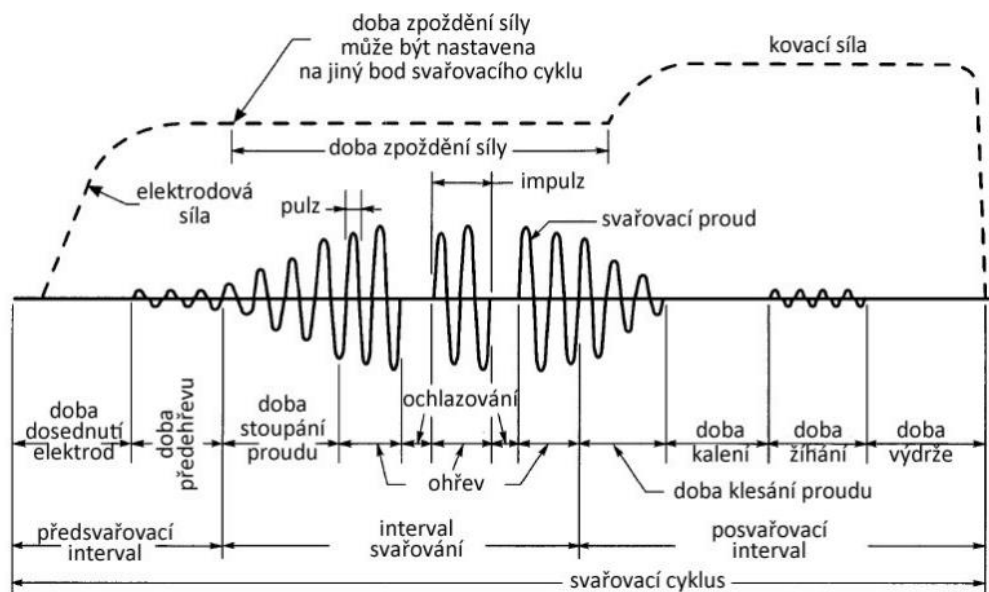
4.2 Svařovací čas

Svařovací čas je definován jako časový interval, po který materiálem protéká svařovací proud. Jeho vliv na bodové svařování je obdobný jako vliv svařovacího proudu, ale není tak výrazný. Tento vliv vychází opět z rovnice pro výpočet Joulova tepla, kde je však zapsán pouze v první mocnině. Množství vneseného tepla je tedy přímo úměrné svařovacímu času. Svařovací čas se měří v milisekundách nebo v periodách síťového kmitočtu. [3; 16]

Vliv svařovacího času je tedy obdobný, avšak je menší než vliv svařovacího proudu. Se zvyšujícím se svařovacím časem narůstá i velikost vneseného tepla a s tím i průměr svarové čočky a pevnost svaru. S delším svařovacím časem může růst i hloubka vtisku elektrod do materiálu a také může docházet k přehřátí svarového spoje. Zásadní rozdíl je v tom, že příliš dlouhá doba svařování může zapříčinit hrubnutí mikrostruktury ve svarové čočce a v tepelně ovlivněné oblasti, což má poté za následek ovlivnění tvrdosti. Příliš dlouhé svařovací časy také vedou k většímu zahřívání a následnému opotřebení elektrodových čepiček. Důležité je poznamenat i to, že se zvyšujícím se svařovacím časem se zpomaluje rychlost nárůstu velikosti svarové čočky z důvodu, že delší doba svařování způsobuje i větší tepelné ztráty z místa svarové čočky. Tyto ztráty jsou zapříčiněny jak konvekcí tepla do okolí, tak i jeho kondukcí do svařovaného materiálu a zejména do chlazených elektrodových čepiček. [16; 17; 18]

4.3 Příkladná síla elektrod

Příkladná síla elektrod je definována jako síla přenášená elektrodami v průběhu svařovacího cyklu do spojovaných dílů. Její možný průběh s ohledem na jednotlivé fáze během bodového svařování zobrazuje Obr. 7. Největší vliv na proces svařování má přítláčná síla elektrod v podobě působení na přechodové odpory. Přechodový odpor mezi svařovanými materiály, i mezi elektrodou a svařovaným materiálem s vyšší přítláčnou silou klesá, což má za následek menší tvorbu tepla. [3; 16; 17]



Obr. 7 - základní pojmy během svařovacího cyklu [3]

Příkladná síla elektrod také ovlivňuje kontaktní plochu elektrod se svařovaným materiálem, což vede ke snížení přechodového odporu. Kromě toho má velikost svarové čocky a pevnost svarového spoje tendenci klesat se zvyšující se přítláčnou silou elektrod nad kritickou hodnotu v důsledku zvětšení kontaktní plochy elektrodových čepiček se svařovaným materiálem, tím snížení proudové hustoty a zvýšení rozptylu tepla. Pokud je přítláčná síla elektrod příliš nízká, dojde vlivem vysokého přechodového odporu mezi materiály k nadměrné tvorbě tepla a poté k rozstřiku roztaveného kovu. Naopak příliš vysoká přítláčná síla elektrod může zapříčinit hluboké vtisky elektrod do materiálu. V rozumné míře však příznivě ovlivňuje strukturu svarové čocky, jelikož (jak již bylo popsáno dříve) dochází k tzv. prokování. [16; 17]

5 Měření veličin v průběhu svařování

Díky správnému měření lze kontrolovat a monitorovat průběh svařování a do budoucna tak zlepšit kvalitu svarových spojů. K měření základních veličin jako je například elektrický proud a elektrické napětí je nezbytně nutné chápat samotný princip fungování svařovacího zdroje. Základem každého zařízení pro bodové svařování je transformátor. Ten rozděluje svařovací stroj na primární a sekundární obvod a slouží pro přeměnění elektrické energie na nízkonapěťový proud o vysoké intenzitě. To se děje za pomoci elektromagnetické indukce. Je tedy zřejmé, že svařovací stroj a jeho okolí jsou nepřátelské prostředí pro přístroje, měřicí zařízení a přenos signálu. To je způsobeno vysokými proudy v průběhu svařování, které mají za následek poměrně silné rušení měřených signálů.

5.1 Měřené veličiny

Mezi veličiny, které lze v průběhu svařování měřit, patří zejména elektrický proud (svařovací proud) a elektrické napětí (napětí na sekundárním obvodu svařovacího zdroje). Tyto dvě veličiny jsou pro monitorování svařovacího procesu společně se svařovacím časem naprosto klíčové. Svařovací čas je při správném měření elektrického proudu pouze odečten, jakožto čas, po který obvodem protéká proud. Pro monitorování a následné řízení svařovacího procesu lze měřit i další veličiny jako je například změna polohy elektrod, akustická emise, teplota ve svaru za pomoci termografie a další. Pro účely této práce však budou měřeny pouze průběhy elektrického proudu, elektrického napětí a velikost přitlačné síly elektrod.

5.1.1 Elektrický proud

Pro měření elektrického proudu v průběhu svařování lze použít tři způsoby měření, přičemž každý ze způsobů přináší pro měření svařovacího proudu jisté výhody i nevýhody. Mezi tyto metody patří použití Rogowského cívky, Hallovy sondy nebo bočníku. [19]

Rogowského cívka

Rogowského cívka je nejpoužívanější způsob měření svařovacího proudu pro vědecké účely. Tato metoda využívá Faradayův zákon elektromagnetické indukce. Jedná se o cívku o známé ploše nejčastěji ve tvaru toroidu, která obklopuje vodiče, kterými prochází svařovací proud. V případě bodového svařování to může být celé rameno svařovacích kleští nebo jedna

z elektrod. Rogowského cívka měří indukované napětí v magnetickém poli, které vzniká průchodem vysokých proudů elektrickým vodičem. Jedná se o nepřímou metodu měření, kde se po integraci získává napěťový signál. Výhodou je snadná instalace cívky, její univerzálnost a rozsah použití. Nevýhodou je, že při změně polohy nebo orientace může dojít ke změně hodnoty naměřeného proudu. [19; 20; 21]

Hallova sonda

Hallova sonda, jak již název napovídá, využívá Hallova jevu. Obdobně jako při použití Rogowského cívky se jedná o nepřímé měření, kde se využívá okolní magnetické pole a výstupem je opět napěťový signál. Hallova sonda je tvořena polovodičovou destičkou, na kterou působí magnetické pole a prochází tak skrz ni indukční tok. Důsledkem toho dochází k přeskupování elektrických nábojů a k následnému hromadění záporného náboje na jedné straně tělesa a kladného náboje na straně druhé. Díky tomu, že póly mají různý potenciál, vzniká Hallovo elektrické napětí. Obdobně jako v předchozím případě je i Hallova sonda náchylná na změnu orientace a polohy. [19]

Bočník

Bočník je málo používaný způsob pro měření svařovacího proudu pro vědecké účely. Jedná se o rezistor, který je součástí svařovacího obvodu a je paralelně zapojený k měřicímu zařízení. To umožňuje měřit větší proudy, než je rozsah připojeného měřícího zařízení. Při použití bočníku je však nutné dbát na pravidla pro potlačení elektrického šumu, především tedy na minimalizaci smyčky tvořené vodiči. Indukované napětí v této smyčce by totiž mohlo výsledný signál snadno poškodit. [19]

5.1.2 Elektrické napětí

Elektrické napětí se měří přímo na svařovacích elektrodách, čehož je docíleno za pomoci dvou elektrických vodičů, které jsou v ideálním případě připojené svorkami přímo na čepičky elektrod. Druhé konce vodičů jsou připojeny ke sběrnici dat o vysoké frekvenci měření. Alternativně lze vodiče připojit i na tělo elektrod, ale pouze za předpokladu, že vodiče budou umístěny co nejbližší k elektrodovým čepičkám. Výhoda umístění vodičů mimo elektrodové

čepičky spočívá v možnosti výměny elektrodových čepiček bez nutnosti demontování vodičů, avšak může tím být ovlivněna přesnost měření. [19; 20; 21]

Napěťový signál získaný na sekundárním obvodu transformátoru je poměrně malý a může být zatížen relativně velkým šumem. Vodiče připojené na elektrodové čepičky tvoří smyčku, která kvůli silnému magnetickému poli vznikajícího v průběhu svařování generuje šum. Ten se může zhoršit, pokud vodiče dále kopírují ramena svařovacích kleští, jak je tomu ve většině průmyslových aplikací. Proto tam, kde je to možné, je v hodné nevést vodiče mimo ramena kleští a zmenšit tak plochu, kterou tvoří tato smyčka. Zmenšením plochy této smyčky lze snížit indukované napětí na poměrně nízkou úroveň. Další metody pro snížení šumu signálu jsou zmíněny v kapitole 5.3. [19; 20; 21]

Další metodou měření elektrického napětí je měření napětí na primárním obvodu transformátoru. Tato metoda se převážně používá v průmyslu, jelikož elektrické napětí na primárním obvodu transformátoru je vyšší než na sekundárním obvodu transformátoru, není tak náchylné na šum a poměr šumu k tomuto napětí je tím pádem výrazně nižší. Problém tohoto měření je však pokles napětí v transformátoru a tím pádem i v celém sekundárním obvodu. Reálné svařovací napětí je tedy menší než napětí naměřené. Tato varianta proto není vhodná pro přesné absolutní měření. [19; 21]

5.1.3 Přítlačná síla elektrod

K měření přítlačné síly elektrod lze přistupovat dvěma způsoby. Prvním je měření, při kterém je měřicí zařízení umístěno místo svařovaných dílů mezi horní a dolní elektrodu. Po spuštění svařovacího procesu (například sešlápnutí nožního pedálu) dojde ke zmáčknutí měřicího zařízení a záznamu průběhu přítlačné síly elektrod. Nevýhodou je však to, že při tomto způsobu dochází pouze k ověření správného nastavení, potažmo přesnosti přítlačné síly elektrod, bez svaření dílu, a tedy i bez reakce na děje v průběhu svařování. Druhou metodou je použití tenzometru či jiných způsobů pro online monitorování přítlačné síly v průběhu svařovacího procesu. Díky tomu lze sledovat reálný průběh přítlačné síly v průběhu svařování a na křivkách průběhu lze poté pozorovat mimo jiné i rychlost adaptace přítlačné síly na posunutí jedné z elektrod, například vlivem rozstříku roztaveného materiálu. [19]

5.2 Vypočtené veličiny

Mezi vypočtené veličiny jsou zařazeny ty veličiny, které nelze přímo měřit a pro jejich určení je nutná znalost výpočetních vztahů. Patří mezi ně dynamický odpor a energie, která byla vnesena do svaru v průběhu svařování.

5.2.1 Vnesená energie

Vnesená energie je v podstatě rovna celkovému teplu, které bylo do svaru vneseno za čas svařování. Výpočet celkového vneseného tepla dle Joulova zákona je definován v kapitole 3.1. Vnesená energie tedy závisí na celkovém dynamickém odporu, svařovacím proudu a svařovacím času. Důležité je se také zamyslet nad velikostí šumu signálu svařovacího proudu. Výsledný průběh vnesené energie může být, vzhledem ke kvadratickému tvaru svařovacího proudu v rovnici pro výpočet vnesené energie, tímto šumem výrazně zatížen.

5.2.2 Dynamický odpor

Dynamický odpor je další veličina, kterou lze při správném měření vypočítat. Opět zde platí, že pokud bude průběh jedné či obou veličin potřebných pro výpočet dynamického odporu výrazně zatížen šumem, projeví se tento šum i na výsledném průběhu dynamického odporu. Výpočet celkového dynamického odporu se provádí vzorcem pro Ohmův zákon a je tedy roven podílu svařovacího napětí a svařovacího proudu. Zde se naráží na problém výpočtu hodnot dynamického odporu na počátku svařování, a tedy na vysoké hodnoty prvotního peaku. Tento problém je blíže popsán v praktické části této práce.

Vzorec pro výpočet dynamického odporu dle Ohmova zákona:

$$R = \frac{U}{I} \cdot 1000 \quad (4)$$

kde R – celkový dynamický odpor [$\mu\Omega$]

I – svařovací proud [A]

U – svařovací napětí [V]

5.3 Elektrický šum a jeho potlačení

Jak již bylo zmíněno, elektrický šum má při snímání veličin v průběhu svařování velký vliv, jelikož poměrně snadno může znehodnotit celé měření. Při správném pochopení vzniku elektrického šumu a dodržení určitých pravidel lze jeho velikost a vliv snížit na přijatelnou úroveň. Elektrický šum vyskytující se při bodovém odporovém svařování lze rozdělit na dva hlavní druhy, a to je elektromagnetický a indukční šum. [19]

Elektromagnetický šum má stejný tvar jako napětí zdroje šumu. Tento šum se projevuje, když postupující elektromagnetická vlna vtlačí své časově proměnlivé napětí na vodič. Projevuje se především při vysokých napětích a nižších proudech. Z toho lze snadno odvodit, že se nejedná o primární zdroj rušení při měření veličin při bodovém odporovém svařování. [19]

Indukční šum je úměrný derivaci napětí zdroje šumu. Dochází k němu, když je smyčka tvořená z vodičů umístěna do časově proměnlivého magnetického pole. Indukované napětí generované ve smyčce je úměrné ploše smyčky, síle magnetického pole a úhlu smyčky k magnetickému poli. Tento vztah popisuje Faradayův zákon elektromagnetické indukce. Indukční šum se projevuje zejména při vysokých proudech a nižších napětích, což je případ i bodového odporového svařování, a má tak na měření veličin výrazný vliv. [19; 21]

Potlačení elektromagnetického šumu lze dosáhnout poměrně snadno, a to použitím kabelu s vnějším zemnicím vodičem, obdobně jako je to u koaxiálního kabelu. Vnější zemnicí vodič pak pohlcuje elektromagnetické vlny a chrání tak dva vnitřní vodiče přenášející signál před vytvářením rušivého napětí. Tento způsob však neposkytuje žádnou ochranu před zachycením indukovaného napětí. Eliminace indukčního šumu je obtížnější než eliminace šumu elektromagnetického. Nejpoužívanější metodou je použití kroucené dvojlinky. Při použití tohoto druhu kabelu je plocha smyčky značně snížena, jelikož jsou vodiče blíže k sobě a pozitivně také přispívá fakt, že úhel smyčky k elektromagnetickému poli je neustále měněn. Mezi další metody potlačení elektrického šumu pak patří například vedení vodičů mimo ramena stroje, přidání kompenzační smyčky nebo diferenciální zapojení vodičů do měřícího zařízení. Těmito způsoby lze snížit celkový elektrický šum blízko k nule. [19; 20; 21]

5.4 Komerčně dostupná měřící zařízení

DENGENSHA – WS-100 (Obr. 8)

Jedná se o malé přenosné zařízení, které umožňuje měření svařovacího proudu, svařovacího času a velikosti přitlačné síly elektrod. Zařízení je vybaveno vnitřní baterií, displejem, možností připojení k PC a pamětí umožňující uložení dat až pro 10 000 svarů. Lze s ním měřit na svařovacích zařízeních s AC, DC a MFDC zdrojem. [22]



Obr. 8 - DENGENSHA – WS-100 [22]

ENTRON – WA2 (Obr. 9)

Opět jde o malé přenosné zařízení, které umožňuje měření svařovacího proudu a svařovacího času. Zařízení však nedisponuje měřením velikost přitlačné síly elektrod. Obdobně jako v předchozím případě je i toto zařízení vybaveno vnitřní baterií, displejem, možností připojení k PC a pamětí umožňující ukládání dat. Je možné ho připojit i k osciloskopu. Lze s ním měřit na svařovacích zařízeních s AC, DC a MFDC zdrojem. [22]



Obr. 9 - ENTRON – WA2 [22]

WELDING TECHNOLOGY CORPORATION – The Wave (Obr. 10)

The Wave je další malé přenosné zařízení, které umožňuje měření svařovacího proudu, svařovacího času, ale i napětí na sekundárním obvodu. Analogicky jako předchozí zařízení je také vybaveno vnitřní baterií, displejem, možností připojení k PC a pamětí umožňující ukládání dat až pro 10 000 svarů. Lze s ním měřit na svařovacích zařízeních s AC, DC a MFDC zdrojem. [22]



Obr. 10 - WELDING TECHNOLOGY CORPORATION – The Wave [22]

MIYACHI UNITEK – MM-315B (Obr. 11)

Jedná se o model z řady měřících zařízení pro bodové svařování od firmy MIYACHI UNITEK. Zařízení tohoto modelu je malé a přenosné a umožňuje pouze měření svařovacího proudu a svařovacího času. Jiné modely však mohou disponovat i měřením napětí či přitlačné síly elektrod. Obdobně jako v předchozích případech je toto zařízení (model MM-315B) také vybaveno vnitřní baterií, displejem, nedisponuje ale možností připojení k PC a má pouze nízkou paměť pro ukládání dat. Jiné modely měřících zařízení od společnosti MIYACHI UNITEK mohou nabídnout více možností, avšak při větších rozměrech. S tímto zařízením lze opět měřit na svařovacích zařízeních s AC, DC a MFDC zdrojem. [22]



Obr. 11 - MIYACHI UNITEK – MM-315B [22]

TECNA – TE1700C (Obr. 12)

Analyzátor TECNA – TE1700C je zařízení mírně větších rozměrů než v předchozích případech. Použitím různých přípojných sond s ním lze měřit svařovací proud, napětí na sekundárním obvodu, přítlačnou sílu elektrod, vnesenou energii a dynamický odpor. Zařízení je vybaveno baterií, takže je také přenosné, a nechybí ani velký dotykový LCD displej 5,7“, který slouží pro samotné ovládání. Zařízení je opatřeno rozhraním ethernet a Wi-Fi, skrze které je možné přístroj konfigurovat nebo vizualizovat měření na smartphonu, tabletu nebo PC. Pro přenos naměřených dat lze použít USB 2.0. V paměti může být uchováváno až 30 000 měřených svarů a posledních 100 lze zobrazit přímo na displeji zařízení. Nespornou výhodou je i zobrazení průběhu jednotlivých měřených veličin v průběhu svařování, a to buď přímo na displeji, nebo posléze v PC pomocí přenesených dat z USB flash disku. Další popis včetně praktických poznatků pro realizaci experimentu je pospán v kapitole 6.3. [22; 23]



Obr. 12 - TECNA – TE1700C [22]

6 Návrh experimentu

U bodového odporového svařování je nejdůležitější veličinou pro vznik svarové čočky, jak již název napovídá, dynamický odpor. Ten je složen z několika dílčích odporů a je proměnlivý v čase. Jednotlivé složky a výpočet dynamického odporu jsou blíže popsány v teoretické části této práce. I přes jeho velkou důležitost se průběhem dynamického odporu v závislosti na svařovacích parametrech doposud zabývalo pouze několik málo studií. Tento experiment si klade za cíl blíže poznat chování dynamického odporu při bodovém svařování v závislosti na změně velikosti přitlačné síly elektrod a analyzovat i vliv opotřebení elektrodoých čepiček na změnu průběhu dynamického odporu. Základním požadavkem pro zkoumání chování dynamického odporu je správné měření, které však může být i v dnešní době poměrně problematické. Z tohoto důvodu je v experimentální části popsána i část spojená s měřením dynamického odporu v průběhu svařování a úskalí při měření.

6.1 Popis experimentu

Při experimentu bylo pomocí počítače připojeného ke středofrekvenčnímu odporovému lisu DALEX PMS 11-4 měněno nastavení velikosti přitlačné síly elektrod. Hodnoty přitlačných sil (viz Tab. 1) byly zvoleny na základě experimentálního testování ještě před samotným experimentem, tedy v plném rozsahu stroje. Optimální hodnoty přitlačných sil elektrod jsou pro materiál DC 05 + ZE – 2,0 V a pro materiál HX 180 BD + Z100 – 2,4 V. Z těchto hodnot vycházejí i další hodnoty přitlačných sil, které jsou odstupňovány vždy o hodnotu 1,2 V (optimální hodnoty se nenachází ve středu zvolené řady). Přitlačnou sílu nelze nastavit v jednotkách síly (N, kN...), ale nastavuje se ve voltech (V). Tato hodnota je rovna tlaku vzduchu ve válci v barech (bar) a její přesné určení v kilonewtonech (kN) je definováno v kapitole 7.2.

Tab. 1 - nastavení svařovacích parametrů pro materiály DC 05 + ZE a HX 180 BD + Z100

DC 05 + ZE			HX 180 BD + Z100		
I [kA]	P [V]	t [ms]	I [kA]	P [V]	t [ms]
6 (23,5 %)	0,8	200	7 (24,0 %)	1,2	240
	2,0			2,4	
	3,2			3,6	
	4,4			4,8	
	5,6			6,0	

Pro experiment byly použity dva materiály ze dvou různých skupin ocelí. Jedná se o materiál DC 05 + ZE a materiál HX 180 BD + Z100. Tyto materiály byly dodány ve formě plechů, ze kterých byly nastříhány vzorky o rozměrech:

- a) 120 x 45 mm – Vzorky určené pro záznam veličin v průběhu svařování, mechanizovanou zkoušku stříhem a měření průměrů svarových čoček.
- b) 60 x 45 mm – Poloviční vzorky určené pro záznam veličin v průběhu svařování, vizuální kontrolu, zkoušku ultrazvukem a metalografickou zkoušku.
- c) 600 x 600 mm – Větší přístřihy plechů s narýsovanou čtvercovou sítí 30 x 30 mm určené pro svary v procesu opotřebování. Tyto svary byly provedeny pouze za účelem získání opotřebovaných kontaktních ploch elektrodových čepiček.

Pro každé nastavení přitlačné síly a pro každý materiál byly svařeny vzorky v pěti skupinách po šesti vzorcích, tj. 5 x (5 vzorků 120 x 45 mm + 1 vzorek 60 x 45 mm) a mezi nimi byly prováděny svary pouze na opotřebení. Číslování svarů je přehledněji zpracováno v Tab. 2. Díky tomuto rozdělení bylo možné porovnat jak závislost dynamického odporu na různém nastavení přitlačné síly elektrod, tak i na opotřebení elektrodových čepiček. Pro každé nastavení přitlačné síly elektrod byla použita jedna sada elektrodových čepiček.

Tab. 2 - číslování svarů pro jedno nastavení a jeden materiál

Číslo svaru	Typ vzorku
1, 2, 3, 4, 5, 6	5x vzorek 120 x 45 mm + 1x vzorek 60 x 45 mm
...	svary na opotřebení (celkem 34 svarů)
41, 42, 43, 44, 45, 46	5x vzorek 120 x 45 mm + 1x vzorek 6 x 45 mm
...	svary na opotřebení (celkem 34 svarů)
81, 82, 83, 84, 85, 86	5x vzorek 120 x 45 mm + 1x vzorek 60 x 45 mm
...	svary na opotřebení (celkem 34 svarů)
121, 122, 123, 124, 125, 126	5x vzorek 120 x 45 mm + 1x vzorek 60 x 45 mm
...	svary na opotřebení (celkem 34 svarů)
161, 162, 163, 164, 165, 166	5x vzorek 120 x 45 mm + 1x vzorek 60 x 45 mm

Svařené vzorky byly popsány typem materiálu, velikostí přitlačné síly elektrod a číslem svaru, aby nedošlo k jejich záměně při jejich vyhodnocování a další manipulaci.

6.2 Použité materiály

Pro experiment byly použity dva materiály z odlišných materiálových skupin, které jsou však z hlediska odporové svažitelnosti totožné. Podstatným rozdílem je však to, že se liší typem povlaku, který má na odporovou svažitelnost výrazný vliv. Jedná se o materiál DC 05 + ZE a materiál HX 180 BD + Z100. Tyto dva materiály byly zvoleny především proto, že by každý z nich měl vykazovat odlišný průběh dynamického odporu v čase a tím pádem i různou závislost dynamického odporu na přítláčné síle. Jedná se o materiály různých dílů karosérií v automobilovém průmyslu, tedy dílů, na které je v průmyslu bodové svařování hojně používáné.

DC 05 + ZE

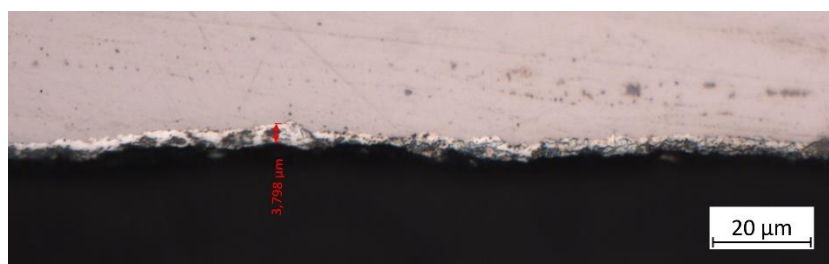
Materiál DC 05 +ZE je hlubokotažná ocel vhodná pro tváření za studena. Tato ocel se nejčastěji využívá v automobilovém průmyslu pro tvarově velmi složité díly. Chemické složení oceli DC 05 + ZE je uvedeno v Tab. 3 a mechanické vlastnosti v Tab. 4. Tloušťka použitého plechu je 0,7 mm a jeho povrch je opatřen galvanickým zinkem o tloušťce 4 μm (viz Obr. 13). [24]

Tab. 3 - chemické složení oceli DC 05 + ZE [24]

C [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]
$\leq 0,06$	$\leq 0,35$	$\leq 0,025$	$\leq 0,025$

Tab. 4 - mechanické vlastnosti oceli DC 05 + ZE [24]

Rm [MPa]	Re [MPa]	A ₈₀ [%]
270-330	180-200	39-40



Obr. 13 - povlak oceli DC 05 + ZE (zvětšení 500x)

HX 180 BD + Z100

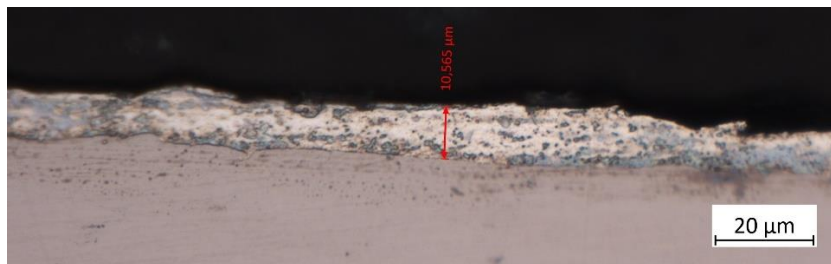
Materiál HX 180 BD + Z100 patří do skupiny vysokopevnostních ocelí. Tyto oceli jsou válcované za studena a hodí se například na disky kol či panely podlah karosérie automobilů. Chemické složení oceli HX 180 BD + Z100 je uvedeno v Tab. 5 a mechanické vlastnosti v Tab. 6. Tloušťka použitého plechu je 0,6 mm a jeho povrch je opatřen žárovým zinkem o tloušťce 11 μm (viz Obr. 14) a tenkou vrstvou heptahydrátu síranu zinečnatého. [25]

Tab. 5 - chemické složení oceli HX 180 BD + Z100 [25]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Nb [%]	Ti [%]	Al [%]
$\leq 0,1$	$\leq 0,5$	$\leq 0,7$	$\leq 0,06$	$\leq 0,025$	$\leq 0,09$	$\leq 0,12$	$\geq 0,1$

Tab. 6 - mechanické vlastnosti oceli HX 180 BD + Z100 [25]

Rm [MPa]	Rp _{0,2} [MPa]	A ₈₀ [%]
290-360	180-240	34



Obr. 14 - povlak oceli HX 180 BD + Z100 (zvětšení 500x)

6.3 Zařízení použité pro svařování a záznam

Středofrekvenční odporový lis DALEX PMS 11-4

Pro svaření vzorků byl použit středofrekvenční odporový lis DALEX PMS 11-4 (viz Obr. 15). Jedná se o běžný odporový lis pro bodové svařování, který jako zdroj energie využívá stejnosměrný proud středních frekvencí (MFDC – Medium Frequency Direct Current). Díky tomuto zdroji se docílí snížení špičkového proudu a rovněž se i zkrátí čas svařování tím, že se eliminuje stav chlazení mezi cykly. Při svařování pomocí MFDC je střídavý proud prostřednictvím invertoru převeden ze síťové frekvence 60 Hz na frekvenci 1000 Hz a poté je přiveden na svařovací transformátor. Na jeho sekundárním obvodu je poté proud prostřednictvím chlazených diod usměrněn na stejnosměrný proud. Díky takto vysoké frekvenci lze svařovací proud v průběhu svařovacího procesu rychle a přesně regulovat a rovněž se díky tomu dosahuje nižšího opotřebení elektrod a vyšší úspory energie. [26; 27]

Řízení svařovacího procesu u tohoto zařízení spočívá v zadání známých a optimalizovaných svařovacích parametrů pro daný materiál a jeho jmenovitou tloušťku. Mezi zadávané parametry patří zejména svařovací proud, svařovací čas a přitlačná síla elektrod. Po nastavení svařovacích parametrů se provedou první tři testovací (tzv. učící) svary, při kterých si řídicí jednotka mírně reguluje proces svařování a ukládá ho do databáze. Při dalším svařování se pak vychází z těchto uložených hodnot.



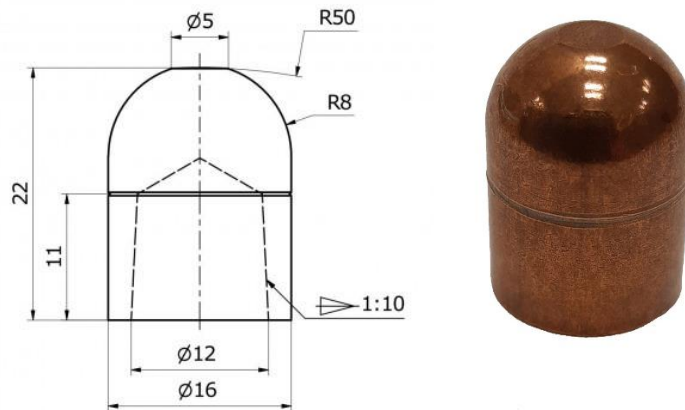
Obr. 15 - středofrekvenční odporový lis DALEX PMS 11-4

Elektrodové čepičky 39D 1978-2

Pro experiment byly použity standartní elektrodové čepičky pro automobilový průmysl 39D 1978-2 z materiálu CuCr1Zr. Pro každé nastavení přitlačné síly a materiál byla pro eliminaci vlivu opotřebení kontaktní plochy použita samostatná sada elektrodových čepiček. Chemické složení elektrodových čepiček je zobrazeno v Tab. 7. Schéma a reálná fotografie těchto elektrodových čepiček je vyobrazena na Obr. 16.

Tab. 7 - chemické složení elektrodových čepiček 39D 1978-2 [28]

Cu [%]	Cr [%]	Zr [%]
98,98	0,9	0,12



Obr. 16 - schéma a reálná fotografie elektrodových čepiček 39D 1978-2 [29]

Analyzátor TECNA – WELD TESTER TE1700C

Pro záznam dynamického odporu, potažmo svařovacích parametrů, v průběhu svařování vzorků byl použit analyzátor TECNA – WELD TESTER TE1700C, který je popsán v teoretické části této práce. Jedná se o univerzální a přenosné zařízení, které slouží k zaznamenávání průběhů veličin při procesu odporového svařování, se zdrojem proudu AC, DC, MFDC, či CD. Mezi zaznamenávané veličiny patří svařovací proud, svařovací napětí, svařovací čas, dynamický odpor, vnesená energie a přitlačná síla elektrod. Tyto veličiny mohou být zobrazeny či vykresleny v podobě grafu přímo na display zařízení, nebo je lze exportovat v CSV souborech. Záznamu je docíleno použitím různých druhů sond měřících svařovací proud a napětí (respektive i čas), ze kterých jsou poté dopočítány ostatní veličiny. Záznam přitlačné síly se provádí pomocí samostatné sondy, která se vkládá mezi elektrodové čepičky.

7 Vyhodnocení experimentu

Před samotným svařováním vzorků bylo provedeno ověření nastavení velikosti přitlačné síly elektrod. Podstatnou část tvořila různá úskalí při měření a jejich řešení tak, aby byla zajištěna správnost zaznamenávaných dat v průběhu svařování. Svařování vzorků probíhalo postupně dle předem připraveného plánu od nejnižšího nastavení přitlačné síly elektrod až po nejvyšší, a to nejprve pro jeden a poté pro druhý materiál. Pro každé nastavení přitlačné síly elektrod byla použita nová sada elektrodových čepiček a všechny svařené vzorky byly ihned po svaření přehledně popsány. Při svařování byly zaznamenávány průběhy veličin na analyzátoru TECNA. Po svaření všech vzorků byla zpracována data naměřená v průběhu svařování a dále byly vzorky podrobeny vizuální kontrole povrchových vad, zkoušce ultrazvukem, metalografické zkoušce, mechanizované zkoušce stříhem a také byly na roztržených vzorcích měřeny průměry svarových čoček. Všechna zaznamenaná data byla následně v souvislostech vyhodnocena.

7.1 Úskalí při měření a ověření správnosti měření

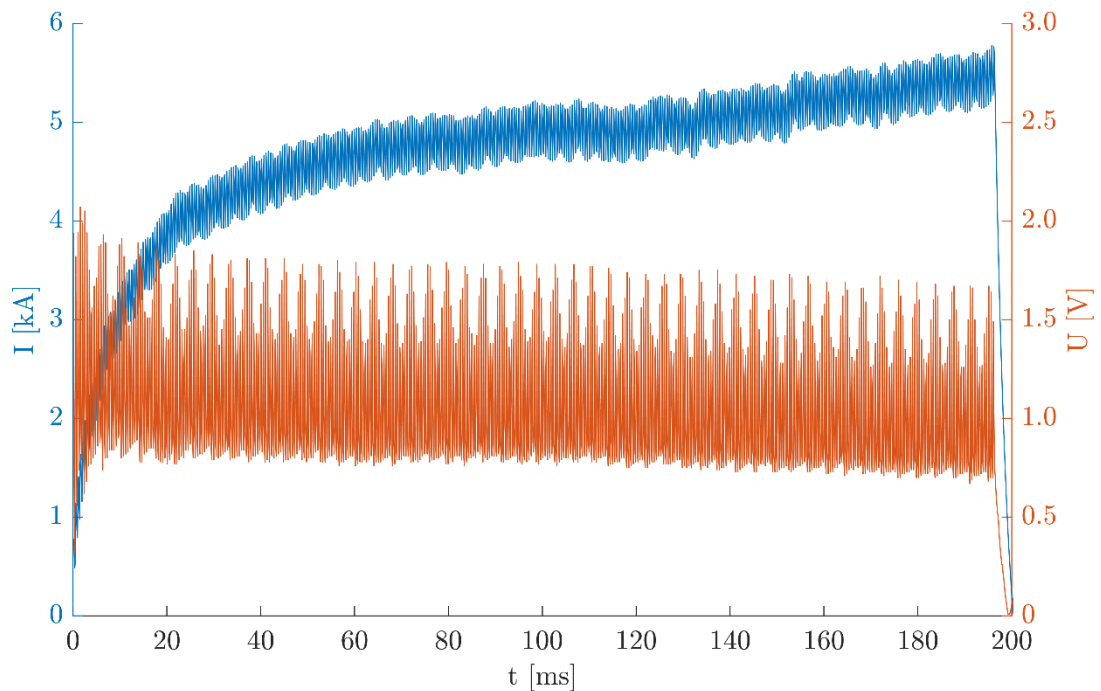
Jak již bylo zmíněno, záznamu veličin v průběhu svařování bylo docíleno pomocí analyzátoru TECNA – WELD TESTER TE1700C. Při prvním pokusu o experiment však byla nalezena softwarová chyba zařízení (SW 2.7.5.). Ve vygenerovaných CSV souborech byl dynamický odpor zaznamenán pouze do hodnoty 286 $\mu\Omega$. Dynamický odpor, který převyšoval tuto hodnotu, byl nahrazen hodnotou 0 $\mu\Omega$. To mělo za následek znehodnocení celého experimentu. Chyba softwaru byla po komunikaci s výrobcem odstraněna. Po nahrání nové verze softwaru do přístroje však nebyl průběh dynamického odporu již tak hladký, jak tomu bylo původně. Nicméně průběh správně korespondoval s výpočtovým vztahem pro dynamický odpor.

V druhé verzi softwaru (SW 2.7.7.) byla chyba ve výpočtu dynamického odporu odstraněna, ale tentokrát nekořespondoval průběh vnesené energie s předchozí verzí softwaru. Oproti původnímu průběhu vnesené energie byla aktuální vnesená energie vynesena v podstatě pouze v polovičním čase svařování a poté byla nulová s tím, že maximální hodnoty vnesené energie při stejném nastavení svařovacích parametrů si byly rovny v obou verzích softwaru.

Po komunikaci s výrobcem byla chyba výpočtu vnesené energie odstraněna a výrobce tedy dodal již třetí verzi softwaru (SW 2.7.8.). V této třetí verzi softwaru bylo ale zjištěno, že ani jeden z průběhů vnesené energie v předchozích verzích softwarů nekorespondoval s výpočtovým vztahem pro vnesenou energii v průběhu svařování. Průběh vnesené energie byl zcela rozdílný a dosahoval hodnot naprosto odlišných od předchozích verzí softwaru. Po těchto zkušenostech bylo rozhodnuto, že pro korektní měření je nutné provést ověření správnosti měření zařízením TECNA – WELD TESTER TE1700C pomocí vlastního měření či pro experiment využít vlastní měřicí zařízení a software.

Proto byl navržen vlastní měřicí systém, založený na zařazení pro sběr dat NATIONAL INSTRUMENTS USB-6363. Svařovací napětí bylo měřeno pomocí stíněné kroucené dvojlinky, která byla pomocí svorek připevněna na elektrody co nejbližší k elektrodovým čepičkám. Pro záznam svařovacího proudu byla použita jedna z cívek, které byly dodány společně se zařízením TECNA. Dále bylo využito diferenciálního zapojení a byly využity znalosti načerpané v teoretické části této práce, tak aby byl maximálně potlačen elektrický šum. Zatímco měření napětí je při dodržení několika základních pravidel v podstatě bezproblémové (i díky jeho nízké hodnotě), tak měření svařovacího proudu činilo drobné obtíže, jako je například experimentální zjišťování převodové konstanty, jelikož výstup z cívky měřicí svařovací proud je ve voltech (V) a musí být převeden na správné jednotky proudu tedy na ampéry (A). Při splnění všech podmínek tedy bylo možné provést samotné měření, přičemž záznam svařovacích parametrů v průběhu svařování byl proveden za pomoci skriptu v programu MATLAB.

Při vlastním měření na zařazení NATIONAL INSTRUMENTS USB-6363 bylo zjištěno, že průběh svařovacího proudu i napětí je shodný s průběhem ze zařízení TECNA – WELD TESTER TE1700C. Tato data jsou tedy důvěryhodná, a tak bylo pro experiment, vzhledem ke snazší manipulaci s daty při svařování velkého množství vzorků a samotné jednoduchosti měření, použito zařízení TECNA – WELD TESTER TE1700C s poslední verzí softwaru tedy SW 2.7.8. Typický průběh svařovacího proudu i napětí je zobrazen v grafu níže (Graf 1) .

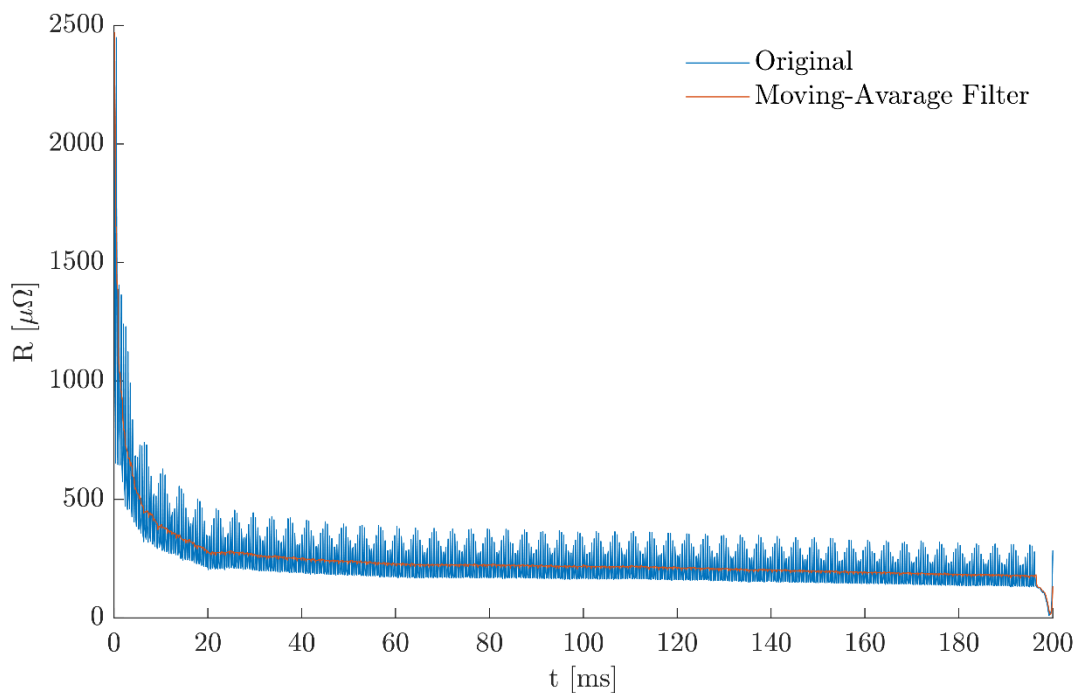


Graf 1 - typický průběh svařovacího proudu a napětí (materiál DC 05 + ZE)

Vlastním měřením také bylo zjištěno, že vzhledem k výpočtu dynamického odporu ze svařovacího proudu a napětí a vzhledem ke kolísání průběhu jak svařovacího proudu, tak i svařovacího napětí přichází problém výpočtu dynamického odporu na začátku svařování, kde hodnoty svařovacího proudu i napětí mohou být blízké nule. Pokud se tedy dělí svařovací napětí svařovacím proudem, který je blízký nule, výsledný dynamický odpor (tedy jeho prvotní peak) dosahuje závratných hodnot. Výsledná hodnota prvotního peaku dynamického odporu je tedy silně závislá na tom, v jakém čase začne docházet k záznamu. Porovnávání hodnot prvotního peaku dynamického odporu poté může při nedodržení stejných podmínek záznamu zcela postrádat význam.

Pro účely této práce (porovnávání několika průběhů dynamického odporu v závislosti na různých proměnných) bylo vzhledem ke kolísání hodnot nutné naměřená data filtrovat. Důležité je také poznamenat, že kolísání hodnot závisí na druhu zdroje energie a na frekvenci na které operuje, a tak při svařování na jiném zařízení nemusí kolísání dosahovat takto vysokého rozpětí. Původně byl pro filtrování hodnot dynamického odporu použit nekauzální filtr, tzv. Zero-Phase Filter (filtr s nulovým posunutím fáze), ale tento filtr nepříznivě ovlivňoval počátek průběhu dynamického odporu, jelikož na začátku svařování dochází ke skokové

změně. Pokud však byl tento filtr použit při vlastním měření, kde nedochází ke skokové změně a hodnoty dynamického odporu (potažmo svařovacího proudu a napětí) jsou zaznamenávány i před začátkem svařování, tento filtr přinášel velmi hladký a příznivý průběh dynamického odporu. Avšak při práci s naměřenými daty ze zařízení TECNA jsou k dispozici data až od určité doby svařování a není tak možné tento filtr použít tak, aby přinesl očekávaný výsledek. Pro filtraci na zařízení TECNA bylo tedy nutné použít jiný filtr a tím byl poměrně jednoduchý tzv. Moving-Average Filter (filtr klouzavého průměru). Při použití periody 4 poskytoval slušný a pro účely této práce zcela dostačující výsledek bez ovlivnění průběhu křivky. Tento filtr byl nakonec použit pro všechny naměřené průběhy dynamického odporu v této práci. Rozdíl mezi originálními a filtrovanými průběhy lze pozorovat na grafu níže (Graf 2).



Graf 2 - porovnání nefiltrovaných a filtrovaných hodnot dynamického odporu (materiál DC 05 + ZE)

Problematika měření a filtrace naměřených dat při bodovém odporovém svařování je velmi rozsáhlé téma, kterým by se dalo dlouze zabývat, nicméně pro tuto práci jsou tyto poznatky zcela dostačující, jelikož se práce věnuje především zkoumáním průběhu dynamického odporu. I přesto tvořila úskalí spojená s poznáním správnosti měření velkou část (více než polovinu) této práce.

7.2 Ověření nastavení velikosti přitlačné síly

Před samotným experimentem (tedy před svařením všech vzorků) bylo také nezbytné ověřit přesnost nastavení přitlačné síly elektrod. V programu řízení stroje (SER) se skrze připojený notebook nastavuje přitlačná síla elektrod zápisem požadované hodnoty do kolonky „analog output 1“, přičemž jednotkou pro tuto hodnotu je volt (V). Původním předpokladem dle dřívějšího popisu od dodavatele bylo, že jeden volt (V) je roven jednomu kilonewtonu (kN) přitlačné síly elektrod. Při dalším rozboru však bylo zjištěno, že tento předpoklad neplatí a že nastavená hodnota je rovna tlaku vzduchu ve válci ovládajícím pohyb horní elektrody v barech (bar).

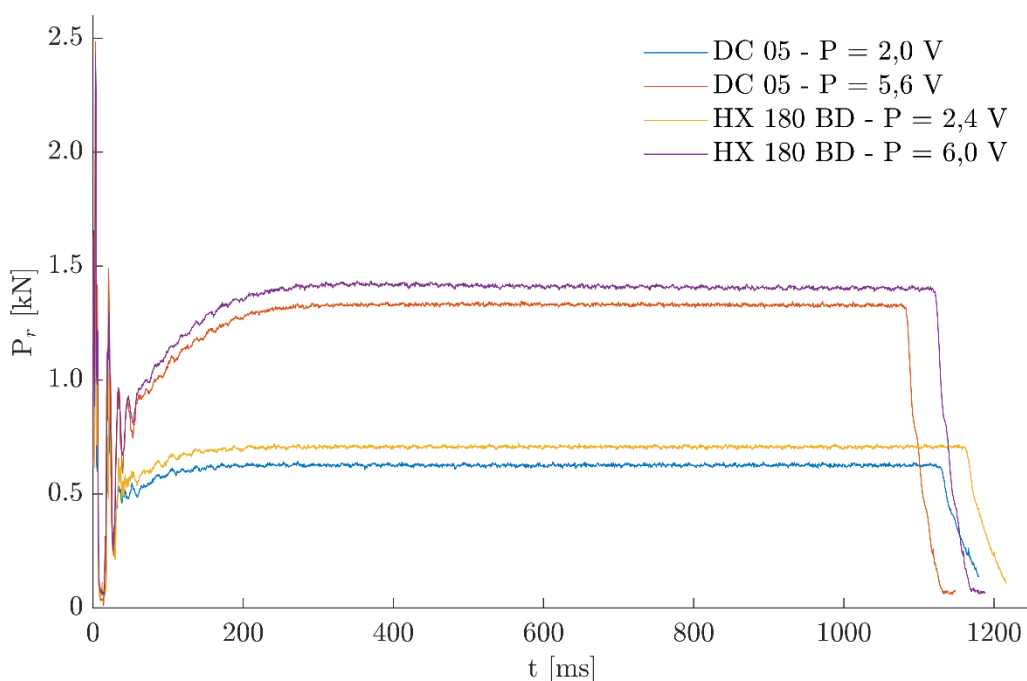
Pohyb horní elektrody je zajištěn pomocí pneumatického válce. Reálnou přitlačnou sílu elektrod lze tedy jednoduše dopočítat skrze průměr, respektive plochu pístu, nicméně by se vypočtená hodnota mohla výrazně lišit od skutečné hodnoty, jelikož zde vstupují i další aspekty, jako je například tření a hmotnost pohyblivých částí válce. Pro korektní určení reálné přitlačné síly elektrod bylo využito externí měřící zařízení TECNA – WELD TESTER TE1700C, které disponuje i snímači pro měření přitlaku viz Obr. 17.



Obr. 17 - měření přitlačné síly pomocí snímače TECNA

Ještě před měřením přitlačné síly bylo za pomoci závaží o známé hmotnosti ověřeno, zda zařízení měří správně. Pro každé nastavení přitlačné síly elektrod bylo poté provedeno 25měření a naměřená data byla vyexportována a zpracována. Příklad průběhu reálné přitlačné síly elektrod v čase je zobrazen na následujícím grafu (Graf 3). V grafu jsou pro přehlednost zobrazeny pouze optimalizované a maximální hodnoty přitlačných sil pro oba materiály.

V první části grafu je vidět ráz způsobený dorazem elektrody, který je víceméně shodný pro všechna nastavení přitlačné síly. Po uklidnění od rázu síla postupně narůstá se zpomalujícím trendem, a to až do ustálené hodnoty. I když při měření přitlačné síly nedocházelo ke svaření vzorků, celkový čas odpovídá době přitlaku. Z grafu je patrné, že pro průchod proudem je zde dostatečný prostor po ustálení i s následným časem prokování po vypnutí proudu. Tento cyklus byl popsán v teoretické části této práce.



Graf 3 - příklady průběhů reálné přitlačné síly elektrod v čase

Hodnoty z ustálené části byly zaneseny do tabulky a ze všech naměřených hodnot pro dané nastavení přitlačné síly byla poté vypočtená průměrná hodnota reálné přitlačné síly (viz Tab. 8 pro materiál DC 05 + ZE a Tab. 9 pro materiál HX 180 BD + Z100). Rozptyl jednotlivých hodnot od hodnot průměrných se běžně pohyboval v rozmezí 3 % a při použití nízkých přitlačných sil dosahoval tento rozptyl maximálně 6 %.

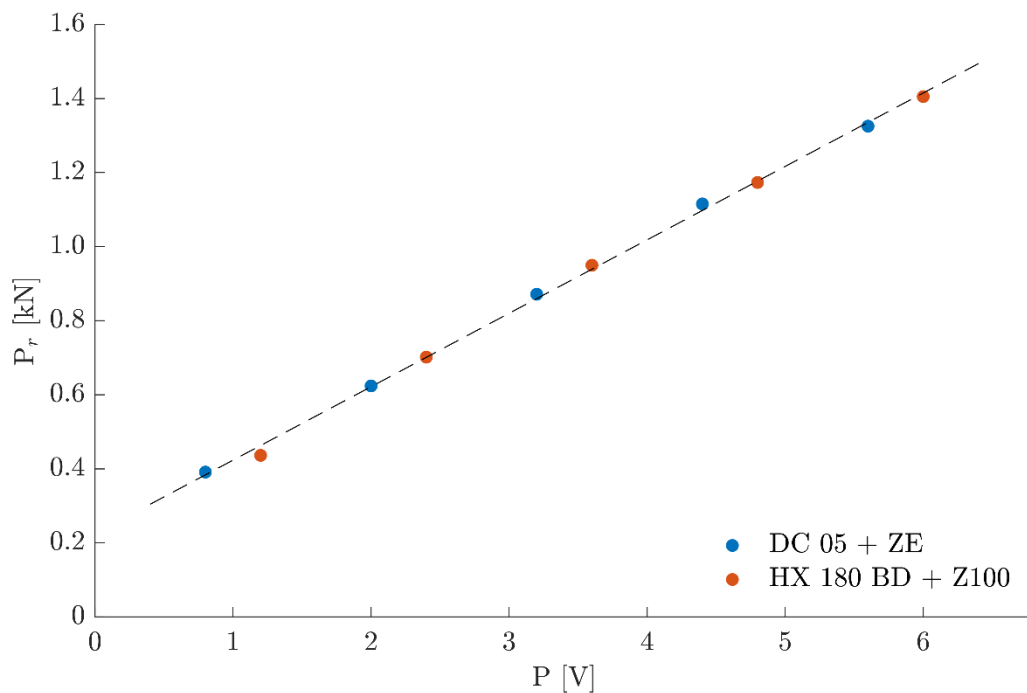
Tab. 8 - průměrné hodnoty reálných přitlačných sil elektrod pro materiál DC 05 + ZE

Nastavená přitlačná síla elektrod P [V]	0,8	2,0	3,2	4,4	5,6
Reálná přitlačná síla elektrod P_r [kN]	0,39	0,62	0,87	1,12	1,33

Tab. 9 - průměrné hodnoty reálných přitlačných sil elektrod pro materiál HX 180 BD + Z100

Nastavená přitlačná síla elektrod P [V]	1,2	2,4	3,6	4,8	6,0
Reálná přitlačná síla elektrod P_r [kN]	0,44	0,70	0,95	1,17	1,41

Po zanesení průměrných hodnot do grafu (Graf 4) bylo možné tyto data proložit přímkou. Tato přímka nemá svůj počátek v nule, ale je posunutá v kladném směru osy y. To lze vysvětlit gravitační silou působící na pohyblivé části, na kterých je uchycena horní elektroda. Toto tvrzení podporuje i fakt, že při vypnutém přívodu tlakového vzduchu postupně horní elektroda klesá až do dotyku s dolní elektrodou.



Graf 4 - průměrné hodnoty přitlačných sil elektrod a lineární proložení těchto dat

Předpis přímky proložených dat:

$$P_r = 0,20 \cdot P + 0,23 \quad (5)$$

kde P_r – reálná přitlačná síla elektrod [kN]

P – přitlačná síla elektrod [V]

7.3 Naměřené závislosti dynamického odporu

Průběhy dynamického odporu byly naměřeny na zařízení TECNA – WELD TESTER TE1700C (SW 2.7.8.) a následně byla naměřená data zpracována do přehledných grafů. Jednotlivé průběhy jsou rozděleny do grafů popisujících vliv přitlačné síly elektrod na dynamický odpor a do grafů popisujících vliv opotřebení elektrod na dynamický odpor. V následujících dvou kapitolách je prezentován vždy jeden vybraný (vzorový) graf pro každý materiál a daný vliv, přičemž všechny zbylé grafy jsou součástí přílohy části této práce.

7.3.1 Vliv přitlačné síly elektrod na dynamický odpor

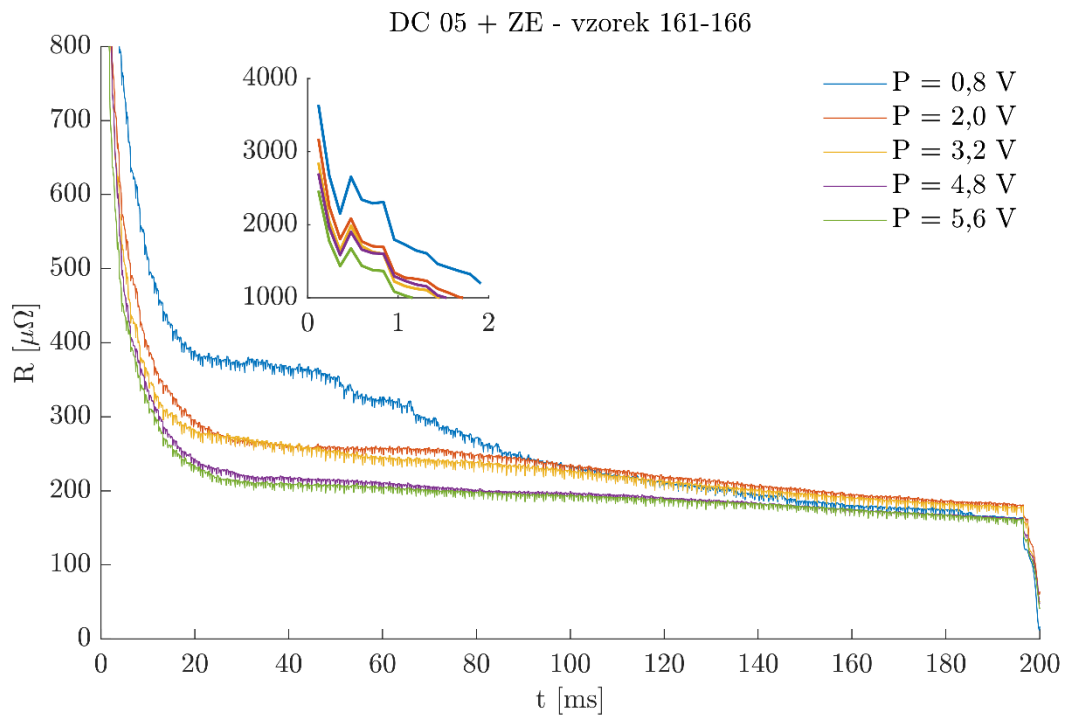
Zde jsou pro přehlednost uvedeny pouze vybrané grafy průběhů dynamického odporu v závislosti na přitlačné síle, kde každá křivka je tvořena průměrem šesti naměřených průběhů pro dané nastavení přitlačné síly elektrod, skupinu opotřebení a materiál. Pro materiál DC 05 + ZE je to Graf 5 a pro materiál HX 180 BD + Z100 je to Graf 6.

Prvotní peak, který není na grafech zobrazen celý, ale lze ho pozorovat v detailu, je především tvořen přechodovým odporem mezi svařovanými materiály (částečně i mezi elektrodou a materiálem). Při použití nižších přitlačných sil byla ve většině případů hodnota prvotního peaku vyšší než při použití vyšší přitlačné síly. Toto koresponduje s literaturou (viz teoretická část této práce), jelikož na počátku svařování jsou zde pouze malé kontaktní plochy, až posléze se tyto plochy zvětšují a dochází tak k poklesu dynamického odporu. Rozdíl hodnot prvotních peaků lze pozorovat především u materiálu DC 05 + ZE, kde se maximální hodnoty pohybovaly ve větším rozmezí než u materiálu HX 180 BD + Z100. Nicméně se zde vyskytly i případy (například vzorový graf pro materiál HX 180 BD + Z100), kde pozice prvotních peaku nekorespondovala s tímto tvrzením. Důvodem je to, že přechodový odpor výrazně závisí (mimo jiné) na čistotě a drsnosti povrchů. Vliv čistoty povrchu pak může poměrně snadno překonat vliv přitlačné síly, především pokud je přitlačná síla elektrod poměrně nízká.

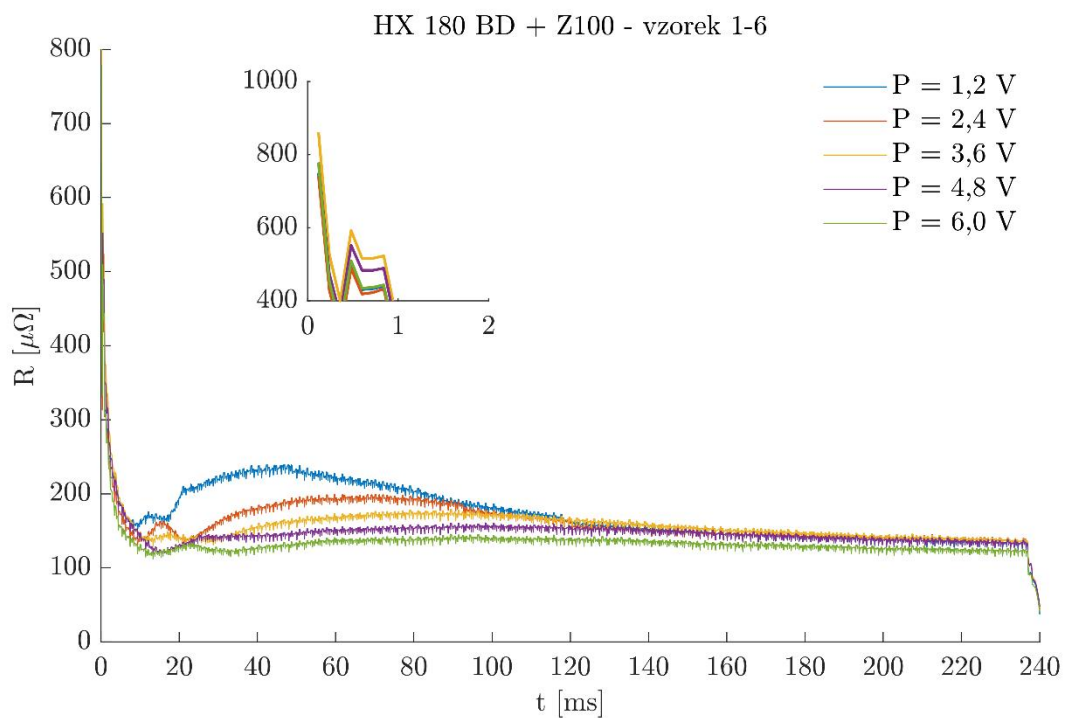
Po prvním peaku přechodový odpor mezi materiály prudce klesá a poté postupně zaniká. Při poklesu dochází k průrazu povrchových vrstev, dále k měknutí stykových ploch a s narůstající teplotou i k prvotnímu natavení svařovaného materiálu. S rostoucí teplotou však roste odpor svařovaného materiálu. To lze pozorovat především na grafech materiálu

HX 180 BD + Z100. S nižší přítlačnou silou lze i v tomto místě pozorovat vyšší hodnoty dynamického odporu, než je tomu při použití vyšší přítlačné síly. Toto lokální maximum tvořené narůstajícím odporem materiálu je při použití vyšší přítlačné síly posunutá doprava (ve směru toku času). To je způsobeno tím, že s nižším prvotním přechodovým odporem docházelo k méně výraznému nárůstu teploty a tím i k pomalejšímu nárůstu odporu svařovaného materiálu. S následným poklesem dynamického odporu po tomto lokálním maximu je spojený i růst svarové čočky a dále mechanický kolaps.

U materiálu HX 180 BD + Z100 lze pozorovat i drobné lokální maximum cca kolem času 18 ms (opět v závislosti na přítlačné síle elektrod). Toto lokální maximum vzniklo vlivem narůstající teploty povlaku žárového zinku a s tím spojeným nárůstem odporu materiálu povlaku. Poloha tohoto maxima je dána nižší teplotou tavení zinku než základního materiálu.



Graf 5 - vliv přitlačné síly na dynamický odpor pro materiál DC 05 + ZE (vzorový graf ze skupiny opotřebení – vzorek 161-166)



Graf 6 - vliv přitlačné síly na dynamický odpor pro materiál HX 180 BD + Z100 (vzorový graf ze skupiny opotřebení – vzorek 1-6)

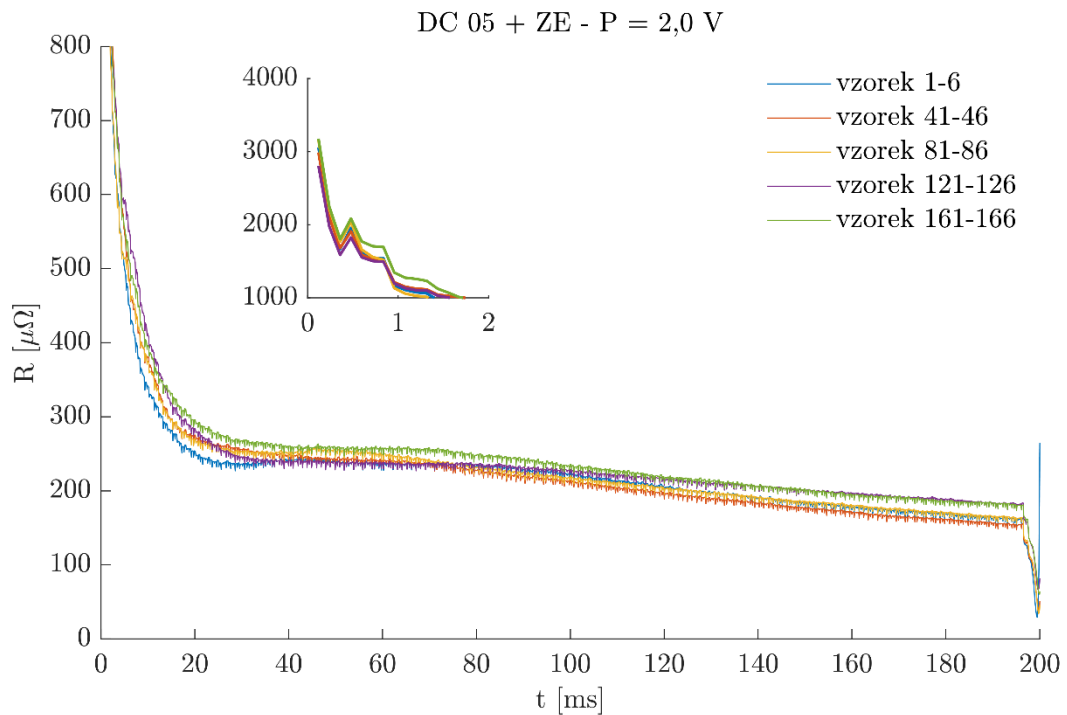
7.3.2 Vliv opotřebení elektrodových čepiček na dynamický odpor

Obdobně jako v předchozím případě jsou zde pro přehlednost uvedeny pouze vybrané grafy průběhů dynamického odporu, tentokrát v závislosti na opotřebení elektrodových čepiček, kde každá křivka je tvořena průměrem všech šesti naměřených průběhů dynamického odporu pro dané nastavení přitlačné síly, skupinu opotřebení a materiál. Pro materiál DC 05 + ZE je to Graf 7 a pro materiál HX 180 BD + Z100 je to Graf 8.

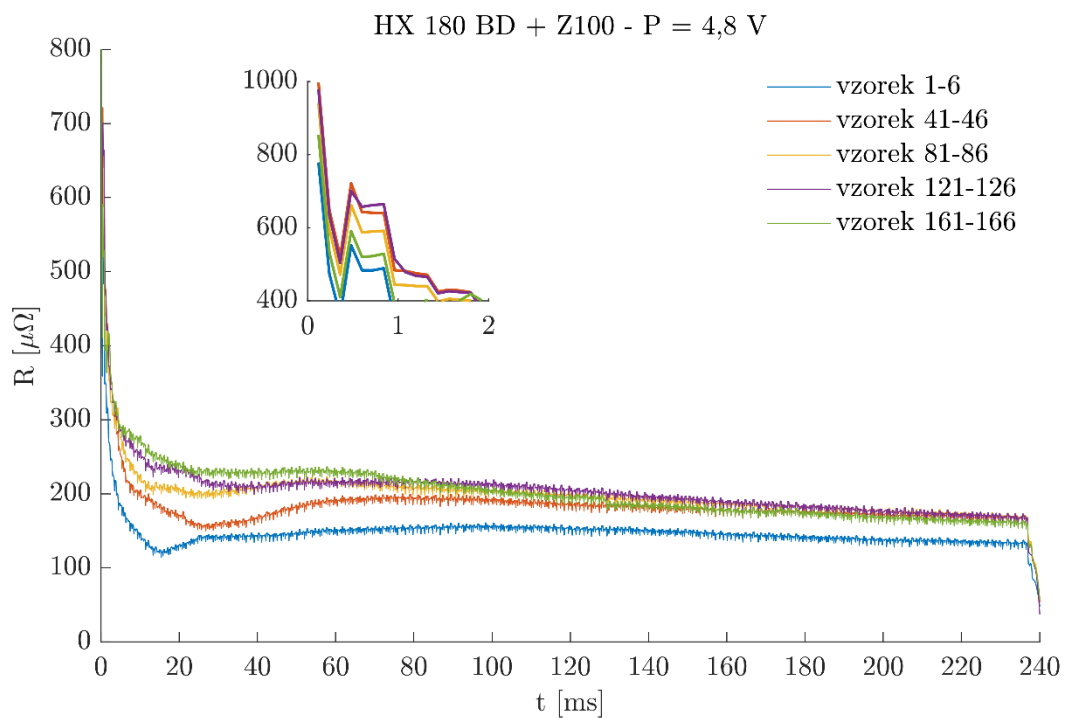
Prvotní peaky jednotlivých křivek v grafech nemají mezi sebou tak velký rozdíl, jak tomu bylo u grafů zobrazujících vliv přitlačné síly na dynamický odpor. S nižším opotřebením je hodnota prvotního peaku nižší. Tyto rozdíly jsou tvořeny rozdílným přechodovým odporem mezi elektrodou a materiálem. Mimo jiné i proto, že přechodový odpor závisí i na vrstvě oxidů a na styčné ploše. S vyšším opotřebením může docházet k zvětšování plochy styku vlivem deformace, ale i k jejímu zmenšení vlivem vytrhávání materiálu uprostřed čepičky, kde poté může docházet ke svařování pouze po odvodu kontaktní plochy elektrodové čepičky. Nicméně poměr zvětšení / zmenšení plochy styku nemá v tomto případě na výsledný dynamický odpor významný vliv.

Mnohem zásadnější vliv na dynamický odpor má již zmíněná čistota povrchu, kterou ovlivňují oxidy, páry, sloučeniny a další nečistoty, které ulpívají na elektrodové čepičce. S rostoucím počtem provedených svarů se zvyšuje i opotřebení elektrodových čepiček a roste tak i přechodový odpor mezi elektrodou a základním materiálem. Právě proto je dynamický odpor nižší při použití méně opotřebených elektrodových čepiček, a to v celém průběhu. Opotřebení elektrodových čepiček má však při pohledu na grafy nižší vliv na změnu průběhu dynamického odporu než přitlačná síla elektrod, což je způsobeno tím, že přechodový odpor mezi elektrodou a materiálem je výrazně nižší než přechodový odpor mezi základními materiály.

Vzhledem ke stavu povrchu stykové plochy svarů u materiálu DC 05 + ZE, který je bez viditelných vad a nežádoucích jevů (viz kapitola 7.4) jsou i výsledky jednotlivých skupin opotřebení poměrně konstantní a není mezi nimi zásadní rozdíl. U materiálu HX 180 BD + Z100 se povrch stykové plochy jeví výrazně horší a s tím je spojený i větší rozdíl mezi průběhy dynamického odporu pro různé skupiny opotřebení.



Graf 7 - vliv opotřebení elektrodových čepiček na dynamický odpor pro materiál DC 05 + ZE (vzorový graf s přítláčnou silou elektrod P = 2,0 V)



Graf 8 - vliv opotřebení elektrodových čepiček na dynamický odpor pro materiál HX 180 BD + Z100 (vzorový graf s přítláčnou silou elektrod P = 4,8 V)

7.4 Vizuální kontrola povrchových vad

Před vyhotovením metalografické zkoušky byly pořízeny snímky kontaktní plochy svaru při pohledu shora, a to pro všechny vzorky které byly určeny pro metalografickou zkoušku. Snímky byly pořízeny na stereomikroskopu ZEISS – Stemi 508. Na tomto zařízení byly pořízeny i snímky elektrodových čepiček po svaření všech vzorků při daném nastavení přitlačné síly elektrod. Detailní snímky byly poté pořízeny na metalografickém mikroskopu ZEISS – Axio Observer D1m. Snímky kontaktních ploch svarů materiálu DC 05 + ZE jsou uvedeny v Tab. 10 a snímky kontaktní plochy svarů materiálu HX 180 BD + Z100 jsou uvedeny v Tab. 11.

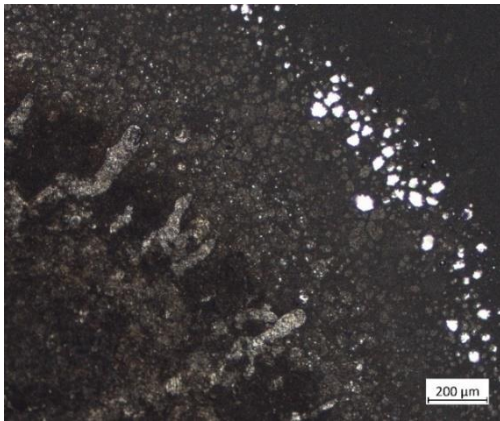
Svařené vzorky obecně vykazovaly horší stav povrchu při použití nižších přitlačných sil. Naopak při vyšších silách se povrch vzorků jevil čistější a bez potencionálních vad. Tomu odpovídá i fakt, že při nízkých přitlačných silách docházelo téměř u 100 % vzorků k rozstříku. Při vyšších silách bylo svařování bezrozstříkové. Toto platí pro oba použité materiály.

U materiálu DC 05 + ZE se na většině vzorků objevoval kruh okolo svaru. Dle skenovací elektronové mikroskopie byl tento kruh identifikován jako kapičky zinku. Sledovat lze i zinek vytékající zpod čepičky. Detail tohoto jevu lze pozorovat na Obr. 18.

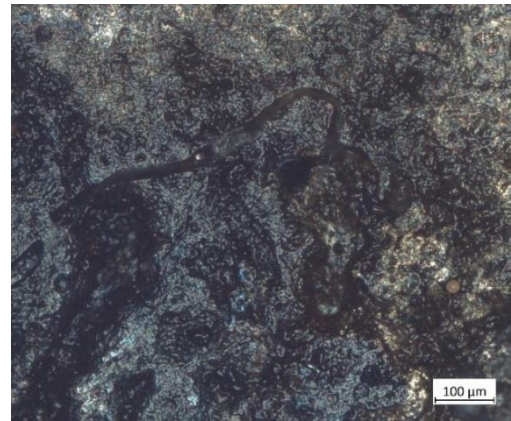
Materiál HX 180 BD + Z100 vlivem rozdílného povlaku vykazoval horší svařitelnost, čemuž odpovídá i stav povrchu svarů s porovnáním povrchu svarů materiálu DC 05 + ZE. Kromě opalu, který se vyskytl na několika vzorcích, lze na povrchu v oblasti vtisku pozorovat i zlatavou barvu. Ta je způsobena vytrháváním slabé vrstvičky mosazi z měděných elektrodových čepiček, do kterých před vytrhnutím difundoval zinek. Na detailním snímku (Obr. 19) je možné pozorovat prasklinky, přičemž bylo zjištěno, že se jedná o póry, které jsou převážně povrchové a v některých případech i těsně podpovrchové.

Na elektrodových čepičkách (Tab. 12) lze pozorovat opal, který roste se zvyšující se přitlačnou silou elektrodových čepiček. Tento jev je výrazný především na horních elektrodových čepičkách po svaření materiálu DC 05 + ZE. U elektrodových čepiček je po svaření materiálu HX 180 BD + Z100 tento opal překryt vrstvičkou par a není tak dobře viditelný. Vzhledem k celkovému počtu svařovacích cyklů, které byly s elektrodovými

čepičkami provedeny (celkem 166) lze na všech čepičkách pozorovat opotřebení vzniklé vytrháváním materiálu z čepiček. Nejvýraznější je tento jev u čepiček po svaření materiálu HX 180 BD + Z100, kde v průběhu svařování docházelo k častému lepení elektrodových čepiček ke svařovanému materiálu. To má poté za následek větší míru vytrhávání materiálu a větší opotřebení elektrodových čepiček. Lepení plechů na elektrodové čepičky má v průmyslové praxi vliv na kvalitu dalších svarů kvůli rozvibrování svařovacích kleští po odtržení od svaru.

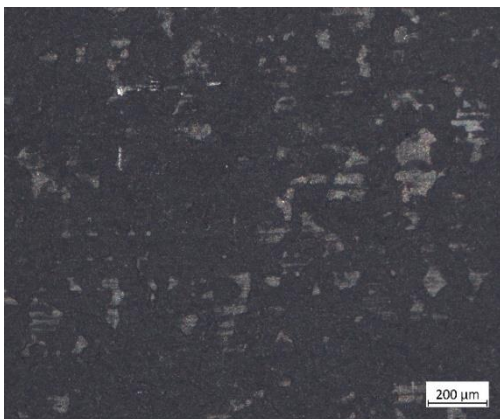


*Obr. 18 - detail DC 05 + ZE - 5,6 V - 126
(zvětšení 50x)*

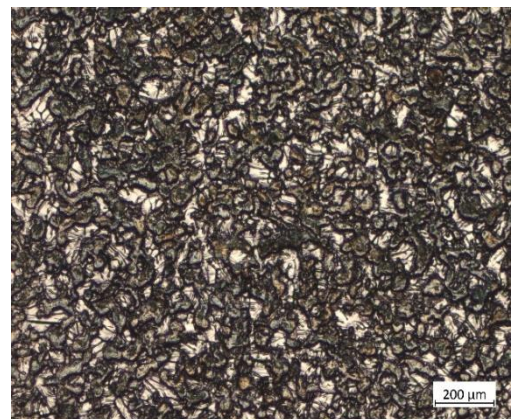


*Obr. 19 - detail HX 180 BD + Z100 - 1,2 V - 126
(zvětšení 100x)*

V rámci pořizování detailních snímků kontaktních ploch svarů byly pořízeny i snímky povrchů pro oba materiály (Obr. 20 pro materiál DC 05 + ZE a Obr. 21 pro materiál HX 180 BD + ZE100). Již na první pohled je patrný rozdíl mezi galvanickým a žárovým zinkem. Tento rozdíl společně s tloušťkou povlaku pak výrazně ovlivňuje proces svařování.



*Obr. 20 - detail povlaku materiálu DC 05 + ZE
(zvětšení 50x)*



*Obr. 21 - detail povlaku HX 180 BD + Z100
(zvětšení 50x)*






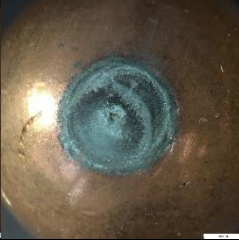



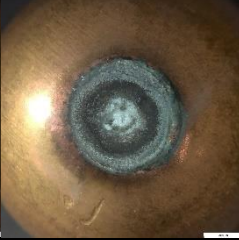
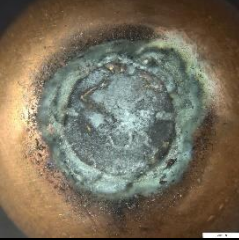


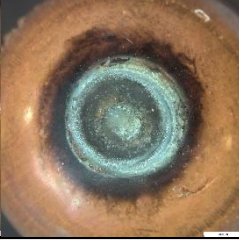
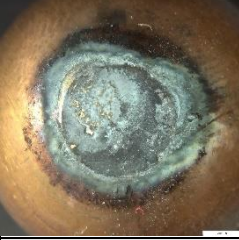
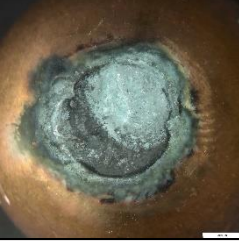




Tab. 10 - snímky kontaktní plochy svarů materiálu DC 05 + ZE

DC 05 - 0,8 V				
vzorek č. 6	vzorek č. 46	vzorek č. 86	vzorek č. 126	vzorek č. 166
DC 05 - 2,0 V				
vzorek č. 6	vzorek č. 46	vzorek č. 86	vzorek č. 126	vzorek č. 166
DC 05 - 3,2 V				
vzorek č. 6	vzorek č. 46	vzorek č. 86	vzorek č. 126	vzorek č. 166
DC 05 - 4,4 V				
vzorek č. 6	vzorek č. 46	vzorek č. 86	vzorek č. 126	vzorek č. 166
DC 05 - 5,6 V				
vzorek č. 6	vzorek č. 46	vzorek č. 86	vzorek č. 126	vzorek č. 166

Tab. 11 - snímky kontaktní plochy svarů materiálu HX 180 BD + Z100

HX 180 BD - 1,2 V				
vzorek č. 6	vzorek č. 46	vzorek č. 86	vzorek č. 126	vzorek č. 166
HX 180 BD - 2,4 V				
vzorek č. 6	vzorek č. 46	vzorek č. 86	vzorek č. 126	vzorek č. 166
HX 180 BD - 3,6 V				
vzorek č. 6	vzorek č. 46	vzorek č. 86	vzorek č. 126	vzorek č. 166
HX 180 BD - 4,8 V				
vzorek č. 6	vzorek č. 46	vzorek č. 86	vzorek č. 126	vzorek č. 166
HX 180 BD - 6,0 V				
vzorek č. 6	vzorek č. 46	vzorek č. 86	vzorek č. 126	vzorek č. 166

Tab. 12 - snímky elektrodových čepiček po svaření vzorků materiálu DC 05 + ZE a HX 180 BD + Z100

DC 05 - 0,8 V		HX 180 BD - 1,2 V	
dolní	horní	dolní	horní
			
DC 05 - 2,0 V		HX 180 BD - 2,4 V	
dolní	horní	dolní	horní
			
DC 05 - 3,2 V		HX 180 BD - 3,6 V	
dolní	horní	dolní	horní
			
DC 05 - 4,4 V		HX 180 BD - 4,8 V	
dolní	horní	dolní	horní
			
DC 05 - 5,6 V		HX 180 BD - 6,0 V	
dolní	horní	dolní	horní
			

7.5 Zkouška ultrazvukem

Zkouška ultrazvukem byla, obdobně jako vizuální kontrola povrchových vad, provedena na vzorcích ještě před metalografickou zkouškou. Pro zkoušku ultrazvukem byl použit defektoskop OLYMPUS EPOCH 650, který lze pozorovat na Obr. 22. Všechny použité sondy byly přímé, přičemž bylo vyzkoušeno několik typů předsádek pro zajištění co nejkonkrétnějších výsledků.



Obr. 22 - defektoskop OLYMPUS EPOCH 650

Při této nedestruktivní metodě bylo zjištěno, zda svar vykazuje nehomogenitu neboli vadu, která se na obrazovce projeví jako nežádoucí echo. Výsledky z ultrazvukové zkoušky byly zaneseny do Tab. 13. Zelená barva označuje vyhovující svary bez vad a červená svary s vadami. Oranžovou barvou jsou poté označeny svary, u kterých kvalifikovaná obsluha nebyla schopná určit, zda svar obsahuje vady či nikoliv.

Výsledky zkoušky dle předpokladu korespondují s vizuální kontrolou, kde se materiál DC 05 + ZE jeví téměř bezproblémově a u materiálu HX 180 BD + Z100 se zvyšujícím opotřebením stoupá i množství vad, přičemž se tak děje zejména u nízkých přitlačných sil.

Tab. 13 - výsledky zkoušky ultrazvukem pro materiál DC 05 + ZE a HX 180 BD + Z100

DC 05 + ZE		Přítlačná síla – P [V]				
		0,8	2,0	3,2	4,4	5,6
Číslo vzorku	6	?	OK	OK	OK	OK
	46	OK	OK	?	OK	OK
	86	OK	OK	OK	OK	OK
	126	OK	OK	OK	OK	OK
	166	OK	OK	OK	OK	OK

HX 180 BD + Z100		Přítlačná síla – P [V]				
		1,2	2,4	3,6	4,8	6,0
Číslo vzorku	6	OK	OK	OK	OK	OK
	46	N	N	?	?	?
	86	N	N	?	?	?
	126	N	N	N	N	N
	166	N	N	N	N	N

7.6 Metalografická zkouška

Metalografická zkouška byla vyhotovena vždy na jednom vzorku pro každé nastavení přitlačné síly, materiál a skupinu opotřebení. Nejprve byl svar rozříznut v ose průměru svarové čočky, následně byl broušen, leštěn a leptán. Dále byly pořízeny snímky svarů kolmo na rovinu řezu, které jsou jak pro materiál DC 05 + ZE, tak i pro materiál HX 180 BD + Z100 zobrazeny v Tab. 14. Tabulka je rozdělená na snímky pro jednotlivé materiály a přitlačné síly elektrod, přičemž svary jsou řazeny postupně od shora dolů v pořadí 6, 46, 86, 126 a 166.

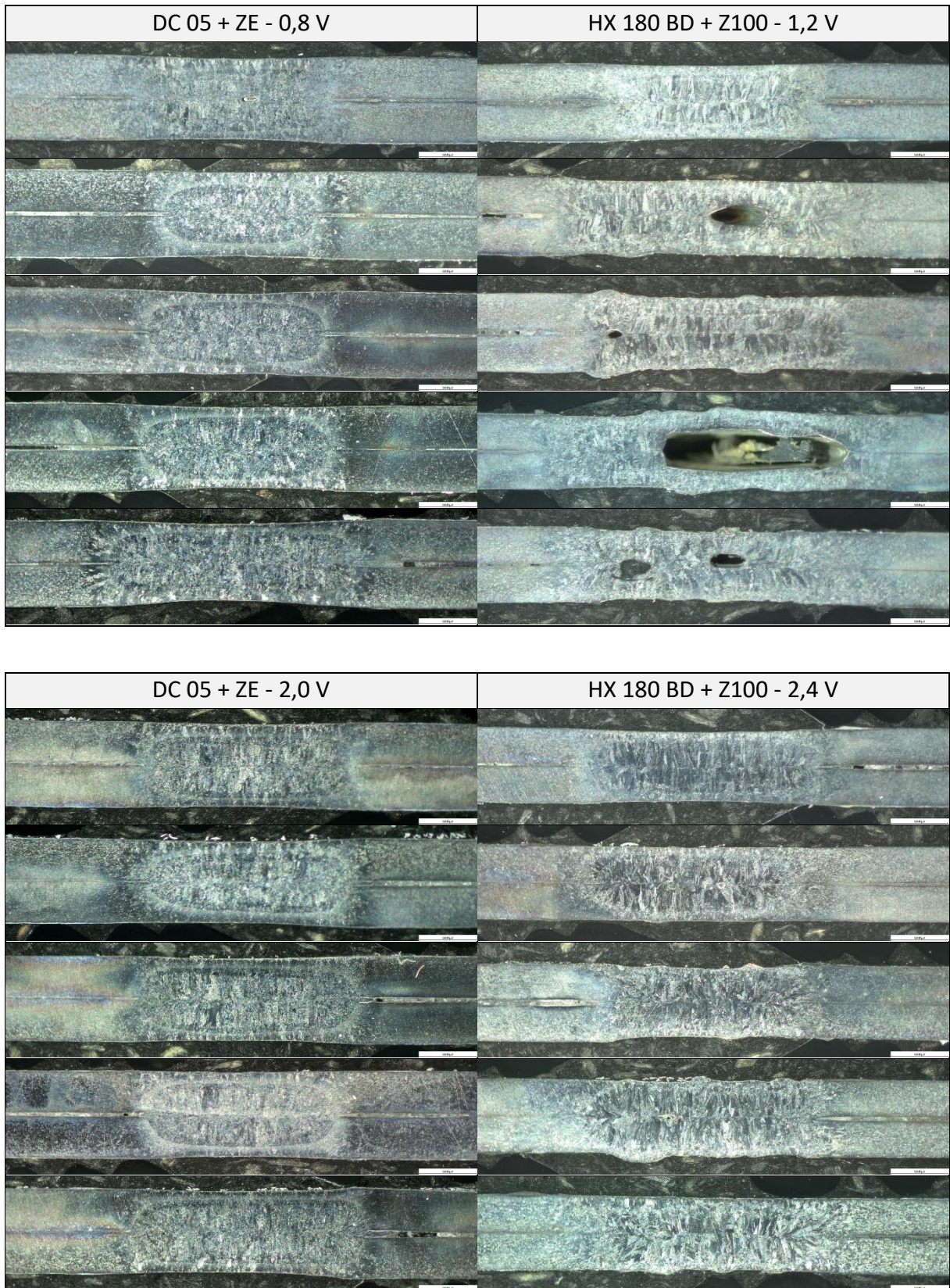
Výsledky z metalografické zkoušky poměrně správně korespondují s výsledky ze zkoušky ultrazvukem i s ohledem na to, že ne vždy musí dojít k rozříznutí svaru v místě vady a na to, že výsledky z ultrazvukové zkoušky mohou být ovlivněny i stavem povrchu materiálu.

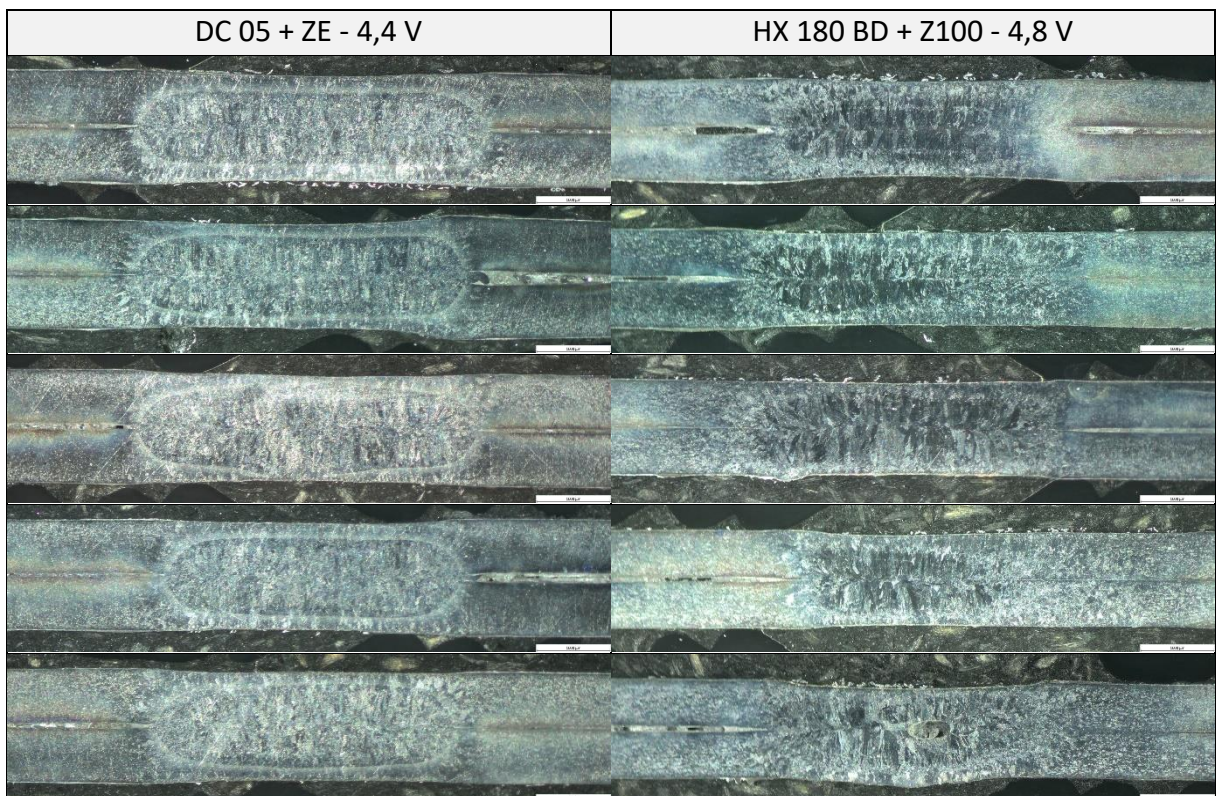
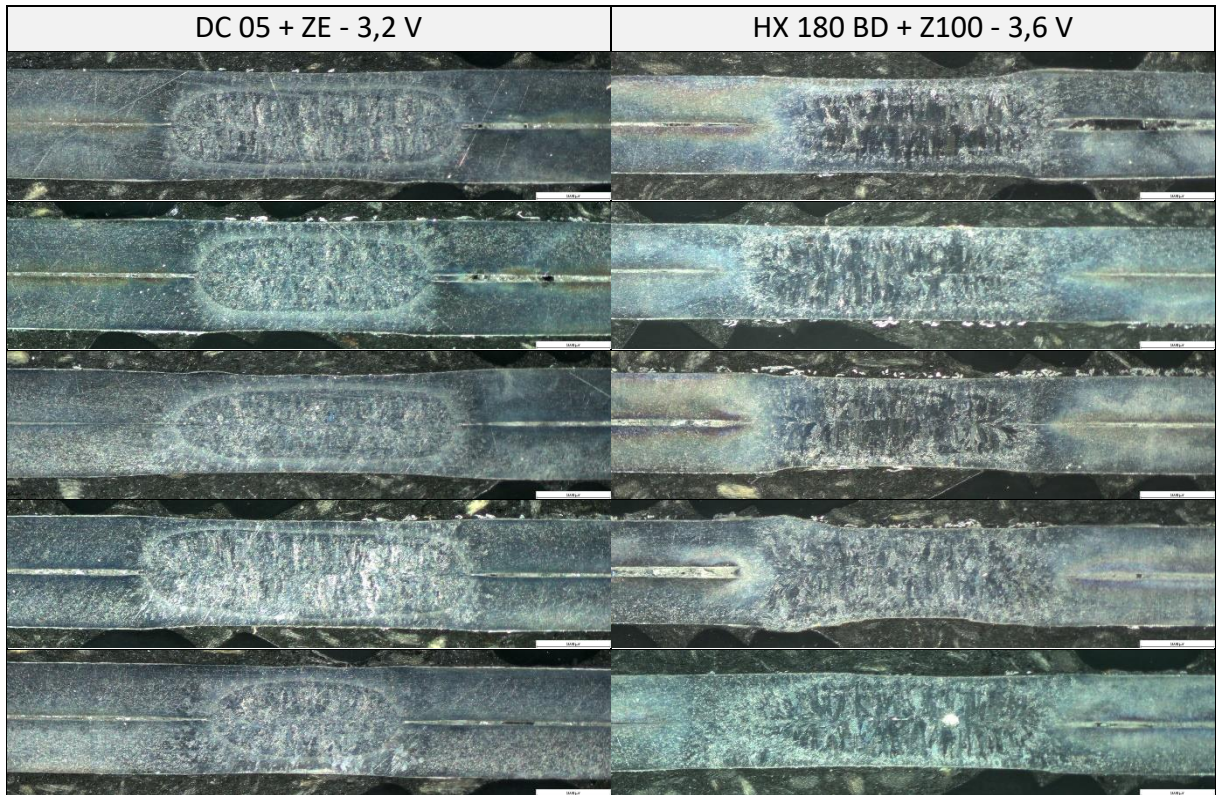
U některých vzorků materiálu HX 180 BD + Z100 se vyskytovali póry vzniklé rozstříkem roztaveného materiálu. To se dělo především u vzorků, kde byla nastavena nízká přitlačná síla elektrod a tyto póry se pohybovali od poměrně drobných až po velmi výrazné. U materiálu DC 05 + ZE se i přes rozstřík roztaveného kovu póry nevyskytovaly.

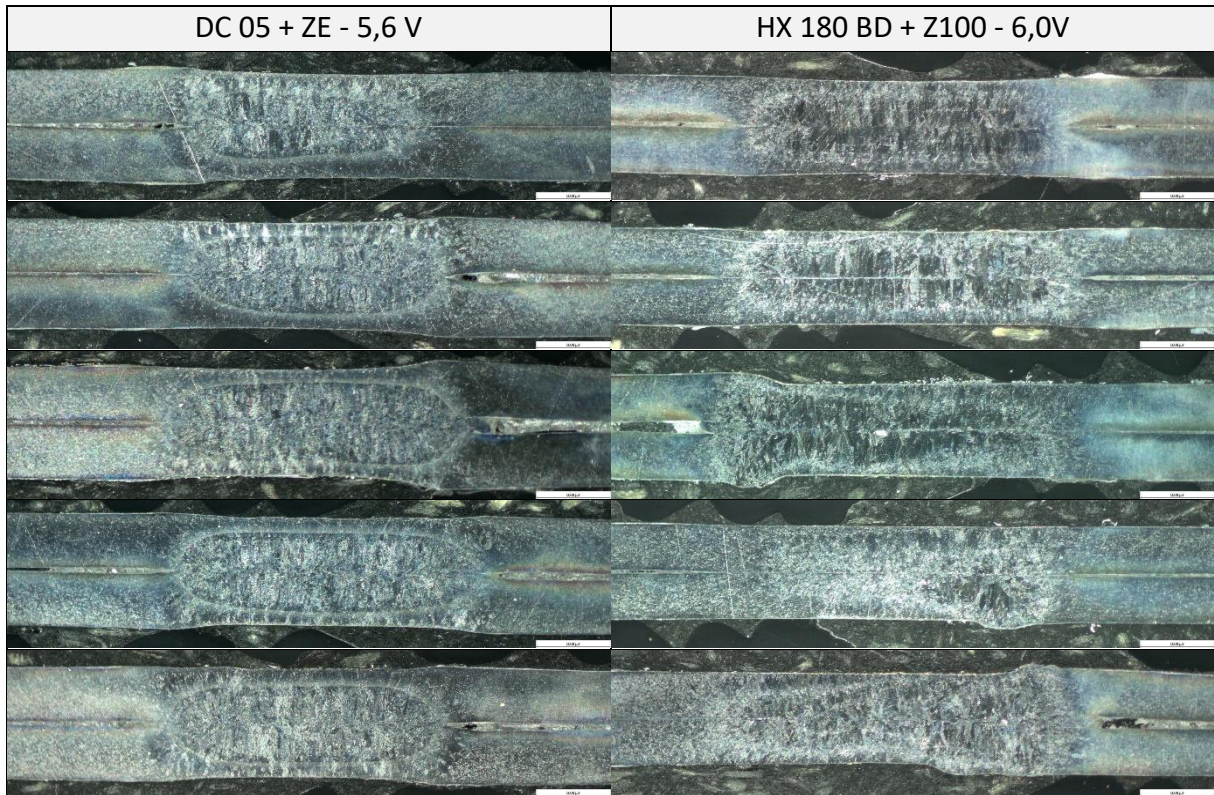
Některé vzorky vykazovaly výrazně hrubozrnnou strukturu, jak můžeme vidět například na vzorku číslo 46 materiálu HX 180 BD + Z100 při nastavené přitlačné síle 2,4 V. Na tomto vzorku lze také pozorovat to, že došlo ke spojení pouze difuzně, což bude dále komentováno při mechanizované zkoušce stříhem a následném měření průměrů svarových čoček.

Ze všech snímků byly naměřeny hloubky vtisků elektrod do materiálu, které by dle normy ČSN EN ISO 14373 neměly být větší než 20 % tloušťky plechu. Pro materiál DC 05 + ZE o tloušťce plechů $t_p(\text{DC 05 + ZE}) = 0,7 \text{ mm}$ je maximální přípustná hodnota hloubky vtisku $t_{Emax}(\text{DC 05 + ZE}) = 140 \mu\text{m}$ a pro materiál HX 180 BD + Z100 o tloušťce plechů $t_p(\text{HX 180 BD + Z100}) = 0,6 \text{ mm}$ je maximální přípustná hodnota hloubky vtisku $t_{Emax}(\text{HX 180 BD + Z100}) = 120 \mu\text{m}$. Naměřené hodnoty hloubek vtisků jsou zaznamenány v Tab. 15, přičemž zelená barva značí vyhovující hloubku vtisku a červená nevyhovující. Přitlačná síla elektrod v tomto případě překvapivě nehrála takovou roli, jaká byla předpokládána.

*Tab. 14 - snímky z metalografické zkoušky DC 05 + ZE a HX 180 BD + Z100
(odshora vždy vzorky číslo 6, 46, 86, 126, 166)*







Tab. 15 - hloubka vtisků elektrod materiálu DC 05 + ZE a HX 180 BD + Z100 v [μm]

DC 05 + ZE		Přítlačná síla – P [V]				
		0,8	2,0	3,2	4,4	5,6
Číslo vzorku	6	43	44	49	61	74
	46	60	54	27	104	69
	86	65	43	85	74	132
	126	77	40	48	51	73
	166	120	71	30	38	82

HX 180 BD + Z100		Přítlačná síla – P [V]				
		1,2	2,4	3,6	4,8	6,0
Číslo vzorku	6	39	79	121	74	87
	46	45	33	31	55	62
	86	125	76	102	72	153
	126	114	119	158	65	93
	166	101	60	81	126	138

7.7 Mechanizovaná zkouška stříhem

Mechanizovaná zkouška stříhem byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14273 na zkušebním zařízení LabTest 5.100SP1, které je zobrazeno na Obr. 23.



Obr. 23 - zkušební zařízení LabTest 5.100SP1

Pro každé nastavení přitlačné síly, daný materiál a skupinu opotřebení bylo podrobena mechanizované zkoušce stříhem 5 vzorků. Od každého vzorku byla do tabulky zaznamenána maximální síla potřebná k porušení svaru. Tyto hodnoty byly poté vyneseny do grafů. Vzhledem k tomu, že každý materiál má jinou tloušťku, byly hodnoty vyneseny do dvou grafů.

Norma ČSN EN ISO 14273 udává minimální hodnoty sil potřebných k porušení svaru. Tyto hodnoty jsou závislé na tloušťce základního materiálu. Minimální hodnoty sil potřebných k porušení svaru pro oba materiály o tloušťkách plechů $t_p(DC\ 05 + ZE) = 0,7\ mm$ a $t_p(HX\ 180\ BD + Z100) = 0,6\ mm$ jsou následující:

$$F_{min}(DC\ 05 + ZE) = 1\ 900\ N$$

$$F_{min}(HX\ 180\ BD + Z100) = 1\ 500\ N$$

7.7.1 Typy porušení svarového spoje

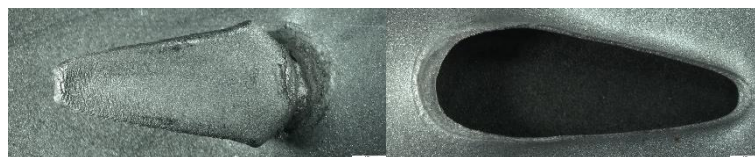
Při mechanizované zkoušce stříhem docházelo k porušení svarů různými způsoby v závislosti na materiálu, přitlačné síle elektrod i v závislosti na opotřebení elektrodoých čepiček.

Norma pro mechanizovanou zkoušku stříhem nebere na způsob porušení svarového spoje ohled a zabývá se pouze výslednou maximální silou potřebnou k porušení svaru. Způsob porušení svaru má však významný vliv. To lze uvést například ve vztahu k automobilovém průmyslu, kde se bodové svařování uplatňuje v značné míře, a to zejména na karosérie automobilů.

V závislosti na způsobu porušení se mění i průběh křivky v tahovém diagramu, přičemž plocha pod touto křivkou je rovna energii, která je potřebná k úplnému porušení svarového spoje. Energie potřebná k porušení svarového spoje má významný vliv na deformaci karosérie při nárazu, tedy i na výslednou bezpečnost automobilu.

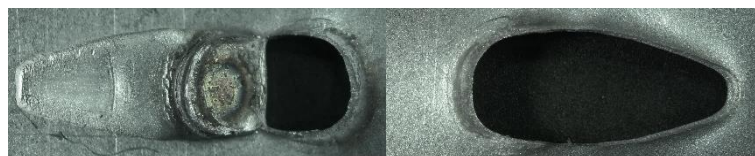
Pro lepší orientaci bylo ze vzorků podrobených mechanizované zkoušce stříhem definováno pět typů porušení. Tyto typy porušení svarového spoje jsou následující:

Typ A – houževnaté porušení s vytrhnutou svarovou čočkou pouze z jednoho plechu



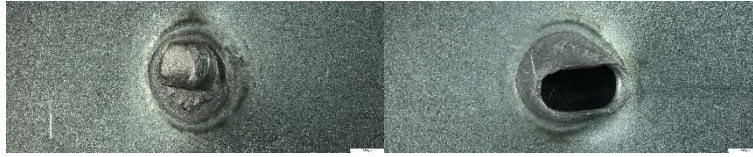
Obr. 24 - porušení svarového spoje typ A

Typ B – houževnaté porušení s vytrhnutou svarovou čočkou z obou plechů



Obr. 25 - porušení svarového spoje typ B

Typ C – křehké porušení v tepelně ovlivněné oblasti



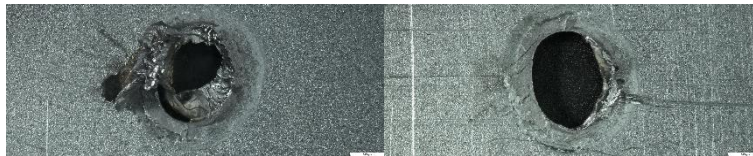
Obr. 26 - porušení svarového spoje typ C

Typ D – pouze difuzní spojení obou plechů



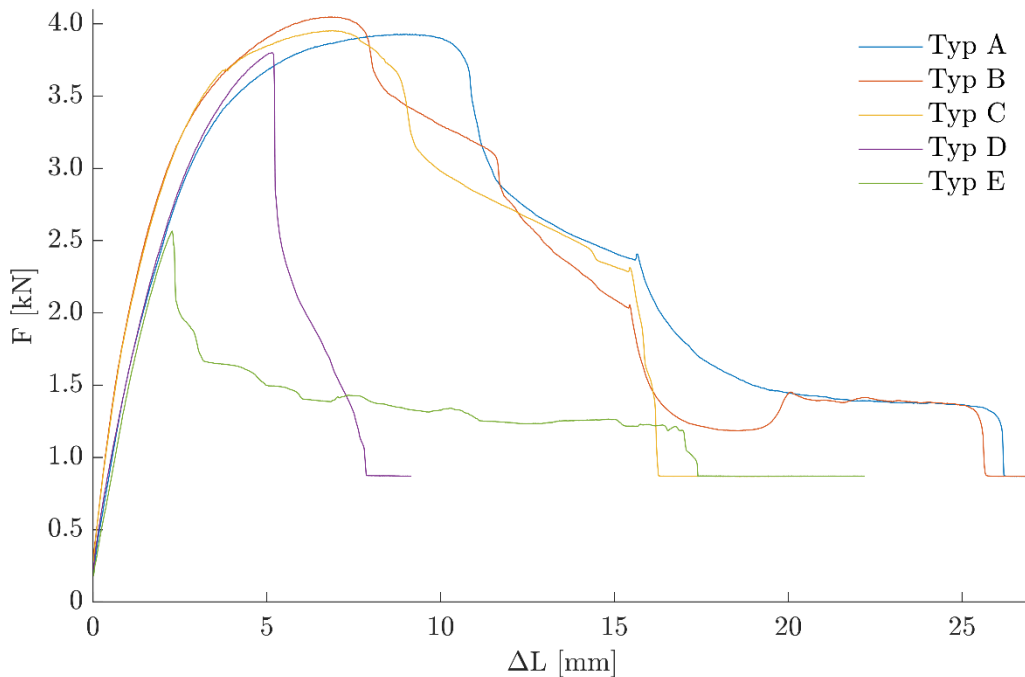
Obr. 27 - porušení svarového spoje typ D

Typ E – úplná destrukce svarové čochky



Obr. 28 - porušení svarového spoje typ E

Při pohledu na Graf 9, kde jsou uvedeny příklady průběhů z mechanizované zkoušky stříhem pro různé typy porušení svarového spoje, lze jasně pozorovat rozdíl mezi jednotlivými typy porušení svarového spoje. Nejpříznivěji z hlediska pohlcené energie vychází typ A. Typ B má obdobný průběh, avšak s lokálním poklesem způsobeným vytrhnutím svarové čochky z druhého plechu. Oba typy mají část, kde dochází k postupnému vytrhávání materiálu. Délka vytrhávaného materiálu poté ovlivňuje tvar grafu, tedy především absolutní prodloužení a s tím spojenou i pohlcenou energii. Typ C postrádá část, kde dochází k postupnému vytrhávání dalšího materiálu, jelikož došlo k porušení v tepelně ovlivněné oblasti. K porušení svarového spoje typem D dochází téměř v jednom okamžiku a nedochází tak k dalšímu pohlcování deformační energie, i když výsledná maximální síla je poměrně vysoká. Typ E vykazuje nejhorší pevnost svarového spoje.



Graf 9 - příklady průběhů z mechanizované zkoušky stříhem pro různé typy porušení svarového spoje

Pro materiál DC 05 + ZE vykazovalo 100 % svarů porušení svarového spoje typem B. Až při vyšším nastavení přitlačné síly (4,4 V a 5,6 V) vykazovalo cca 30 % svarů porušení svarového spoje typem A a zbylých 70 % opět typem B. Opotřebení elektrodoých čepiček v tomto případě nemělo významný vliv na typ porušení svarového spoje.

U materiálu HX 180 BD + Z100 (který obecně vykazoval vlivem rozdílné povrchové úpravy horší svařitelnost a vyskytovalo se u něj větší množství vad) docházelo k porušení svarového spoje různými typy. Pro všechna nastavení přitlačných sil bylo cca 45 % svarů porušeno typem A. Porušení typem B bylo pouze u 15 % svarů pro nejnižší nastavení přitlačné síly (1,2 V) a s jejím nárůstem stoupalo i procentuální zastoupení porušení typem B, a to až na 36 % (pro 2,4 a 3,6 kN), přičemž s dalším nárůstem přitlačné síly docházelo k poklesu množství porušení typem B (cca na 20 %). Vliv opotřebení v tomto případě byl takový, že při nízkém opotřebení byla většina svarů porušena typem A či typem B (příznivé typy porušení). Při zvyšujícím se opotřebení docházelo k porušení svarového spoje méně příznivými způsoby. Zajímavý je také fenomén, kde k porušení typem D docházelo především na vzorcích druhé skupiny opotřebení (vzorky 41 až 46), a to hlavně při vyšších přitlačných silách. Tímto fenoménem by bylo jistě zajímavé se dále zabývat.

7.7.2 Maximální síly potřebné k porušení svarů

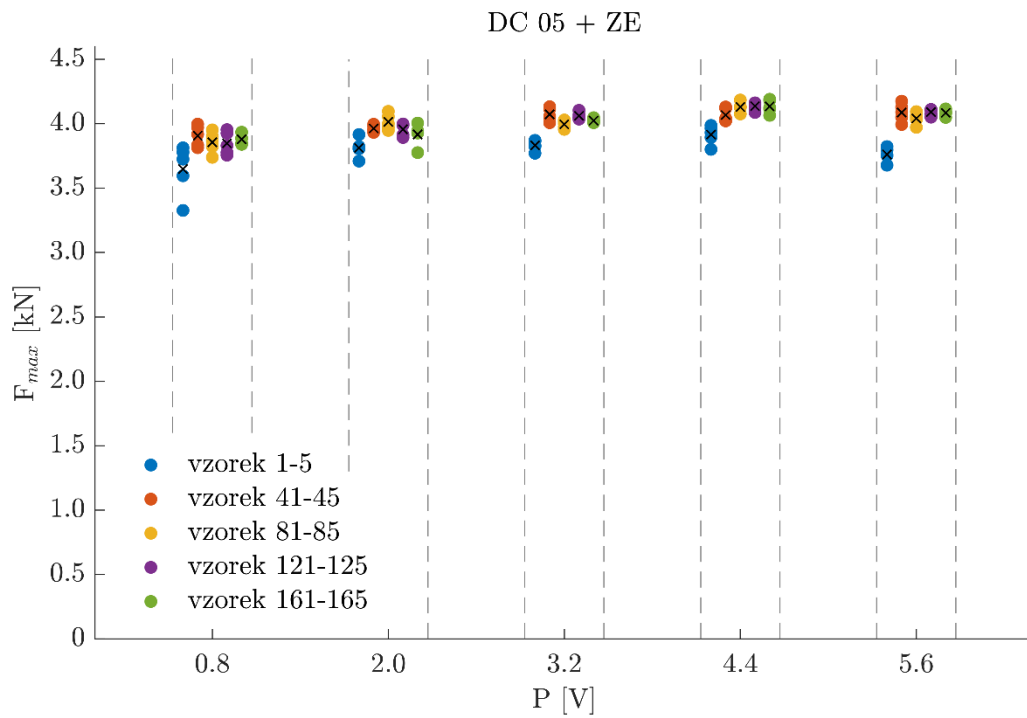
Všechny naměřené hodnoty z mechanizované zkoušky stříhem byly zaneseny do grafů (Graf 10 Graf 12 pro materiál DC 05 + ZE a Graf 11 pro materiál HX 180 BD + Z100). V těchto grafech je na ose x vyobrazena přítláčná síla elektrod i s jednotlivými skupinami opotřebení a na ose y jsou vyneseny maximální síly potřebné k porušení svarů. Průměrné hodnoty jsou v dané poloze na ose x vyznačeny křížkem.

Z obou grafů je jasně patrné, že všechny vzorky vykazují vyšší pevnost, než je minimální přípustná hodnota definována norma ČSN EN ISO 14273. Jinými slovy, žádná hodnota maximální síly potřebné k porušení svaru neklesla pro materiál DC 05 + ZE pod hodnotu $F_{min}(DC\ 05 + ZE) = 1\ 900\ N$ a pro materiál HX 180 BD + Z100 pod hodnotu $F_{min}(HX\ 180\ BD + Z100) = 1\ 500\ N$.

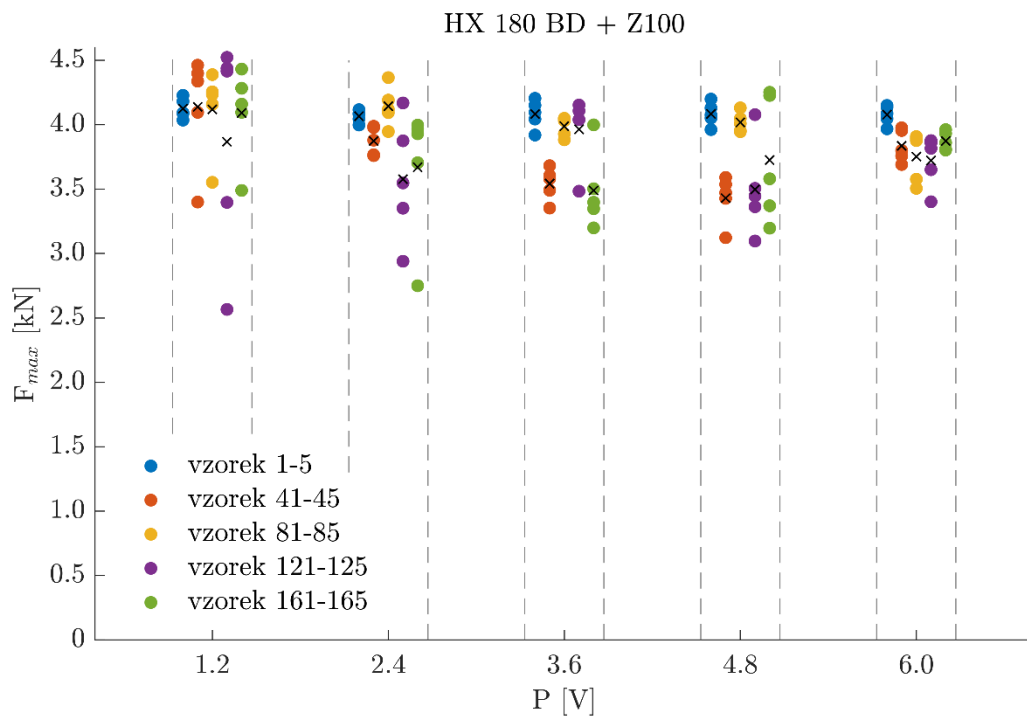
Rozptyl hodnot u materiálu DC 05 + ZE je minimální, což bylo předpokládáno s ohledem na stav povrchu i výsledků z předchozích zkoušek. U materiálu HX 180 BD + Z100 je tento rozptyl hodnot poměrně významný a z grafu je patrné, že s rostoucí přítláčnou silou elektrod se zřetelně snižuje i rozptyl hodnot maximálních sil potřebných k porušení svarů.

S rostoucí přítláčnou silou elektrod se hodnoty maximálních sil potřebných k porušení svaru nijak zásadně nezvyšují ani nezmenšují. Stejně tak i vliv opotřebení elektrodoých čepiček nemá na maximální síly potřebné k porušení neboli na pevnost svaru zásadní vliv a nelze ho těmito grafy jednoznačně posoudit. Nicméně je zajímavé, jak maximální síla potřebná k porušení svaru u materiálu HX 180 BD + Z100 klesá s narůstající přítláčnou silou elektrod při vyšším opotřebení, zatímco s minimálním opotřebením se drží i přes změnu přítláčné síly na přibližně konstantní hodnotě.

Opotřebení elektrodoých čepiček má však vliv na rozptyl hodnot maximálních sil potřebných k porušení svarů. Při nízkém opotřebení elektrodoých čepiček je rozptyl hodnot minimální a s přibývajícím opotřebením rozptyl stoupá. To lze pozorovat především u materiálu HX 180 BD + Z100, kde oproti materiálu DC 05 + ZE je opotřebení elektrodoých čepiček poměrně významné.



Graf 10 - maximální síly potřebné k porušení svarů materiálu DC 05 + ZE



Graf 11 - maximální síly potřebné k porušení svarů materiálu HX 180 BD + Z100

7.8 Měření průměrů svarových čoček

Po mechanizované zkoušce stříhem byly na roztržených vzorcích měřeny průměry svarových čoček. Měření probíhalo dle normy ČSN EN ISO 14273 a pro každý svar byly vždy zaznamenány dvě na sebe kolmé hodnoty průměrů, ze kterých byla následně vypočtena průměrná hodnota. Pro měření průměrů bylo použito digitální posuvné měřítko.

Pro oba materiály byla stanovena minimální hodnota průměru svarové čočky dle vzorce daného normou ČSN EN ISO 14373:

$$d_{min} = 3,5 \cdot \sqrt{t_p} \quad (4)$$

kde d_{min} – minimální průměr svarové čočky [mm]

t_p – tloušťka plechu [mm]

Výsledné minimální průměry svarových čoček pro oba materiály o tloušťkách plechů $t_p(DC\ 05 + ZE) = 0,7\ mm$ a $t_p(HX\ 180\ BD + Z100) = 0,6\ mm$ jsou následující:

$$d_{min}(DC\ 05 + ZE) = 2,9\ mm$$

$$d_{min}(HX\ 180\ BD + Z100) = 2,7\ mm$$

Všechny naměřené hodnoty byly obdobně jako maximální síly potřebné k porušení svaru z mechanizované zkoušky stříhem zaneseny do grafů (Graf 12 pro materiál DC 05 + ZE a Graf 13 pro materiál HX 180 BD + Z100). V těchto grafech je na ose x přítláčná síla elektrod i s jednotlivými skupinami opotřebení a na ose y jsou vyneseny hodnoty průměrů svarových čoček. Průměrné hodnoty jsou v dané poloze na ose x opět vyznačeny křížkem.

Hodnoty průměrů svarových čoček až na drobné odchylky poměrně dobře korespondují s hodnotami maximálních naměřených sil potřebných k porušení svaru, jelikož pevnost svaru je z velké části závislá zejména na průměru svarové čočky. To platí především u materiálu DC 05 + ZE, kde docházelo k houževnatému porušení svaru (Typ A a Typ B z kapitoly 7.7.1). Všechny svary mimo ty, co byly porušeny typem D či E, splňují i podmínku minimálního průměru svarové čočky stanovené výše.

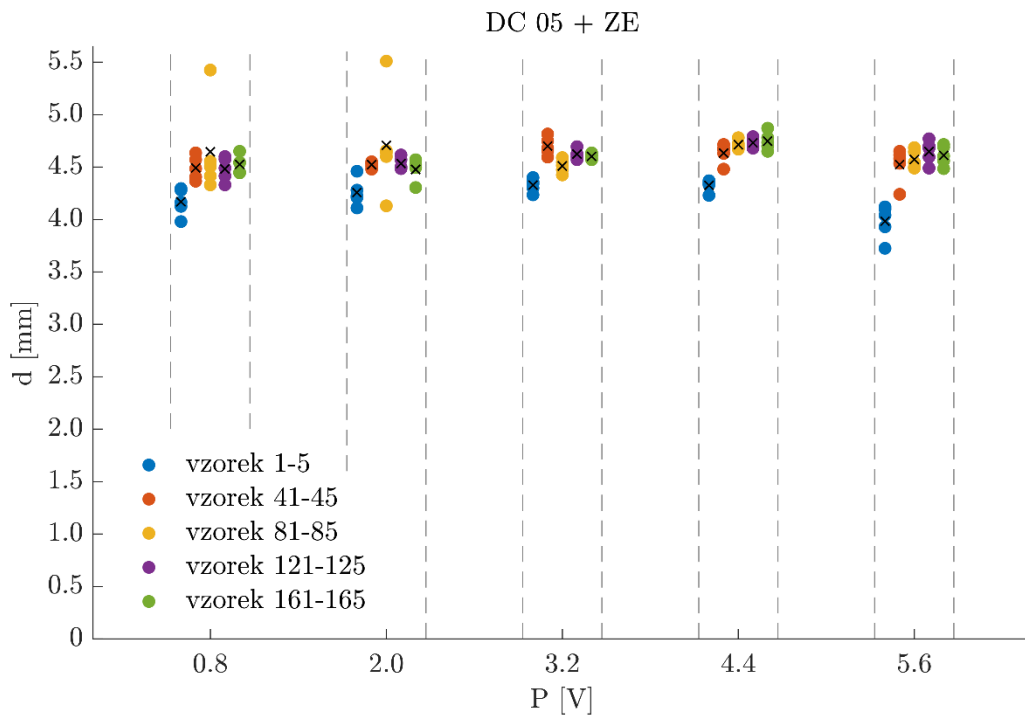
U materiálu DC 05 + ZE lze pozorovat ustálení hodnot (jak průměrů svarových čoček, tak i sil potřebných k porušení svaru z předchozí kapitoly) při vyšším opotřebení elektrodových čepiček než opotřebením z první skupiny. To se děje kvůli tomu, že dojde k srovnání povrchů elektrodových čepiček a je poté dosahováno optimálních výsledků. Vzhledem k bezproblémové svažitelnosti materiálu DC 05 + ZE a s tím spojeným minimálním opotřebením elektrodových čepiček lze toto ustálení pozorovat až do nejvyšší skupiny opotřebení elektrodových čepiček.

Jak již bylo komentováno dříve, u materiálu HX 180 BD + Z100 docházelo k porušení svarů různými způsoby (blíže popsáno v kapitole 7.7.1), což se projevilo i na výsledných hodnotách průměrů svarových čoček, které poté nemusí správně korespondovat s hodnotami maximálních sil potřebných k porušení.

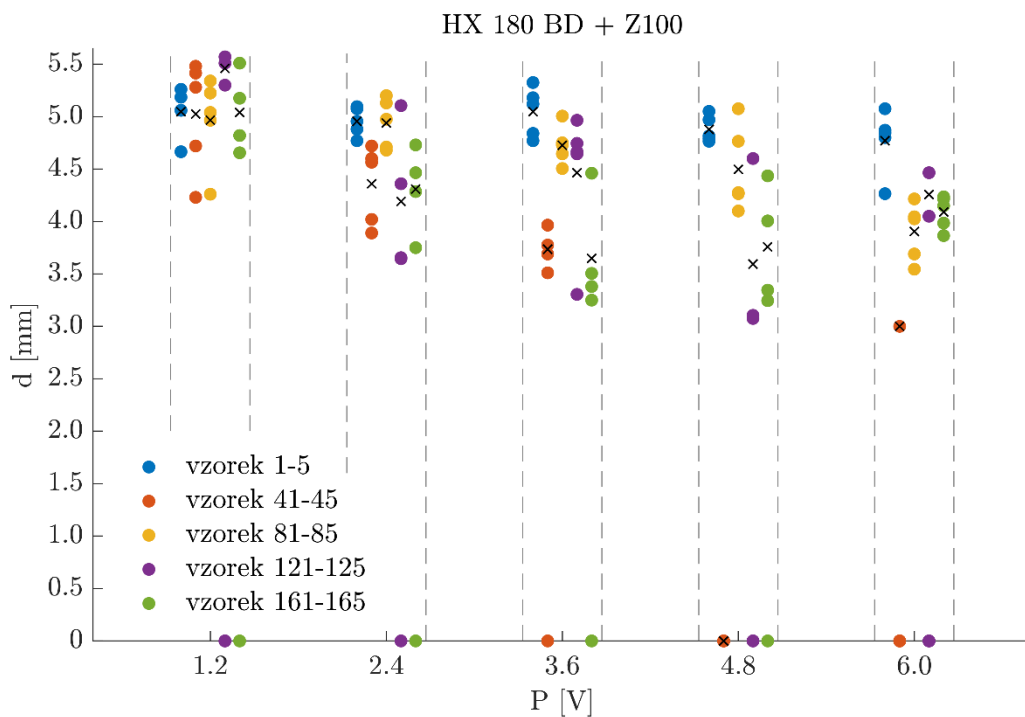
Oproti grafu zobrazujícímu maximální hodnoty sil potřebných k porušení svaru materiálu HX 180 BD + Z100 hodnoty v grafu zobrazující průměry svarových čoček nemají klesající rozptyl hodnot se zvyšující se přitlačnou silou, ale naopak tento rozptyl mírně stoupá. Opět vlivem způsobu porušení svaru.

Zajímavý je také úkaz, že na některých vzorcích docházelo ke spojení pouze difuzně (jak již bylo komentováno dříve), přičemž se tento jev objevoval především na vzorcích druhé skupiny opotřebením (vzorky 41 až 46) u materiálu HX 180 BD + Z100, a to při vyšších přitlačných silách. Například při nastavení přitlačné síly na hodnotu 4,8 V k tomu došlo na všech pěti roztržených vzorcích pro druhou skupinu opotřebením (vzorky 41 až 45). Naměřené průměry svarových čoček se poté v grafu rovnají nule. Bylo by jistě zajímavé se tímto fenoménem dále zabývat, jelikož je to stav opotřebením, při kterém by mělo být dosahováno optimálních výsledků.

Z naměřených dat v této i v předchozí kapitole lze usoudit, že optimálních a především konstantních výsledků je nejlépe dosahováno při použití vyšších přitlačných sil a také při vyšším opotřebením, než je několik prvních svarů. Pokud však opotřebením elektrodových čepiček dosáhne kritické hodnoty nebo je svařování daného materiálu problematické (například vlivem povlaku) je dosahováno lepších výsledků při nízkém opotřebením elektrodových čepiček.



Graf 12 - průměry svarových čoček materiálu DC 05 + ZE



Graf 13 - průměry svarových čoček materiálu HX 180 BD + Z100

8 Závěr

Nejdůležitější veličinou pro vznik svarové čočky při bodovém odporovém svařování je, jak již název napovídá, elektrický odpor. Ten je složen z několika dílčích odporů a je v čase svařování proměnlivý. Proto bylo primárním cílem této diplomové práce zkoumání chování dynamického odporu, a to v závislosti na změně velikosti přítlačné síly elektrod a také v závislosti na velikosti opotřebení elektrodoých čepiček při bodovém odporovém svařování.

Zkoumání chování dynamického odporu bylo provedeno na dvou materiálech, které se z hlediska odporového svařování liší především druhem povlaku. Jedná se o materiál DC 05 + ZE (galvanický zinek) a materiál HX 180 BD + Z100 (žárový zinek). Tyto materiály jsou běžně používané v automobilovém průmyslu, kde je bodové odporové svařování hojně uplatňováno. Vzorky byly svařovány v pěti skupinách opotřebení vždy po pěti svarech na mechanizovanou zkoušku stříhem a jednom svaru na metalografickou zkoušku. Na svařených vzorcích byla provedena také vizuální kontrola povrchových vad, zkouška ultrazvukem a měření průměrů svarových čoček. Při svařování všech vzorků docházelo k záznamu veličin v průběhu svařování, které pak sloužily pro posouzení jednotlivých vlivů na dynamický odpor.

Z výsledků této práce vyplývá, že docílení správného měření veličin v průběhu svařování není ani v dnešní době zcela jednoduché. Je nutné dodržovat několik zásadních pravidel, a i přes maximální potlačení elektrického šumu je v některých případech naměřená data nutné filtrovat. Průběhem dynamického odporu se v průmyslové praxi nikdo běžně příliš nezabývá, a proto není tato problematika zcela prozkoumána.

Přítlačná síla elektrod má na dynamický odpor významný vliv a projevuje se změnou jak samotného průběhu, tak i změnou absolutních hodnot dynamického odporu. S vyšší přítlačnou silou elektrod dosahuje prvotní peak dynamického odporu (tvořený především přechodovým odporem mezi svařovanými materiály) nižších hodnot, než je tomu při použití nižší přítlačné síly. To samé platí i pro zbylý průběh dynamického odporu. Prvotní peak však výrazně závisí i na stavu povrchu svařovaných materiálů, a tak toto tvrzení nemusí vždy platit. Lokální maximum křivky dynamického odporu je tvořené narůstajícím odporem svařovaného materiálu a s rostoucí přítlačnou silou se posouvá doprava (ve směru toku času).

Opotřebení elektrodoých čepiček nemá na průběh dynamického odporu tak výrazný vliv jako změna přitlačné síly elektrod. Při menším opotřebení elektrodoých čepiček je prvotní peak i celý průběh dynamického odporu nižší. Závisí zde na svařitelnosti daného materiálu a především i na jeho povrchové úpravě. Svařitelnost má poté dopad na výslednou velikost opotřebení elektrodoých čepiček a tím i na výsledný průběh dynamického odporu.

Obecně lze konstatovat, že svařené vzorky vykazují horší stav kontaktních ploch materiálu s elektrodoou čepičkou při použití nižších přitlačných sil. Tomu odpovídá i fakt, že při nízkých přitlačných silách dochází k častému rozstříku roztaveného kovu, což má za následek vznik pórů či jiných vad. Toto tvrzení potvrzují výsledky jak z vizuální kontroly, tak i ze zkoušky ultrazvukem a metalografické zkoušky. Horší kvality svarů je samozřejmě dosahováno i při svařování více opotřebenými elektrodoými čepičkami.

Předpokládalo se, že přitlačná síla elektrod bude mít poměrně zásadní vliv na vtisk elektrodoých čepiček do materiálu, ale toto tvrzení nebylo potvrzeno. Důvodem může být použití nedostatečně velké přitlačné síly na to, aby se tento vliv projevil. Jistě by bylo zajímavé tento experiment rozšířit o vyšší přitlačné síly, jelikož v běžné praxi se přitlačné síly elektrod pohybují v rozmezí od 1,5 kN do 2,0 kN na 1 mm tloušťky plechu. Toto rozšíření by však muselo být provedeno na jiném svařovacím zařízení, jelikož tento experiment pracoval v maximálním možném rozsahu nastavení přitlačné síly stroje.

Zatímco přitlačná síla elektrod nijak zvlášť pozitivně či negativně neovlivňuje typ porušení svarového spoje, opotřebení elektrod má na typ porušení svarového spoje poměrně zásadní a negativní vliv. Při vyšším opotřebení elektrod dochází z hlediska pohlcené energie k méně příznivým druhům porušení svarového spoje. Naopak při svařování méně opotřebenými elektrodoými čepičkami dochází k porušení svarů příznivými způsoby.

S rostoucí přitlačnou silou elektrod se snižuje rozptyl hodnot maximálních sil potřebných k porušení svarů, ale jejich absolutní hodnoty se nijak zásadně nemění. Opotřebení elektrodoých čepiček ovlivňuje pevnost svaru pouze v okrajových stavech (několik prvních svarů a při přesáhnutí kritické hodnoty opotřebení).

Bibliografie

- [1] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování v praxi*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1960.
- [2] KOLAŘÍK, Ladislav. *Automatizace výrobních procesů svařování*. Praha: ČVUT, 2010, 214 s. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/107516052-Ing-ladislav-kolarik-ph-d-iwe.html>
- [3] 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.
- [4] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1975.
- [5] Elektrické odporové svařování. In: *ELUC - ELEKTRONICKÁ UČEBNICE*. Olomoucký kraj. Dostupné také z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1808>
- [6] ARUNCHAI, Thongchai, Kawin SONTHIPERMPHOON, Phisut APICHAYAKUL a Kreangsak TAMEE. Resistance Spot Welding Optimization Based on Artificial Neural Network. *International Journal of Manufacturing Engineering* [online]. 2014, 6 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2014/154784>
- [7] AMBROŽ, Oldřich. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001.
- [8] ČSN EN ISO 5821 (052679) *Odporové svařování - Elektrodové čepičky pro bodové odporové svařování*. Praha: ÚNMZ - Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [9] WANG, S. C. a P. S. WEI. Modeling Dynamic Electrical Resistance During Resistance Spot Welding. *Journal of Heat Transfer* [online]. 2001, 1233 [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: <http://HeatTransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1444975>
- [10] ZHANG, Hongyan a Jacek SENKARA. *RESISTANCE WELDING: Fundamentals and Application*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-203-61639-1.
- [11] ČSN EN ISO 6520-2 (050005): *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 2: Tlakové svařování*. Praha: ÚNMZ - Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [12] HOLUB, Štěpán. *NDT kontrola odporových bodových svarů*. Praha, 2017.
- [13] JANDURA, Václav a Tomáš ZAVADIL. *NDT: NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ - základní kurz*. Praha: ATG – Advanced Technology Group, 2020.
- [14] ČSN EN ISO 17639 (051128): *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: ÚNMZ - Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [15] ČSN EN ISO 14273 (051112): *Odporové svařování - Destruktivní zkoušky svarů - Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů*. Praha: ÚNMZ - Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [16] RAMDANI, Mohammed, Mustapha BENACHOUR a Mohammed RAHOU. The Effects of Resistance Spot Welding Parameters on the Mechanical Behavior of Stainless Steel. *Engineering, Technology & Applied Science Research* [online]. 2023, (13), 10501-10504 [cit. 2023-07-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.48084/etasr.5019>

- [17] MANLADAN, S. M., F. YUSOF, S. RAMESH, M. FADZIL, Z. LUO a S. AO. A review on resistance spot welding of aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, 30 [cit. 2023-06-21]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-016-9225-9
- [18] REZAEI ASHTIANI, Hamid Reza a Roozbeh ZARANDOOZ. The Influence of Welding Parameters on the Nugget Formation of Resistance Spot Welding of Inconel 625 Sheets. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015, 46(9), 4095-4105. ISSN 1543-1940. Dostupné z: doi:10.1007/s11661-015-3030-1
- [19] GEDEON, S., C. SORENSEN, K. ULRICH a T. EAGAR. Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds. *AWS - American Welding Society* [online]. 1987, 8 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1987_12_s378.pdf
- [20] RUSSO SPENA, Pasquale, Manuela DE MADDIS, Gianluca D'ANTONIO a Franco LOMBARDI. Weldability and Monitoring of Resistance Spot Welding of Q&P and TRIP Steels. *Metals* [online]. 2016, 6(11), 15 [cit. 2022-12-27]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met6110270
- [21] WANG, Lijing, Yanyan HOU, Hongjie ZHANG, Jian ZHAO, Tao XI, Xiangyang QI a Yafeng LI. A new measurement method for the dynamic resistance signal during the resistance spot welding process. *Measurement Science and Technology*, [online]. 2016, 9(27), 13 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/27/9/095009
- [22] CURRENT METERS. In: *Spot Weld Incorporated* [online]. Saint Paul [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://spotweldinc.com/products/current-meters/>
- [23] ANALYZÁTOR TECNA - TE1700C [online]. Kosmonosy: Schinkmann, 2016 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/files/images/prod-tecna-analyzator-te1700c-s-rs-232-portem-kufrikem-a-certifikatem-bez-prislusenstvi-file0.pdf>
- [24] DC05 (1.0312). In: *European Steel and Alloy Grades / Numbers*. Dostupné také z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=202
- [25] HX180BD (1.0914). In: *European Steel and Alloy Grades / Numbers*. Dostupné také z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=612
- [26] NAGASATHYA, N., S. RAJENDRA BOOPATHY a A. SANTHAKUMARI. MFDC - An energy efficient adaptive technology for welding of thin sheets. *Institute of Electrical and Electronics Engineers* [online]. 2013, 6 [cit. 2021-07-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEETS.2013.6533507>
- [27] DALEX INDUSTRIAL WELDING MACHINES: CLASS PMS [online]. DALEX GmbH [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: https://www.dalex.de/fileadmin/user_upload/DALEX_INDUSTRIAL_MACHINES.pdf
- [28] FOREJTOVÁ, Lucie, Tomáš ZAVADIL, Ladislav KOLAŘÍK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Jan SOVA. CHANGES IN EMISSIVITY OF THE ELECTRODES FOR RESISTANCE SPOT WELDING DUE TO THEIR WEAR. *Metal 2019* [online]. BRNO, 2019, 6 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.confer.cz/metal/2019/read/855-changes-in-emissivity-of-the-electrodes-for-resistance-spot-welding-due-to-their-wear.pdf>
- [29] 39D 1978/2. In: *LASKA Technika Przemysłowa*. Dostupné také z: <https://www.laska.com.pl/en/offer/electrodes>

Seznam obrázků

Obr. 1 - schéma bodového svařování [5]	12
Obr. 2 - rozdělení dílčích odporů celkového dynamického odporu [6]	14
Obr. 3 – typické průběhy dílčích odporů při bodovém odporovém svařování [9]	16
Obr. 4 - metalurgický proces během odporového svařování [3]	17
Obr. 5 - geometrie bodového svaru [4].....	18
Obr. 6 - schéma průběhů svařovacího proudu různých svařovacích zdrojů [3].....	24
Obr. 7 - základní pojmy během svařovacího cyklu [3].....	26
Obr. 8 - DENGENSHA – WS-100 [22]	32
Obr. 9 - ENTRON – WA2 [22].....	32
Obr. 10 - WELDING TECHNOLOGY CORPORATION – The Wave [22].....	33
Obr. 11 - MIYACHI UNITEK – MM-315B [22]	33
Obr. 12 - TECNA – TE1700C [22]	34
Obr. 13 - povlak oceli DC 05 + ZE (zvětšení 500x)	37
Obr. 14 - povlak oceli HX 180 BD + Z100 (zvětšení 500x)	38
Obr. 15 - středofrekvenční odporový lis DALEX PMS 11-4	39
Obr. 16 - schéma a reálná fotografie elektrodových čepiček 39D 1978-2 [29]	40
Obr. 17 - měření přitlačné síly pomocí snímače TECNA	45
Obr. 18 - detail DC 05 + ZE - 5,6 V - 126 (zvětšení 50x)	54
Obr. 19 - detail HX 180 BD + Z100 - 1,2 V - 126 (zvětšení 100x)	54
Obr. 20 - detail povlaku materiálu DC 05 + ZE (zvětšení 50x).....	54
Obr. 21 - detail povlaku HX 180 BD + Z100 (zvětšení 50x)	54
Obr. 22 - defektoskop OLYMPUS EPOCH 650.....	58
Obr. 23 - zkušební zařízení LabTest 5.100SP1	63
Obr. 24 - porušení svarového spoje typ A	64
Obr. 25 - porušení svarového spoje typ B	64
Obr. 26 - porušení svarového spoje typ C	65
Obr. 27 - porušení svarového spoje typ D.....	65
Obr. 28 - porušení svarového spoje typ E	65

Seznam grafů

Graf 1 - typický průběh svařovacího proudu a napětí	43
Graf 2 - porovnání nefiltrovaných a filtrovaných hodnot dynamického odporu	44
Graf 3 - příklady průběhů reálné přítláčné síly elektrod v čase	46
Graf 4 - průměrné hodnoty přítláčných sil elektrod a lineární proložení těchto dat	47
Graf 5 - vliv přítláčné síly na dynamický odpor pro materiál DC 05 + ZE	50
Graf 6 - vliv přítláčné síly na dynamický odpor pro materiál HX 180 BD + Z100.....	50
Graf 7 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor pro materiál DC 05 + ZE.....	52
Graf 8 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor pro materiál HX 180 BD + Z100	52
Graf 9 - příklady průběhů z mechanizované zkoušky stříhem pro různé typy porušení	66
Graf 10 - maximální síly potřebné k porušení svarů materiálu DC 05 + ZE.....	68
Graf 11 - maximální síly potřebné k porušení svarů materiálu HX 180 BD + Z100	68
Graf 12 - průměry svarových čoček materiálu DC 05 + ZE	71
Graf 13 - průměry svarových čoček materiálu HX 180 BD + Z100	71

Seznam tabulek

Tab. 1 - nastavení svařovacích parametrů pro materiály DC 05 + ZE a HX 180 BD + Z100	35
Tab. 2 - číslování svarů pro jedno nastavení a jeden materiál	36
Tab. 3 - chemické složení oceli DC 05 + ZE [24].....	37
Tab. 4 - mechanické vlastnosti oceli DC 05 + ZE [24]	37
Tab. 5 - chemické složení oceli HX 180 BD + Z100 [25]	38
Tab. 6 - mechanické vlastnosti oceli HX 180 BD + Z100 [25]	38
Tab. 7 - chemické složení elektrodových čepiček 39D 1978-2 [28]	40
Tab. 8 - průměrné hodnoty reálných přítláčných sil elektrod DC 05 + ZE	46
Tab. 9 - průměrné hodnoty reálných přítláčných sil elektrod HX 180 BD + Z100	47
Tab. 10 - snímky kontaktní plochy svarů materiálu DC 05 + ZE	55
Tab. 11 - snímky kontaktní plochy svarů materiálu HX 180 BD + Z100	56
Tab. 12 - snímky el. čepiček po svaření vzorků materiálu DC 05 + ZE a HX 180 BD + Z100	57
Tab. 13 - výsledky zkoušky ultrazvukem pro materiál DC 05 + ZE a HX 180 BD + Z100	58
Tab. 14 - snímky z metalografické zkoušky DC 05 + ZE a HX 180 BD + Z100.....	60
Tab. 15 - hloubka vtisků elektrod materiálu DC 05 + ZE a HX 180 BD + Z100 v [μm].....	62

Přílohy

- Příloha 1 - vliv přítlačné síly na dynamický odpor DC 05 + ZE (vzorek 1-6)
- Příloha 2 - vliv přítlačné síly na dynamický odpor DC 05 + ZE (vzorek 41-46)
- Příloha 3 - vliv přítlačné síly na dynamický odpor DC 05 + ZE (vzorek 81-86)
- Příloha 4 - vliv přítlačné síly na dynamický odpor DC 05 + ZE (vzorek 121-126)
- Příloha 5 - vliv přítlačné síly na dynamický odpor DC 05 + ZE (vzorek 161-166)
- Příloha 6 - vliv přítlačné síly na dynamický odpor HX 180 BD + Z100 (vzorek 1-6)
- Příloha 7 - vliv přítlačné síly na dynamický odpor HX 180 BD + Z100 (vzorek 41-46)
- Příloha 8 - vliv přítlačné síly na dynamický odpor HX 180 BD + Z100 (vzorek 81-86)
- Příloha 9 - vliv přítlačné síly na dynamický odpor HX 180 BD + Z100 (vzorek 121-126)
- Příloha 10 - vliv přítlačné síly na dynamický odpor HX 180 BD + Z100 (vzorek 161-166)
- Příloha 11 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor DC 05 + ZE ($P = 0,8 \text{ V}$)
- Příloha 12 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor DC 05 + ZE ($P = 2,0 \text{ V}$)
- Příloha 13 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor DC 05 + ZE ($P = 3,2 \text{ V}$)
- Příloha 14 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor DC 05 + ZE ($P = 4,8 \text{ V}$)
- Příloha 15 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor DC 05 + ZE ($P = 5,6 \text{ V}$)
- Příloha 16 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor HX 180 BD + Z100 ($P = 1,2 \text{ V}$)
- Příloha 17 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor HX 180 BD + Z100 ($P = 2,4 \text{ V}$)
- Příloha 18 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor HX 180 BD + Z100 ($P = 3,6 \text{ V}$)
- Příloha 19 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor HX 180 BD + Z100 ($P = 4,8 \text{ V}$)
- Příloha 20 - vliv opotřebení el. čepiček na dynamický odpor HX 180 BD + Z100 ($P = 6,0 \text{ V}$)