



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Ověření nastavení velikosti svařovacího proudu při odporovém svařování na zařízení s adaptivním řízením vnesené energie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Vít Janouch

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

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janouch** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **483237**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Ověření nastavení velikosti svařovacího proudu při odporovém svařování na zařízení s adaptabilním řízením velikosti vnesené energie

Název bakalářské práce anglicky:

The verification of welding current magnitude setting at resistance welding on equipment with adaptive control of energy input

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je rozbor problematiky způsobu řízení svařovacího procesu při odporovém svařování. Porovnání velikosti a geometrie svarové čochy při různém nastavení % svařovacího proudu v režimu automatického svařování.
- Popis technologie svařování elektrickým odporem se zaměřením na výrobu automobilových karosérií, zařízení
- Návrh experimentu pro ověření vlivu různého nastavení % svařovacího proudu v režimu automatického svařování na kvalitu a geometrii svarového spoje
- Svaření zkušebních vzorků a vyhodnocení experimentu
- Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Plíva, L.: Odporové svařování. SNTL, Praha, 1975
- [2] Zhang, H., Senkara, J.: Resistance Welding: Fundamentals and Applications, CRC Press, 2nd. Edition, 2011
- [3] O. Balihar, Vliv způsobu řízení svařovacího procesu na kvalitu odporových svarů, ČVUT FS, BP, 2019
- [4] databáze WoS a Scopus

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské 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 bych poděkovat vedoucí mé bakalářské práce paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za odborné vedení, vstřícný přístup a cenné rady při zpracování této bakalářské práce a v neposlední řadě také za pomoc při svařování vzorků. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Vítu Novákovi za pomoc při realizaci mechanizované zkoušky stříhem. Poděkování patří i mé rodině, přátelům a blízkým za podporu a trpělivost během celého studia.

Anotace

Název diplomové práce: Ověření nastavení velikosti svařovacího proudu při odporovém svařování na zařízení s adaptivním řízením vnesené energie

Autor práce: Vít Janouch

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

Akademický rok: 2020/2021

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

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

Rozsah práce: 45 stránek, 12 tabulek, 20 obrázků, 7 grafů

Klíčová slova: odporové bodové svařování, adaptivní řízení svařovacího procesu, svařovací proud, mechanizovaná zkouška stříhem, maximální síla, průměr svarové čocky

Abstrakt: Tato bakalářská práce je zaměřena na ověření nastavení velikosti svařovacího proudu, respektive parametru W02 [%], při odporovém svařování na zařízení s adaptivním řízením vnesené energie. Práce obsahuje popis odporového bodového svařování, vývoj materiálového konceptu karosérie Audi A8, způsoby řízení svařovacího procesu a experimentální část. Pro vyhodnocení experimentální části byla použita vizuální kontrola povrchových vad, metalografická zkouška a mechanizovaná zkouška stříhem, ze které byly do grafů vyneseny maximální síly potřebné k porušení svarů. Na roztržených vzorcích byly poté měřeny průměry svarových čockek a následně byly vyneseny do grafů. Z grafů vyplývá, že optimální nastavení parametru W02 je kolem 50 %.

Annotation

Title of the final thesis:	The verification of welding current magnitude setting at resistance welding on equipment with adaptive control of energy input
Author:	Vít Janouch
Supervisor:	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent:	45 pages, 12 tables, 20 pictures, 7 graphs
Keywords:	resistance spot welding, adaptive welding process control, welding current, lap-shear test, peak force, nugget diameter
Abstract:	<p>This bachelor thesis is focused on the verification of welding current magnitude setting, or the parameter $W02$ [%], during resistance welding on a device with adaptive control of the input energy. The thesis contains a description of resistance spot welding, the development of the Audi A8 body material concept, methods for welding process controlling and an experimental section. Visual inspection of surface defects, metallographic test and lap-shear test were used to evaluate the experimental part, from which the maximum forces needed to break the welds were plotted in graphs. The diameters of the weld nuggets were then measured on the torn samples and subsequently plotted on the graphs as well. The graphs show that the optimum setting for the $W02$ parameter is around 50 %.</p>

Obsah

1	Úvod	3
2	Odporové svařování	4
2.1	Metody odporového svařování	4
3	Bodové svařování	7
3.1	Vznik tepla a odporu při bodovém svařování	7
3.2	Způsoby bodového svařování	9
3.2.1	Přímé bodové svařování	9
3.2.2	Nepřímé bodové svařování	10
3.3	Geometrie bodového svaru	11
3.4	Kontrola bodových svarů	12
3.4.1	Vizuální kontrola povrchových vad	12
3.4.2	Mechanizovaná zkouška stříhem	13
3.4.3	Metalografická zkouška	13
4	Řízení svařovacího procesu při odporovém svařování	14
4.1	Zdroje energie	14
4.2	Způsoby řízení svařovacího procesu	15
4.3	Adaptivní řízení svařovacího procesu	17
5	Materiály v automobilovém průmyslu	18
5.1	Oceli využívané v automobilovém průmyslu	18
5.2	Vývoj materiálového konceptu karosérie Audi A8	19
6	Návrh experimentu	22
6.1	Popis experimentu	22
6.2	Použité materiály	23
6.3	Svařovací zařízení	25
7	Vyhodnocení experimentu	27
7.1	Naměřené veličiny v průběhu svařování	27
7.2	Vizuální kontrola povrchových vad	29
7.3	Metalografická zkouška	33
7.4	Mechanizovaná zkouška stříhem	36
7.5	Měření průměrů svarových čoček	39
8	Závěr	41

Seznam použité symboliky

$Q [J]$	celkové teplo
$R [\Omega]$	celkový odpor
$I [A]$	svařovací proud
$t [s]$	celkový čas
$R_1 [\Omega]$	měrný odpor horní elektrody
$R_2 [\Omega]$	přechodový odpor mezi horní elektrodou a materiálem
$R_3 [\Omega]$	měrný odpor horního plechu
$R_4 [\Omega]$	přechodový odpor mezi svařovanými plechy
$R_5 [\Omega]$	měrný odpor dolního plechu
$R_6 [\Omega]$	přechodový odpor mezi dolní elektrodou a materiálem
$R_7 [\Omega]$	měrný odpor dolní elektrody
$t_{E1} [mm]$	hloubka vtlačení horní elektrody
$t_{E2} [mm]$	hloubka vtlačení dolní elektrody
$d_{E1} [mm]$	průměr vtlačení horní elektrody
$d_{E2} [mm]$	průměr vtlačení 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
$d_L [mm]$	průměr svarové čočky
$W02 [\%]$	referenční energie
$t_p [mm]$	tloušťka plechu
$t_{Emax} [mm]$	maximální hloubka vtlačení elektrody
$F_{min} [N]$	minimální hodnota síly potřebné k porušení svaru
$d_{min} [mm]$	minimální průměr svarové čočky

1 Úvod

Odporové svařování bylo patentováno již v roce 1887 a to nezávisle na sobě nejprve E.Thompsonem (USA) a následně N.N.Benardosem (RU), ale vzhledem k nedostatečné kvalitě zdrojů střídavého proudu a elektrických prvků pro regulaci neměla tato metoda aplikovatelné využití v průmyslu. Prudký rozmach však zažila v roce 1925, především díky rozvoji svařování kovů v automobilovém průmyslu. [1; 2]

S nástupem samonosných karosérií vznikl problém spojování ocelových plechů. Pro tuto aplikaci se metoda odporového svařování ukázala jako velmi výhodná a nastal tak prudký vývoj v oblasti svařovacích odporových zdrojů. Tato metoda do určité míry dokáže kompenzovat některé nepřesnosti vzniklé při výrobě plechových výlisků, také je to velice efektivní metoda spojování plechů a při porovnání s ostatními svařovacími metodami ji provází vysoká produktivita práce. V dnešní době se tato metoda hojně využívá především v automobilovém průmyslu, ale i v průmyslu potravinářském a dalších. [1]

Při jízdě automobilem je v současnosti kladen velký důraz na bezpečnost. To je úzce spjato s deformačními zónami a celkovou tuhostí karosérií automobilů. Neméně důležitá je také úspora hmotnosti, a to především kvůli emisím. Z těchto důvodů se v dnešní době na karosérie automobilů uplatňují ocelové plechy různých pevností, chemického složení, tloušťek, ale také i rozličné materiály jako jsou například hliníkové slitiny, hořčíkové slitiny, kompozity a další. Využívání plechů různých pevností však způsobuje i problémy například při tváření či svařování.

Bakalářská práce je zaměřena na popis odporového svařování, způsob hodnocení kvality bodových svarů, rozbor problematiky způsobu řízení svařovacího procesu a na materiály využívané v automobilovém průmyslu. Experimentální část této práce je věnována ověření vlivu různého nastavení velikosti svařovacího proudu, respektive parametru W02 v režimu automatického svařování na kvalitu a geometrii svarového spoje.

2 Odporové svařování

Odporové svařování je metoda spojování materiálů založená na průchodu elektrického proudu svařovaným místem za působení tlaku svařovacích elektrod. Nejprve začne působit tlak vyvinutý svařovacími elektrodami a následně dojde k sepnutí proudu. Při průchodu elektrického proudu se díky odporovému teplu materiál v místě budoucího svaru ohřeje a následně dojde k jeho natavení. To vede ke vzniku svaru. Samotné elektrody jsou zpravidla vyrobeny z mědi či ze slitin mědi. [1]

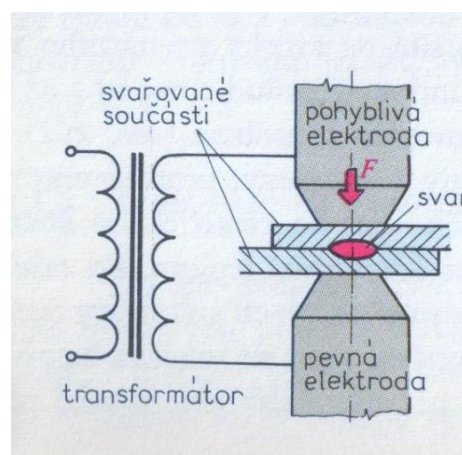
Při porovnání této svařovací metody s jinými metodami disponuje bodové odporové svařování velkou produktivitou práce. Jedná se také o velmi hygienickou metodu, jelikož samotný svářeč nepotřebuje kromě brýlí a běžného pracovního oděvu žádné další speciální ochranné pomůcky. [1]

2.1 Metody odporového svařování

Odporové svařování lze dělit podle konstrukčního uspořádání elektrod na bodové svařování, švové svařování, výstupkové svařování a na stykové svařování.

Bodové svařování

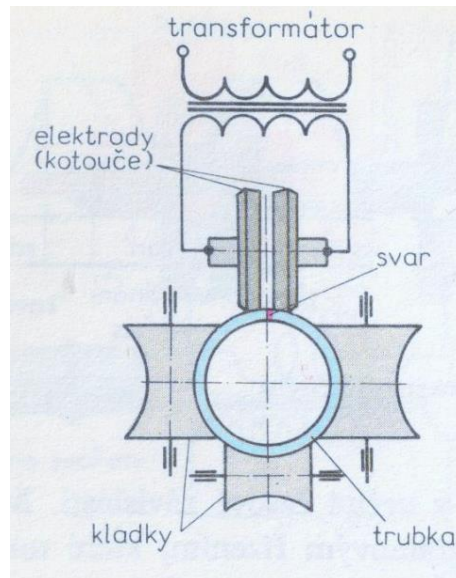
Přeplátované díly se vloží mezi svařovací měděné elektrody, kde se stlačí a tím se vytvoří podmínky pro svaření materiálů. Svařením vznikne takzvaná svarová čočka (bodový svar). Schéma je zobrazeno na Obr. 1. [2; 3]



Obr. 1 - schéma bodového svařování [4]

Švové svařování

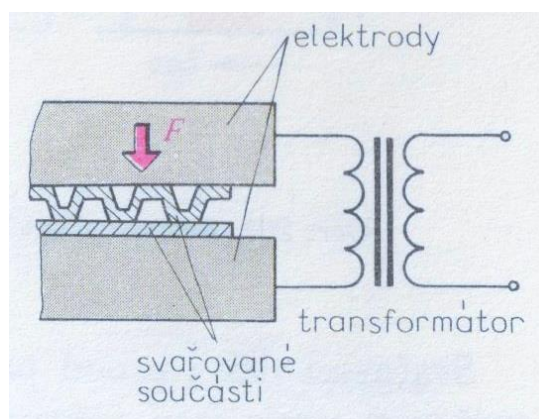
Na obvykle přeplátovaných dílech se vytváří souvislý či přerušovaný svar za pomoci kotoučových elektrod. Vnikají tak bodové svary v jedné souvislé linii, které se mohou, ale také nemusí navzájem překrývat. Pomocí švového svařování se vyrábějí například i trubky, viz schéma na Obr. 2. [2; 3]



Obr. 2 - schéma švového svařování [4]

Výstupkové svařování

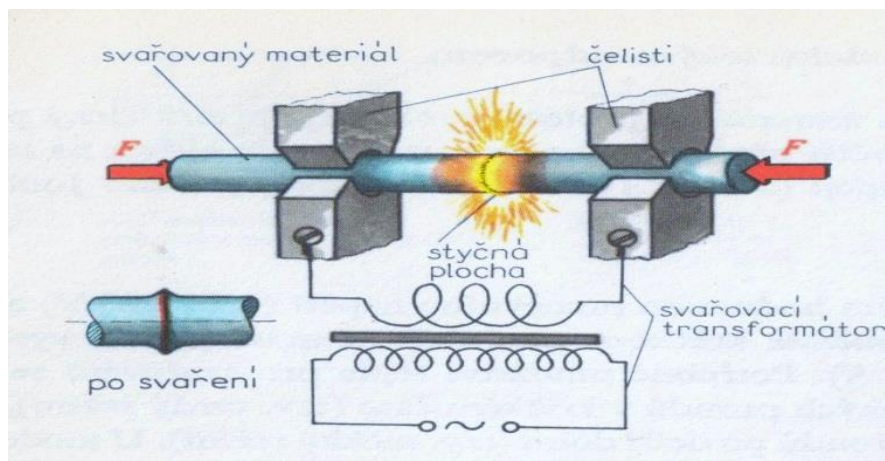
Svary se vytvářejí za pomoci proudu a za působení tlaku ve speciálních přípravcích na takzvaných svařovacích lisech. Svařované plochy na sobě mají přirozeně nebo záměrně vytvořené výstupky, které napomáhají vytvoření svaru. Schéma je na Obr. 3. [2; 3]



Obr. 3 - schéma výstupkového svařování [4]

Stykové svařování

Jedná se o metodu odporového svařování, při kterém se svar vytváří v celé styčné ploše spojovaných materiálů přiložených k sobě. Rozlišují se dva typy stykového svařování. Prvním typem je pýchovací stykové svařování, při kterém se k sobě materiály přitlačí tlakovou silou, následně se průchodem proudu začnou odporově ohřívat, dokud se nedosáhne požadované teploty a tím se materiály svaří. Druhým typem je odtavovací stykové svařování, při kterém se materiály k sobě přitisknou a následně začne procházet proud. Poté se materiály začnou oddalovat a přibližovat v rychlém sledu, čímž se natáhne oblouk s měnící se délkou. Vzniklým obloukem se nataví místa budoucího spoje. Následným přitlačením k sobě dojde ke svaření. Při této fázi vzniká výronek, jak je natavený materiál tlačěn z místa styku ven. Schéma je zobrazeno na Obr. 4. [2; 3]



Obr. 4 - schéma stykového svařování [4]

3 Bodové svařování

Bodové odporové svařování je způsob svařování, při kterém se vloží mezi dvě dobře vodivé měděné elektrody dva či více plechů. Svařovací elektrody působí tlakovou silou na svařovaný materiál a jsou připojeny na transformátor, který generuje svařovací proud vysoké intenzity. Vlivem odporu vzniká v místě styku materiálů Jouleho teplo, které nataví svařovaný materiál a tím dojde ke vzniku bodového svaru. Jedná se o velmi rychlý proces, u kterého je nutné, aby výsledná svarová čochka měla předepsané rozměry a pevnost. [3]

3.1 Vznik tepla a odpory při bodovém svařování

Celkové množství tepla lze podle Jouleho zákona vyjádřit vzorcem:

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

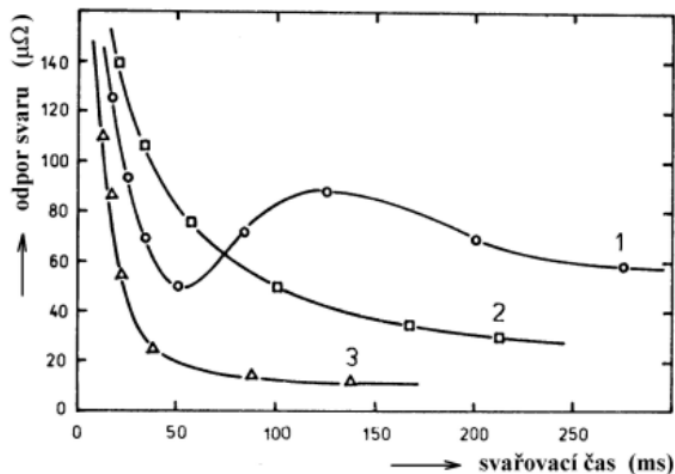
kde Q – celkové teplo [J]

R – celkový odpor [Ω]

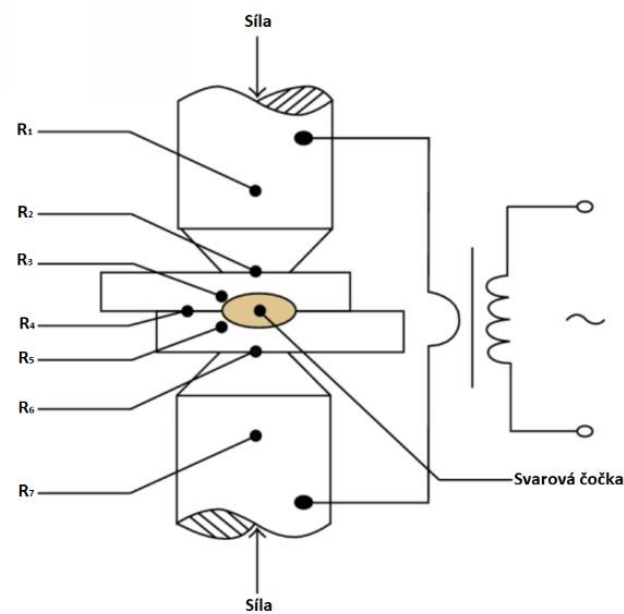
I – svařovací proud [A]

t – celkový čas [s]

Celkový odpor (R) není po celou dobu svařování konstantní, viz Obr. 5 a je tvořen dílčími odpory. Mezi dílčí odpory patří měrný odpor materiálu elektrod (R_1, R_7), přechodové odpory (R_2, R_4, R_6) a měrný odpor svařovaného materiálu (R_3, R_5), viz Obr. 6.



Obr. 5 - časová závislost elektrického odporu v průběhu svařování (1 – nelegovaná nízkouhlíková ocel, 2 – Cr-Ni korozivzdorná ocel, 3 – slitiny Al) [2]



Obr. 6 - přechodové a materiálové odpor [5]

Měrný odpor elektrod (R_1, R_7) závisí na materiálu elektrod. Ve většině případů se jedná o elektrody vyrobené ze slitiny mědi, které mají dobrou vodivost, a navíc jsou chlazeny, takže výsledný odpor je minimální. [2; 6]

Přechodové odpory mezi elektrodou a materiálem (R_2, R_6) závisí na velikosti, čistotě a drsnosti styčných ploch elektrod. Dalším parametrem ovlivňující přechodový odpor, je tlak, kterým elektrody působí na materiál. Přechodové odpory mezi elektrodami a materiálem jsou při svařování nežádoucí a je snaha je minimalizovat. [2; 6]

Přechodový odpor mezi svařovanými materiály (R_4) závisí na ploše styku, na čistotě a drsnosti povrchů, na vrstvě oxidů a zejména pak na teplotě. S rostoucí teplotou přechodový odpor mezi svařovanými materiály klesá až do okamžiku, kdy na styku materiálů vznikne tekutá fáze, při které zcela zanikne. [2; 6]

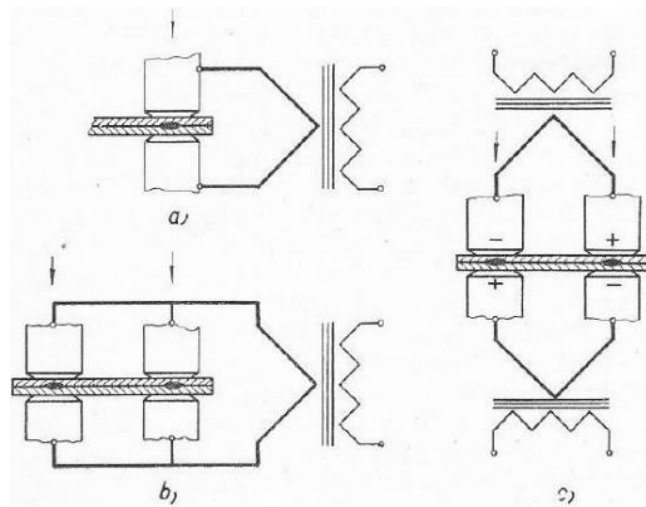
Měrný odpory svařovaných materiálů (R_3, R_5) závisí na tloušťce materiálů, na efektivním průřezu, kterým protéká proud, a také na teplotě, jelikož s rostoucí teplotou tento odpor výrazně stoupá. [2; 6]

3.2 Způsoby bodového svařování

Podle umístění elektrod, lze bodové svařování rozlišit na dva způsoby. Prvním způsobem je přímé bodové svařování a druhým je nepřímé bodové svařování.

3.2.1 Přímé bodové svařování

Elektrody jsou umístěny naproti sobě v jedné ose. Svarová čočka tedy vzniká přímo mezi dvěma elektrodami. Přímé bodové svařování lze dělit podle schémat na Obr. 7. [3]



Obr. 7 - rozdělení přímého bodového svařování (a – jednobodové s protiběžnými elektrodami, b – dvojbodové v paralelním zapojení, c – dvojbodové v sériovém zapojení) [3]

Jednobodové s protiběžnými elektrodami

Svařuje se vždy postupně po jednom bodu. Elektrody jsou umístěny naproti sobě, spodní elektroda je většinou pevná a horní pohyblivá. [3]

Dvojbodové v paralelním zapojení

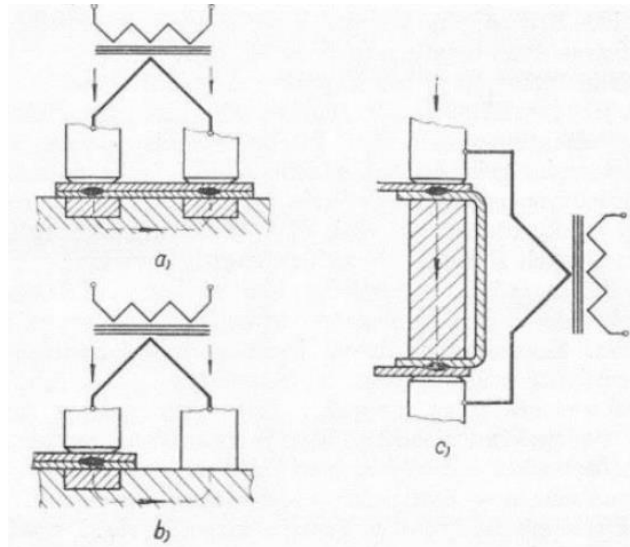
Svařuje se po dvou bodech. Dva páry protiběžných elektrod jsou paralelně připojeny na jeden transformátor. Je žádoucí, aby oba páry elektrod měly shodné podmínky pro svařování a docílilo se tak konzistentních výsledků. [3]

Dvojbodové v sériovém zapojení

Svařuje se po dvou bodech. Využívají se dva samostatné transformátory o stejném výkonu, které jsou připojeny na elektrody dle schématu na Obr. 7. Tato metoda se v praxi moc často nevyužívá. [3]

3.2.2 Nepřímé bodové svařování

Elektrody nejsou umístěny naproti sobě, nýbrž vedle sebe. Proud tedy protéká mezi elektrodami přes vodivou podložku a svar tak vzniká mezi plechy umístěnými mezi elektrodou a vodivou podložkou. Nepřímé bodové svařování lze dělit podle schémat na Obr. 8. [3]



Obr. 8 - rozdělení nepřímého bodového svařování (a – dvojbodové s rovnoběžnými elektrodami, b – jednobodové, c – dvoubodové s protiběžným můstkem) [3]

Dvojbodové s rovnoběžnými elektrodami

Elektrody se nachází souběžně vedle sebe a principem popsaným výše vznikají dva bodové svary. [3]

Jednobodové

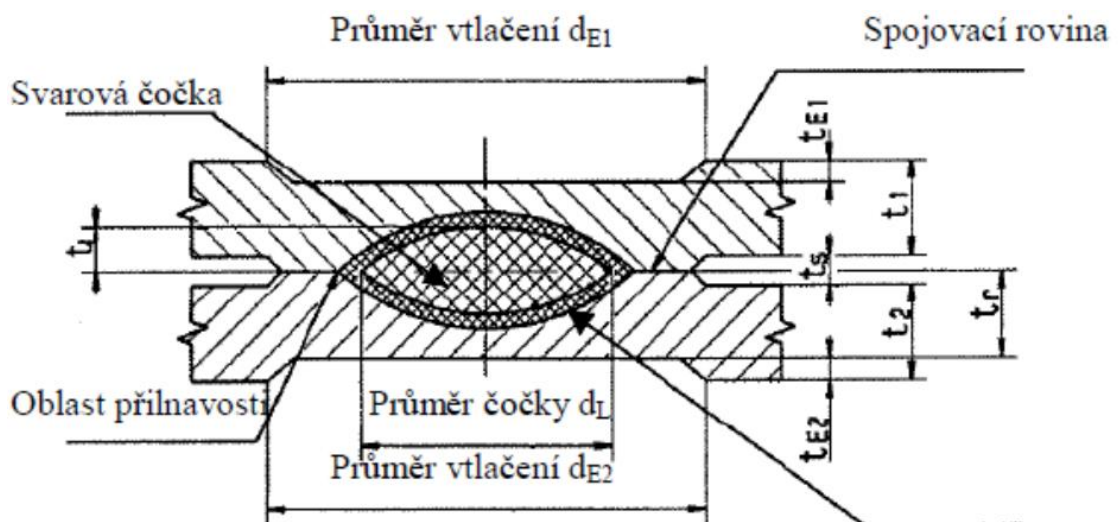
Obdobný způsob jako u dvoubodového svařování s rovnoběžnými elektrodami, ale jedna z elektrod slouží pouze pro přívod proudu a vzniká tak pouze jeden bod. [3]

Dvoubodové s protiběžným můstkem

Dvě elektrody jsou umístěny proti sobě a mezi jednotlivými svařovanými místy je umístěn vodivý můstek. Vznikají tak dva bodové svary mezi elektrodami a protiběžným můstkem. [3]

3.3 Geometrie bodového svaru

Geometrie a rozměry bodového svaru jsou pro finální vlastnosti svarového spoje velmi podstatné. Nejdůležitějším parametrem je velikost svarové čočky, která má největší vliv na výslednou pevnost spoje. Jde o střední průměr plochy lomu ve spojovací rovině plechů, který se měří při mechanizované zkoušce stříhem, po úplném oddělení obou plechů. Geometrie bodového svaru je zobrazena na Obr. 9. [3]



Obr. 9 - geometrie bodového svaru [3]

- t_{E1} hloubka vtlačení horní elektrody (maximálně 20% tloušťky plechu t_1)
- t_{E2} hloubka vtlačení dolní elektrody (maximálně 20% tloušťky plechu t_2)
- d_{E1} průměr vtlačení horní elektrody
- d_{E2} průměr vtlačení 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_L průměr svarové čočky

Minimální hodnota průměru svarové čocky, respektive minimální hodnota síly potřebné k porušení svaru, se určuje z tloušťek plechů. Pokud se svařují plechy o různých tloušťkách, použije se tloušťka tenčího plechu. Při dílenských zkouškách může dojít k nepřesnému vytržení svarové čocky a vzniknou tak výčnělky, jenž svými rozměry přesahují rozměry svarové čocky. Proto se pro stanovování průměru svarové čocky měří dva navzájem kolmé výčnělky, ze kterých je následně vypočtena průměrná hodnota. Pokud není možné přesné měření ve dvou směrech, je nutno použít menší průměr, než je průměr svarové čocky. [3; 7]

3.4 Kontrola bodových svarů

Bodové svary mohou být podrobeny různým zkouškám, díky kterým lze stanovit jejich kvalitu. Tyto zkoušky lze dělit na destruktivní a nedestruktivní. U destruktivních zkoušek dochází k poškození či úplnému zničení vzorků (svařovaných dílů). Naopak u nedestruktivních zkoušek nedochází k poškození vzorků a lze zjišťovat jak povrchové, tak i vnitřní vady bodového svaru. V následujícím textu jsou uvedeny pouze zkoušky, které jsou použity v experimentální části této bakalářské práce.

3.4.1 Vizuální kontrola povrchových vad

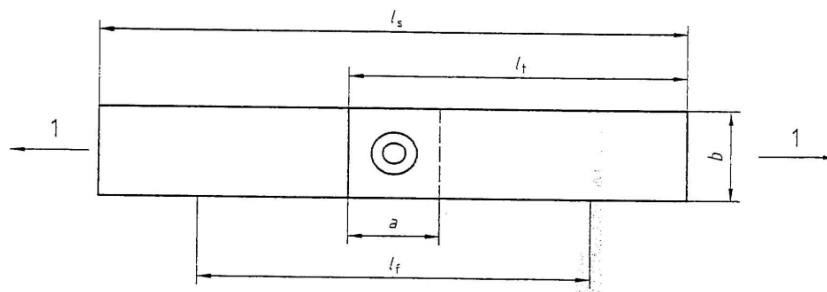
Tuto zkoušku upravuje norma ČSN EN ISO 17 637 – Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola. Jedná se o velmi jednoduchou, levnou a rychlou nedestruktivní zkoušku bodových svarů. Tato metoda zpravidla bývá použita jako první kontrola bodového svaru. Při této zkoušce se zjišťuje, zda svary vyhovují výkresové dokumentaci. Mezi parametry předepsané výkresovou dokumentací patří například počet a rozmístění svarů či jejich tvar. Pro vyhodnocení místních vad svaru na kvalitu spoje se pomocí speciálních měrek vyhodnocují vnější rozměry svaru. Jednou z možných vad, které lze za pomoci této zkoušky zjistit, je 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 elektrody by měly být identické, přičemž by neměly přesahovat 20 % tloušťky plechu. [8]

3.4.2 Mechanizovaná zkouška stříhem

Mechanizovaná zkouška stříhem se řídí normou ČSN EN ISO 14273 - Odporové svařování – Destruktivní zkoušky svarů – Rozměry vzorku a postup pro zkoušení stříhem odporových bodových, švových a výstupkových svarů. Při této zkoušce je vzorek upnut do čelistí univerzálního zkušebního stroje pro mechanizovanou zkoušku stříhem dle normy. Čelisti se poté konstantní rychlostí oddalují od sebe a tím dochází k zatěžování vzorku až do porušení svaru. U této zkoušky se zaznamenává síla potřebná k porušení vzorku a zkoumá se způsob porušení svaru a velikost svarové čochky. Rozměry vzorku pro je správné upnutí dle normy jsou zobrazeny na Obr. 10 a na Obr. 11. [7]

Tloušťka	Přeplátování	Volná délka mezi čelistmi	Délka upnutí v čelistech
t	a	l_f	l_c
$0,5 < t < 1,5$	35	95	40

Obr. 10 - rozměry vzorku pro jeho správné upnutí dle normy [7]



Obr. 11 - obecné rozměry vzorku pro jeho správné upnutí dle normy [7]

3.4.3 Metalografická zkouška

Metalografická zkouška se řídí normou ČSN EN ISO 17639 - Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů. Provádí se u velmi důležitých svarů jako doplňková zkouška. Při této zkoušce je svar rozříznut v rovině průměru svarové čochky, následně broušen, leštěn a leptán tak, aby byl svar dobře viditelný a mohla se zhodnotit mikrostruktura svaru, výskyt pórů, prasklin či bublin. Také lze posoudit průměr svarové čochky a hloubka vtisku elektrod do materiálu. Popřípadě je možné po této zkoušce provést zkoušku tvrdosti na rozříznutém vzorku. [9]

4 Řízení svařovacího procesu při odporovém svařování

Složité základní procesy a jejich komplikované vzájemné působení zapříčiňují hlavní obtíže svařovacího procesu. K efektivnímu a opakovatelnému řízení svařovacího procesu nepřispívá ani různé složení svařovaných materiálů, povlakové vrstvy nebo opotřebení elektrod. Vzhledem ke krátkým svařovacím časům a k tomu, že se svarová čoučka tvoří mezi plechy a není tak vidět, nelze kvalitu svaru jednoduše posoudit. Pro zjišťování kvality svaru musejí být provedeny mechanické zkoušky, při kterých dojde ke zničení svařovaných dílů. Pokud některá ze zkoušek odhalí nevyhovující svar, bývají zpravidla vyřazeny i ostatní díly ze série. Takový postup je velmi neekonomický a je proto velký zájem dosáhnout co nejlepší kvality svarů řízením a monitorováním svařovacího procesu. Navíc se mechanické zkoušky svarů provádí pouze na vybraných svarech ze série a nelze tak zaručit jejich kvalitu u všech ostatních svarů. Mezi hlavní cíle monitorování svařovacího procesu patří odhad velikosti svaru, detekce chyb procesu a jeho kontrola. [10; 11]

4.1 Zdroje energie

AC (Alternating Current)

Napájení střídavým proudem umožňuje velmi omezené možnosti úpravy výkonu. Jednofázový střídavý proud se stále používá převážně v automobilovém průmyslu kvůli jeho nákladům na zařízení a jeho spolehlivosti. [12]

DC (Direct Current)

Svařování stejnosměrným proudem je obecně výhodnější než svařování střídavým proudem, jelikož používá nižší proud a způsobuje tak menší opotřebení elektrod. Nevýhodou je nemožnost svařování hliníkových plechů. Frekvence stejnosměrných svařovacích zdrojů bývá převážně 50 Hz. [12]

CD (Capacitor Discharge)

Kondenzátorové svařování umožňuje, v důsledku akumulované elektrické energie v kondenzátorech, svaření ve velmi krátkém čase s extrémně vysokou hodnotou proudu. Tato metoda se vyznačuje dobrou kvalitou svarů s nízkou spotřebou energie. [12]

MFDC (Medium Frequency Direct Current)

Použití stejnosměrného proudu středních frekvencí snižuje špičkový proud a rovněž umožňuje kratší časy svařování tím, že eliminuje stav chlazení mezi cykly. [12]

4.2 Způsoby řízení svařovacího procesu

Způsoby řízení svařovacího procesu se dají rozdělit na dvě skupiny. První skupinou je řízení bez zpětné vazby a druhou je řízení se zpětnou vazbou.

Řízení svařovacího procesu bez zpětné vazby

V počátku bodového svařování byl svařovací proces řízen obsluhou, přičemž velmi záleželo na jejich zkušenostech. Obsluha ovládala jak přítlačnou sílu elektrod, tak i čas svařování. Vzhledem ke krátkým časům svařovacího procesu nemohlo být dosaženo kvalitních a opakovatelných svarů. Později byl čas svařování řízen diodami a později frekvenčními čítači. S vynálezem stejnosměrného proudu středních frekvencí (MFDC) bylo možné vytvářet svařovací programy, kterými se poté řídil samotný proces svařování. Bylo tak možné svařovat při konstantním proudu, napětí či výkonu. Vylepšením poté bylo svařování dle svařovacího programu, který obsahoval proud, napětí i přítlačnou sílu proměnné v čase. [13]

Řízení svařovacího procesu bez zpětné vazby má však velké nedostatky. Vzhledem k velkému množství různých materiálů, jejich povrchovým úpravám a různým tloušťkám plechů by bylo za potřebí obrovské množství svařovacích programů. Tento způsob řízení navíc nedokáže reagovat na chyby, které mohou nastat při svařovacím procesu. Mezi takové chyby lze zařadit například nečistoty na povrchu materiálů, měnící se geometrie elektrod vzniklá v důsledku opotřebení, proměnlivé tloušťky plechů a ochranných povrchových vrstev či špatné usazení plechů. Proto je výhodnější použití zpětnovazebního řízení. [13]

Řízení svařovacího procesu se zpětnou vazbou

Hlavní myšlenkou řízení svařovacího procesu se zpětnou vazbou je porovnávání regulované veličiny s referenční hodnotou. O to se stará monitorovací a řídicí systém, díky kterému lze předejít chybám vzniklým při svařovacím procesu. Univerzální monitorovací a řídicí systém začíná vstupem do svářecího zařízení, obvykle ve formě svařovacího programu, kde jsou zadány svařovací parametry. Výstup ze svařovacího zařízení je poté přiváděn do monitorovací jednotky, která zahrnuje sběr dat a zpracování signálů. Zpracované informace jsou pak předány řídicí jednotce, která je vyhodnotí a popřípadě upraví svařovací proces. Výsledky z monitorovacího procesu lze také využít pro kontrolu statistik a plánování údržby. [10; 13]

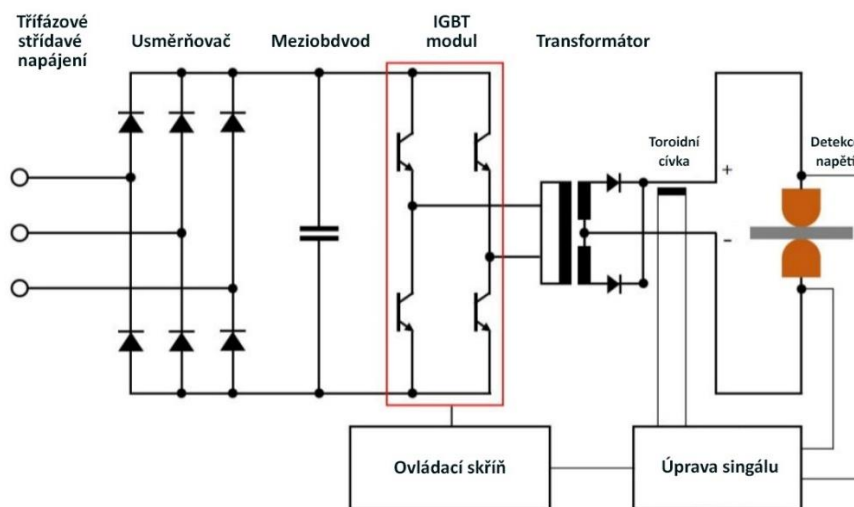
Mezi signály, které lze při sběru dat monitorovat patří například elektrické napětí a proud, dynamický odpor, posunutí elektrod, přítlačná síla a akustické emise. Při samotném svařování hraje velký vliv i magnetické rušení, které při získávání signálů může zapříčinit velké problémy se sběrem dat. [10; 13]

Řízení svařovacího procesu se zpětnou vazbou lze dělit na:

- FCS (Feedback Control System)
Zpětnovazební řídicí systém upravuje svařovací parametry během procesu svařování. [13]
- WWCS (Weld to Weld Control System)
Systém řízení od svaru ke svaru upravuje parametry svařování podle hodnot, které byly naměřeny u předchozího svaru. [13]
- MS (Monitoring System)
Monitorovací systém pouze detekuje a vyhodnocuje, zda svařování proběhlo dle plánu a svar má tak příslušnou pevnost. Pokud to není splněno, je možné přidat další svary. [13]

4.3 Adaptivní řízení svařovacího procesu

Adaptivní řízení svařovacího procesu se řadí mezi zpětnovazební řídicí systémy a je založeno na použití stejnosměrného proudu středních frekvencí – MFDC (Medium Frequency Direct Current). Bez použití MFDC by bylo zpětnovazební řízení procesu velmi obtížné, jelikož běžná frekvence v síti je 60 Hz. To by neumožňovalo snímání hodnot v dostatečné rychlosti a je proto nutné zvýšení frekvence až na hodnoty kolem 1 000 Hz či více. Schéma systému umožňující adaptivní řízení svařovacího procesu je zobrazeno na Obr. 12. Usměrňovač převádí třífázové střídavé napájení (380 V a 60 Hz) na stejnosměrné. Za usměrňovačem se nachází meziobvod a dále bipolární tranzistor s izolovaným hradlem – IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor), kde je proud přeměněn na vysokonapěťový střídavý proud o nízké hodnotě a střední frekvenci (1 000 Hz). Tento proud je v transformátoru přeměněn na nízkonapěťový střídavý proud vysokých hodnot a následně je opět usměrněn na stejnosměrný proud středních frekvencí. [14; 15]



Obr. 12 - schéma systému pro adaptivní řízení svařovacího procesu [14]

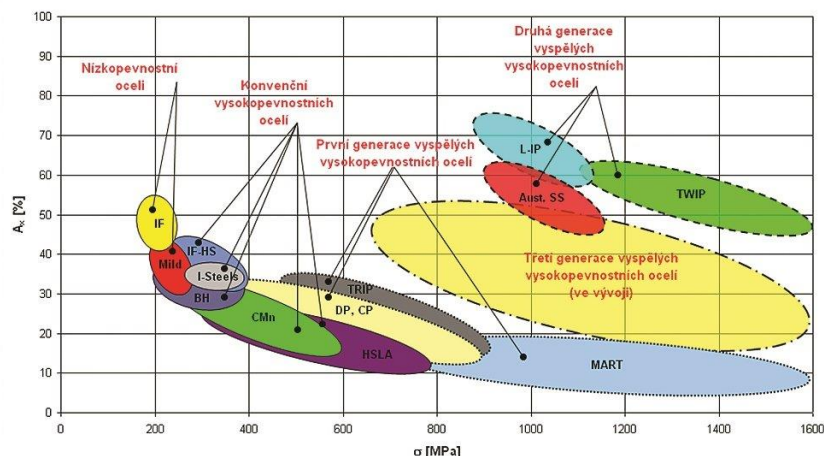
Při zpětnovazební řízení jsou v reálném čase měřeny různé signály, například elektrický proud, napětí, umístění elektrod, akustické emise atd. Z těchto monitorovaných a následně zpracovaných hodnot poté vychází nastavování svařovacích parametrů. Výhodou takového systému je díky rychlé regulaci optimální doba svařování, větší životnost elektrod, snížená možnost rozstříku rozžhaveného materiálu během svařování, vyšší účinnost zařízení a lepší kvalita svarů. Výhodou je také možnost použití vyšší frekvence než zmíněných 1 000 Hz, což umožňuje řízení svařovacího procesu v reálném čase. [14; 15]

5 Materiály v automobilovém průmyslu

Požadavky na materiály používané pro karosérie automobilů jsou velmi rozmanité. Značně důležitá je pevnost, a to především u nosných částí karosérie. Podstatná je také odolnost vůči únavovému namáhání nebo schopnost pohlcení energie například u deformačních prvků. U některých dílů bývají požadavky velmi rozmanité a někdy si mohou i částečně odporovat, například pevnost a plasticita. Plasticita hraje největší roli u vnějších dílů karoserie, které mají rozličné a složité tvary. Výběr materiálu výrazně ovlivňuje měrná hmotnost a cena. Z tohoto důvodu je vyvíjena snaha o různé kombinace materiálů a další vývoj nových materiálů. Opomenout nelze ani korozivzdornost a s ní spojené povrchové úpravy, které také mají velký vliv na svařitelnost, stejně tak jako různé druhy ocelí. Dobrým příkladem rozličnosti materiálů využívaných pro karosérie automobilů je čtvrtá generace Audi A8. U tohoto modelu automobilu se inteligentně kombinují různé druhy ocelí, hliníkové slitiny, hořčíkové slitiny a uhlíková vlákna, tak aby byla zachována co nejlepší tuhost při nízké hmotnosti. [16; 17]

5.1 Oceli využívané v automobilovém průmyslu

Na karosérie automobilů se používají různé druhy ocelí v závislosti na místě a účelu použití. Obecně lze tyto oceli rozdělit podle metalurgie na nízkopevnostní oceli, vysokopevnostní oceli, pokročilé vysokopevnostní oceli a vysokopevnostní za tepla tvářené oceli. Každý druh oceli má jinou tažnost a pevnost (viz Obr. 13) a podle toho se používá na určité díly karosérie. [16]



Obr. 13 - porovnání celkové tažnosti a meze kluzu ocelí [16]

5.2 Vývoj materiálového konceptu karosérie Audi A8

Audi A8 je čtyřdveřový luxusní sedan vyráběný německou automobilkou Audi od roku 1994. Předchůdcem tohoto automobilu byl model V8, vyráběný mezi lety 1988 a 1993. Modelová řada A8 je považována za vlajkovou loď automobilové společnosti Audi a je proslulá především díky jedinečné konstrukci karosérie. [18; 19; 20; 21]

První generace D2 (1994 – 2002)

Kořeny první generace Audi A8 sahají až do roku 1982, kdy tehdejší šéf vývoje automobilové společnosti Audi podepsal kontrakt se společností Aluminium Company of America (Alcoa). Ve spolupráci s touto společností měl vzniknout nový automobil s revoluční a lehkou konstrukcí karosérie. Výsledkem vývoje se stal celohliníkový prototyp karosérie modelu Audi V8, který byl v reálném provozu testován po celou dobu výroby modelu Audi V8. [18; 19]

V roce 1993 Audi představila koncepční vůz Audi ASF (Audi Space Frame), u kterého byla karosérie vyrobena především z hliníkových slitin. O rok později, tedy v roce 1994, přišla společnost Audi s první generací modelu Audi A8, který vycházel z koncepčního vozu Audi ASF. Podstatou tohoto modelu byla vysoká úspora hmotnosti za použití dílů ze slitin hliníku bez snížení bezpečnosti. Samotná výroba tohoto modelu se vyznačovala nízkým stupněm automatizace, kde až 75 % montáže bylo prováděno ručně. [18; 19]

Karosérie vážila 249 kg (bez dveří) a byla složena z 334 různých dílů, jako jsou hliníkové plechy, profily a odlitky. Hliníkové plechové výlisky poskytovaly karosérii tuhost, přičemž jich celkem bylo použito 237 a tvořily tak 71 % celkové hmotnosti. Součástí karosérie bylo 47 hliníkových profilů, tvořících 14 % celkové hmotnosti. Jako spojovací části sloužily hliníkové odlitky v celkovém počtu 50, které se tak podílely 15 % na celkové hmotnosti karosérie. [18; 19; 22]

Při výrobě byly použity tyto hliníkové slitiny:

- 6060 pro profily
- 6016 pro vnější plechové panely
- 6009 pro vnitřní plechové panely
- 5182 pro nosné plechové díly
- A356 pro odlévané díly

Druhá generace D3 (2002 – 2009)

S nástupem druhé generace Audi A8 nastala výrazná změna především ve stupni automatizace montáže a ve snížení počtu dílů. Celkový koncept karosérie vyráběné především ze slitin hliníku zůstal stejný. Snížil se počet profilů, naopak vzrostl počet odlévaných dílů, které nyní tvořily 34 % celkové hmotnosti karosérie. Hmotnost druhé generace sice mírně vzrostla na 277 kg, na druhou stranu ale vzrostla i celková torzní tuhost a to o 61 %. [23; 18]

Třetí generace D4 (2009 – 2017)

Koncept karosérie třetí generace zůstal stejný jako u předchozích generací, ale již zde byl patrný rozvoj vysokopevnostních ocelí. Vysokopevnostní ocel byla použita na středových B sloupcích a tvořila tak 8 % celkové hmotnosti karosérie. Počet použitých dílů klesl na 243. Oproti druhé generaci se celková torzní tuhost zvýšila o 21 % a hmotnost karosérie klesla na 231 kg. [18]

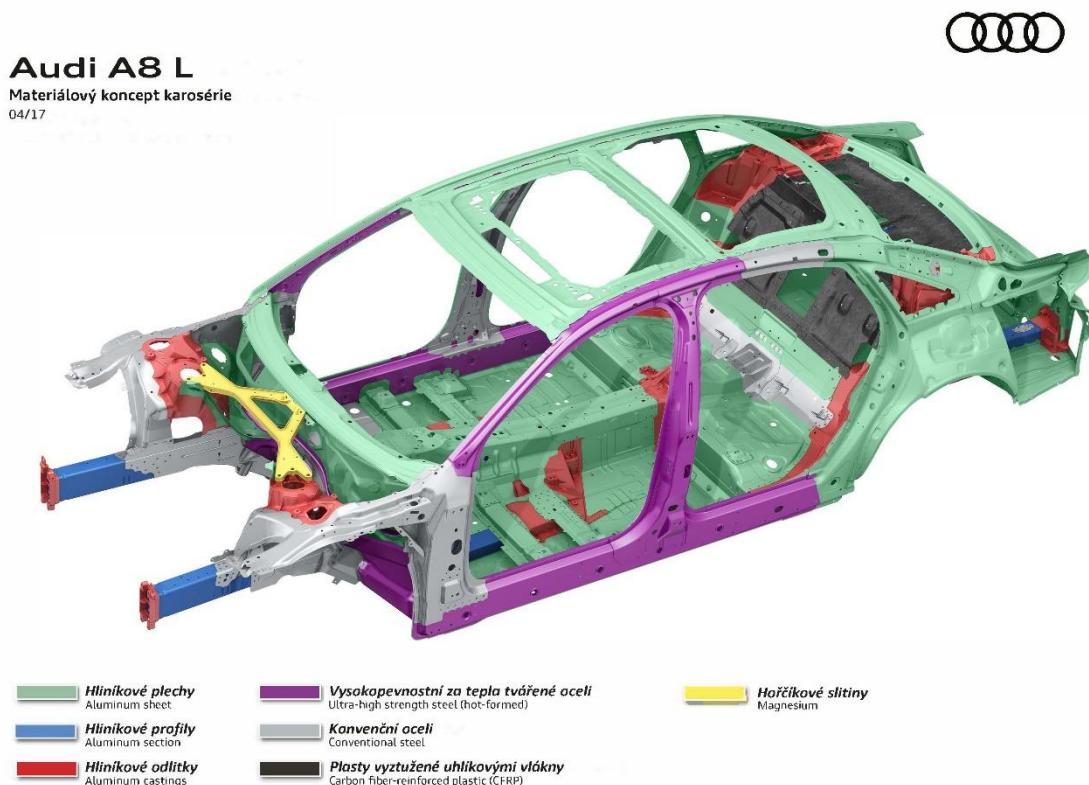
Čtvrtá generace D5 (2017 – současnost)

Čtvrtá generace modelu Audi A8 je, co se týče použitých materiálů, revoluční. Oproti předchozím modelům, které měly téměř celou karoserii z hliníkových slitin, přišla Audi s karoserií, kde jsou hliníkové slitiny zastoupeny pouze 58 % z celkové hmotnosti. [18; 22]

Velkou roli zde hrají vysokopevnostní oceli, které se na hmotnosti podílí 40,5 %. Důvodem pro tak výraznou změnu použitých materiálů je především vývoj vysokopevnostních ocelí, které mají až pětikrát větší pevnost než v době představení první generace Audi A8. Díky tomu se torzní tuhost karosérie zvýšila o 24 %, což přispívá k ovladatelnosti vozidla. Další podstatnou vlastností je to, že má ocel lepší akustické vlastnosti, což přispívá ke snížení vibrací a hluku. Nejdůležitější roli však hraje zvýšená bezpečnost. [18; 22]

Mimo hliníkových slitin a ocelí jsou ve čtvrté generaci Audi A8 použity materiály jako hořčíkové slitiny a kompozity s uhlíkovými vlákny. Například hořčíkový odlitek spojuje hliníkové odlitky horního uložení předních tlumičů s příčkou pod čelním oknem. Tento díl je tak až o třetinu lehčí, než kdyby byl vyroben z hliníku. Uhlíková vlákna jsou poté použita v zadní části automobilu. Materiálový koncept karosérie Audi A8 ve verzi L je zobrazený na Obr. 14. Celková hmotnost karosérie se od předchozí generace mírně zvýšila na 280 kg. [18; 22]

Při tak pestrém používání různých materiálů vzniká problematika spojování jednotlivých dílů. V předchozích generacích bylo využíváno především MIG svařování, popřípadě bodové a laserové svařování. Ve čtvrté generaci je použito celkem 14 technologií spojování dílů, a to od různých druhů svařování, přes lepení, až po použití nýtů či šroubů. [18]



Obr. 14 - materiálový koncept karosérie Audi A8 L [17]

6 Návrh experimentu

U moderních svařovacích zdrojů, které nepotřebují nastavovat žádné parametry, je třeba ověřit, jakým způsobem se při nastavování jediného možného parametru, který je udáván v procentech referenční hodnoty stanovené řídicím systémem stroje, mění velikost svarové čocky a síla potřebná k porušení svaru. Také je třeba určit, zda se jedná o lineární závislost či nikoliv a jaké nastavení je nejvýhodnější z hlediska pevnosti svaru, průměru svarové čocky a dalších požadavků na svar.

6.1 Popis experimentu

Při experimentu byl v ovládacím panelu řídicího systému, který je blíže popsán v kapitole 6.3, nastavován parametr W02, což je parametr závislý na svařovacím proudu. V systému ovládacího panelu je definován jako referenční energie a nastavuje se v procentech. Lze ho nastavit od 10 % až do 150 %, přičemž 100 % je referenční hodnota, která je určena řídicí jednotkou jako ideální pro svařování konkrétního plechu o konkrétní tloušťce. Závislost svařovacího proudu na parametru W02 je blíže popsána v kapitole 7.1, kde se nacházejí grafy naměřených veličin v průběhu svařování. Je tedy důležité zmínit, že se nastavuje pouze jeden parametr, kterým je W02 [%]. Ostatní hodnoty není třeba nastavovat, jelikož si je stroj nadefinuje sám.

Pro experiment bylo zvoleno maximální možné rozmezí hodnot, které lze nastavit. Svařování tedy probíhalo od 10 % do 150 % vždy po deseti procentech. Pro každé nastavení bylo zhotoveno celkem 12 svarů. Dle normy bylo 11 svarů použito na vyhodnocení mechanizované zkoušky stříhem a zbylý 1 svar na metalografickou zkoušku. Naměřené veličiny byly v průběhu svařování zaznamenávány na externí měřící zařízení.

Pro experiment byly použity dvě různé oceli, DC 05 a HX 180 BD, ze kterých byly nastříhány vzorky o rozměrech 95x45 mm, které poté byly svařeny dle nastavení parametru W02. Již svařené vzorky byly popsány druhem materiálu, procenty nastavení parametru W02 a číslem udávající pořadí vzorku při konkrétním nastavení, aby nedošlo k jejich záměně. Pro každý materiál byla použita jedna sada elektrodových čepiček, aby bylo možné vyhodnotit, jak se v závislosti na druhu materiálu liší jejich opotřebení.

6.2 Použité materiály

Pro experiment byly použity dva odlišné materiály. Jedná se o materiál DC 05 a materiál HX 180 BD. Důvodem pro zvolení dvou materiálů namísto jednoho bylo ověření, zda se výsledná závislost sil potřebných k porušení svarů, respektive průměr svarové čočky na nastavení parametru W02, bude lišit či nikoliv.

DC 05 + ZE

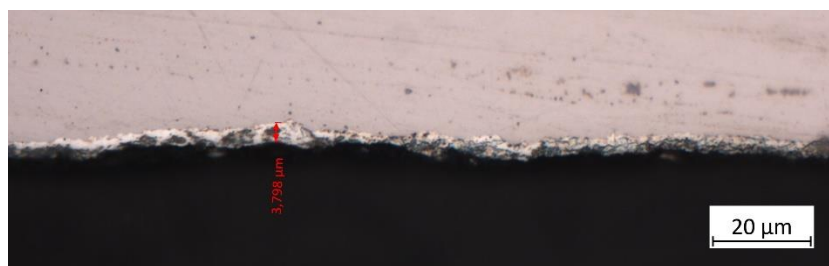
Materiál DC 05 je hlubokotažná ocel vhodná pro tváření za studena. Tato ocel se nejčastěji využívá v automobilovém průmyslu pro velmi tvarově složité díly. Chemické složení oceli DC 05 je zobrazeno v Tab. 1 a mechanické vlastnosti v Tab. 2. Tloušťka použitého plechu je 0,7 mm a jeho povrch je opatřen galvanickým zinkem o tloušťce 3,8 μm (viz Obr. 15). [24]

Tab. 1 - chemické složení oceli DC 05 [24]

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

Tab. 2 - mechanické vlastnosti oceli DC 05 [24]

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



Obr. 15 - povrchová vrstva oceli DC 05 (zvětšení 500x)

HX 180 BD + Z100

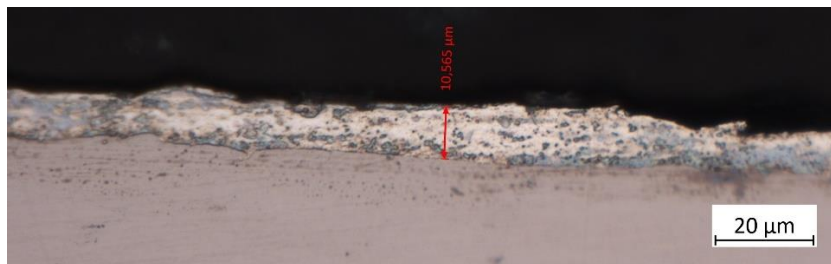
Materiál HX 180 BD patří do skupiny vysokopevnostních ocelí. Tyto oceli jsou válcované za studena a hodí se například na disky kol či panely podlah karosérie automobilů. Chemické složení oceli HX 180 BD je zobrazeno v Tab. 3 a mechanické vlastnosti v Tab. 4. Tloušťka použitého plechu je 0,6 mm a jeho povrch je opatřen žárovým zinkem o tloušťce 10,6 μm (viz Obr. 16) a tenkou vrstvou heptahydrátu síranu zinečnatého. [25]

Tab. 3 - chemické složení oceli HX 180 BD [25]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Nb [%]	Ti [%]	Al [%]
$\leq 0,1$	$\leq 0,5$	$\leq 0,7$	$\leq 0,6$	$\leq 0,025$	$\leq 0,09$	$\leq 0,12$	$\geq 0,1$

Tab. 4 - mechanické vlastnosti oceli HX 180 BD [25]

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

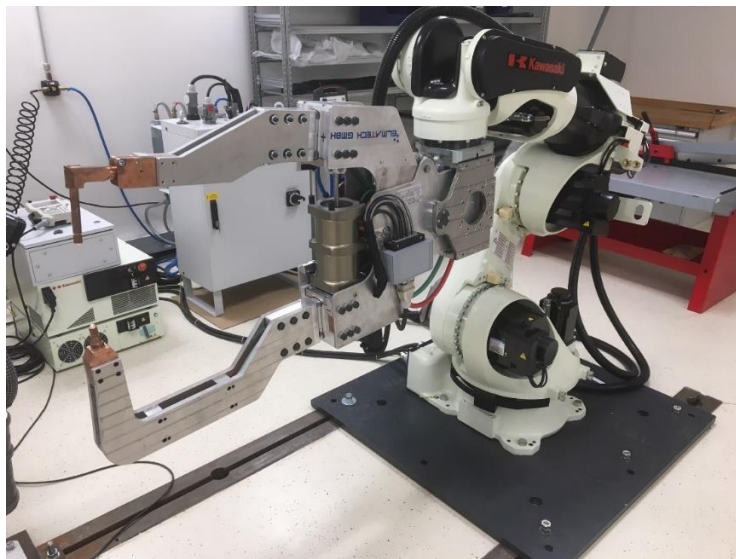


Obr. 16 - povrchová vrstva oceli HX 180 BD (zvětšení 500x)

6.3 Svařovací zařízení

ELMATECH VISION VR

Pro svaření vzorků byl použit svařovací systém ELMATECH VISION VR, který se skládá z ovládací skříně ELMATECH – VMC VISION ROB, externího ovládacího panelu a robotických svařovacích kleští typu G. Samotné kleště jsou uchyceny na průmyslovém robotu Kawasaki. Svařovací zařízení včetně ovládací skříně, kleští a průmyslového robota je na Obr. 17.



Obr. 17 - použité svařovací zařízení

ELMATECH – VMC VISION ROB

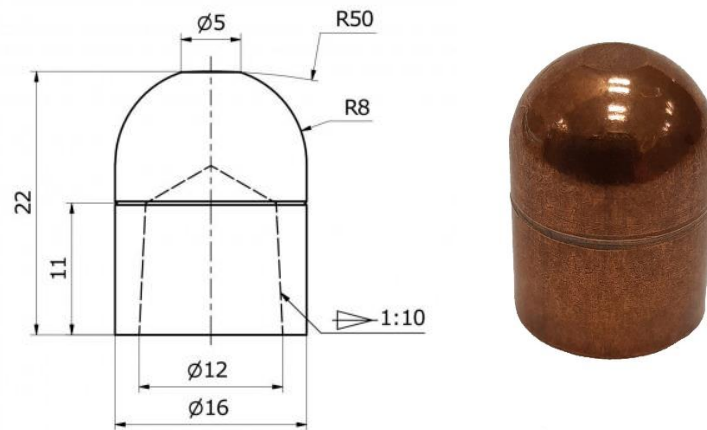
Řídící jednotka ELMATECH – VMC VISION ROB je nejdůležitější částí celého systému. Jedná se o ovládací skříně pro plně automatické bodové svařování v průmyslové a automobilové výrobě. Při svařování se tedy nemusí zadávat vstupní hodnoty a řídicí jednotka si tyto hodnoty nadefinuje skrze měření tloušťky plechů a přechodového odporu na začátku svařovacího procesu. Frekvence svařovacího zdroje je u tohoto zařízení 10 000 Hz, a to umožňuje kontrolu svařovacích parametrů každých 50 milisekund. Při této kontrole se vyhodnocuje, zda svařování probíhá dle správného svařovacího protokolu. Pokud tato podmínka není splněna, řídicí jednotka upravuje svařovací program tak, aby bylo dosaženo maximální hodnoty vnesené energie, což může mít za následek prodloužení času svařování. Toto prodloužení času znamená svařování v řádech stovek milisekund oproti konvenčním strojům, kde ke svaření dochází v řádech desítek milisekund. [26]

Elektrodové čepičky 39D 1978-2

Pro experiment byly použity standartní elektrodové čepičky pro automobilový průmysl 39D 1978-2, z materiálu CuCr1Zr. Pro každý materiál byla použita samostatná sada elektrodových čepiček. Chemické složení elektrodových čepiček je zobrazeno v Tab. 5. Schéma a reálná fotografie těchto elektrodových čepiček je vyobrazena na Obr. 18.

Tab. 5 - chemické složení elektrodových čepiček 39D 1978-2 [27]

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



Obr. 18 - schéma a reálná fotografie elektrodových čepiček 39D 1978-2 [28]

Svařovací parametry

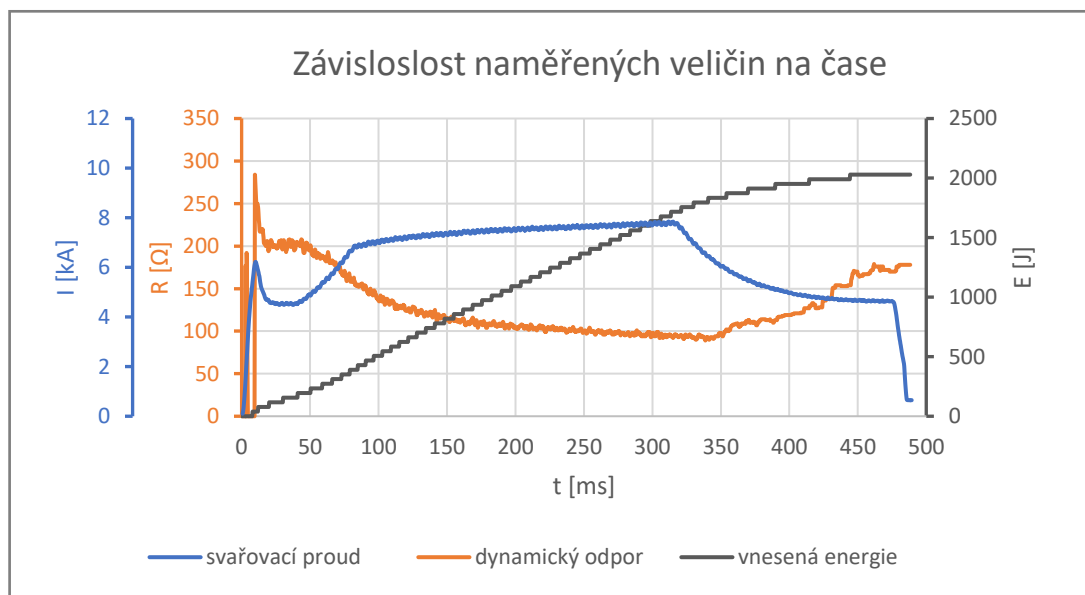
Na řídicí jednotce ELMATECH – VMC VISION ROB byl v průběhu experimentu nastavován pouze parametr W02 [%]. Tato řídicí jednotka neumožňuje náhled svařovacích parametrů, a bylo tak za potřebí využití externího zařízení TECNA – WELD TESTER TE1700C. Toto zařízení umožňuje použitím různých druhů sond měřit svařovací proud, sílu na elektrodách, napětí na elektrodách, vnesenou energii a dynamický odpor. V našem případě byl měřen svařovací proud a napětí. Díky těmto naměřeným hodnotám pak bylo možné do grafu vynést závislosti svařovacího proudu, vnesené energie a dynamického odporu na čase svařování.

7 Vyhodnocení experimentu

Svařování probíhalo postupně dle plánu, přičemž u materiálu HX 180 BD docházelo k častějšímu rozstříku rozžhaveného kovu než u materiálu DC 05. Častější rozstřík byl pravděpodobně způsoben tenkou vrstvou heptahydrátu síranu zinečnatého na povrchu plechů. Po svaření všech plechů byly vzorky podrobeny vizuální kontrole povrchových vad, metalografické zkoušce, mechanizované zkoušce stříhem a také byly na roztržených vzorcích měřeny průměry svarových čoček. Všechny zaznamenané výsledky byly následně vyhodnoceny.

7.1 Naměřené veličiny v průběhu svařování

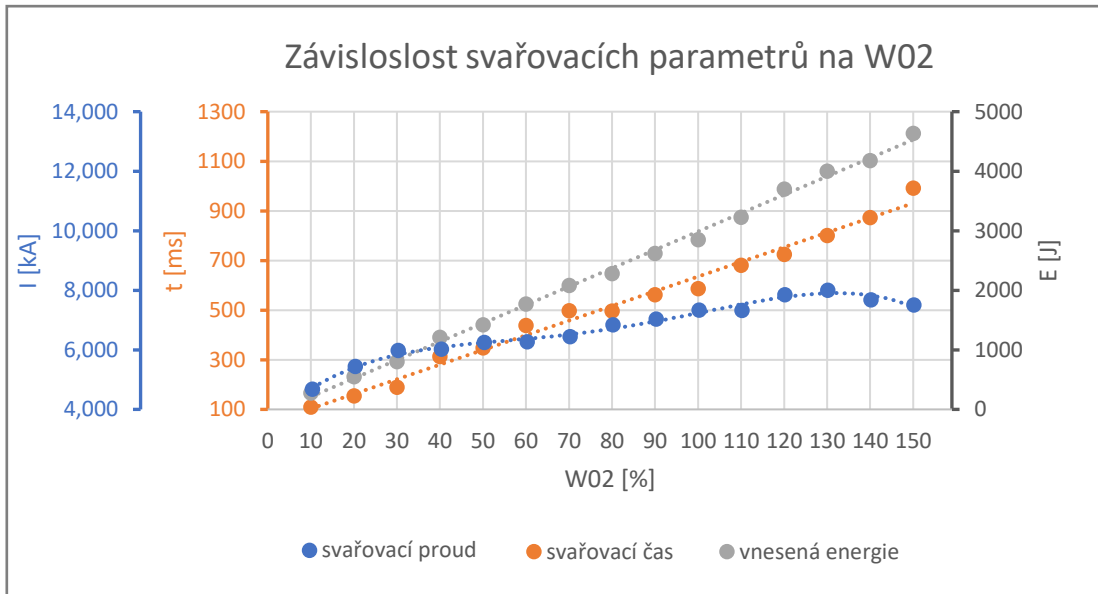
Typický průběh svařovacího proudu, dynamického odporu a vnesené energie v čase zobrazuje Graf 1. Konkrétně se jedná o hodnoty zaznamenané při svařování materiálu DC 05 s nastavením 70 % W02. Grafy ostatních nastavení mají obdobný průběh.



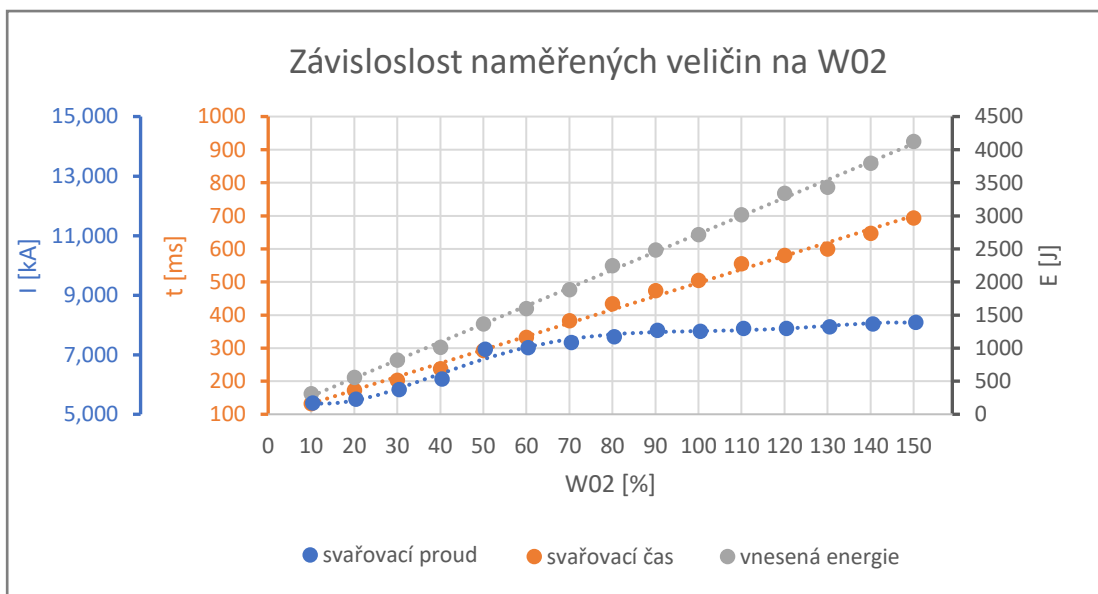
Graf 1 - závislost naměřených veličin na čase (DC 05 - 70 % W02)

Naměřené průměrné hodnoty svařovacího proudu, celkové vnesené energie a času při různém nastavení parametru W02 byly zaneseny do tabulky, ze které byly poté vykresleny grafy (viz Graf 2 a Graf 3). Z grafů je patrné, že celková vnesená energie je dle předpokladu lineárně závislá na parametru W02. Celkový čas svařování má také téměř lineární průběh jen

s drobnými odchylkami. Průběh svařovacího proudu není lineární, narůstá a popřípadě i klesá v různé intenzitě. Svařovací čas při nastavení 150 % W02 se oproti počáteční hodnotě při nastavení 10 % zvýšil až 8x oproti svařovacímu proudu, který se zvýšil pouze 1,5x. Také je důležité poznamenat, že svařovací čas pro maximální nastavení W02 dosahuje hodnot blízcích se jedné sekundě.



Graf 2 - závislost naměřených veličin na referenční energii (DC 05)



Graf 3 - závislost naměřených veličin na referenční energii (HX 180 BD)

7.2 Vizuální kontrola povrchových vad

Před vyhotovením metalografické zkoušky byl pro každé nastavení pořízen jeden snímek kontaktní plochy svaru při pohledu shora.

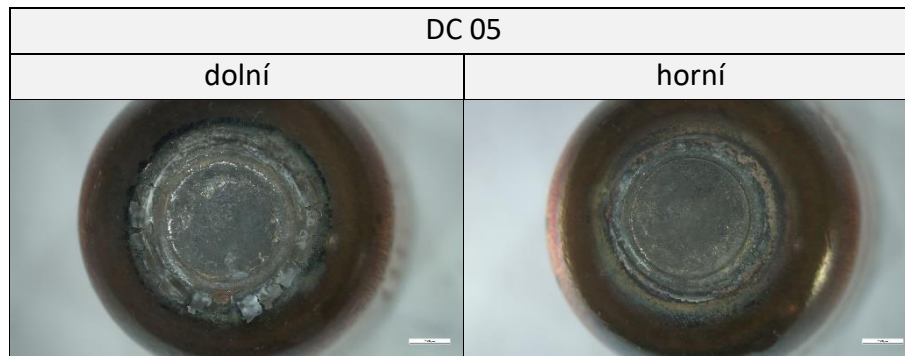
Na snímcích materiálu DC 05, které jsou zobrazeny v Tab. 8, je patrné, že se zvyšujícím se nastavením parametru W02 se zvětšuje rozměr svarové čočky i tepelně ovlivněné oblasti. To ale neplatí pro nastavení 150 %, kde je jasně zřetelná anomálie, která mohla být způsobena například nečistotou mezi plechy a došlo tak ke zkrácení svařovacího času. Za zmínku určitě stojí i výstupek na snímku 80 %, který vznikl přilepením materiálu k horní elektrodě a následným utrhnutím. Při detailním pohledu je patrné, že od cca 100 % nastavení parametru W02 se v povlaku v místě tepelně ovlivněné oblasti tvoří drobné praskliny.

V Tab. 9 jsou zobrazeny snímky kontaktních ploch svarů pro materiál HX 180 BD. Chování tohoto materiálu při zvyšujícím se nastavení parametru W02 je obdobné jako u materiálu DC 05. Hned na první pohled je ale oproti materiálu DC 05 zřejmé zlatavé zbarvení svarů. Jedná se o slabou vrstvičku mosazi, která se vytrhávala z měděných elektrodoých čepiček, do kterých před vytrhnutím difundoval zinek. Tento jev je dobře vidět i na snímcích elektrodoých čepiček, které se nacházejí v Tab. 7. Na snímku 100 % je poté dobře patrný rozstřík, který byl nejspíše způsoben nečistotou na svařovaném materiálu, nebo chybným umístěním vzorku mezi elektrodami.

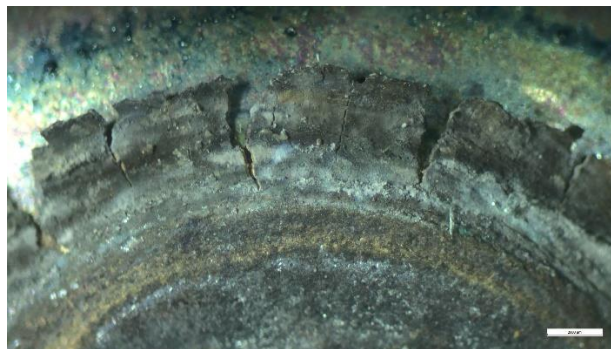
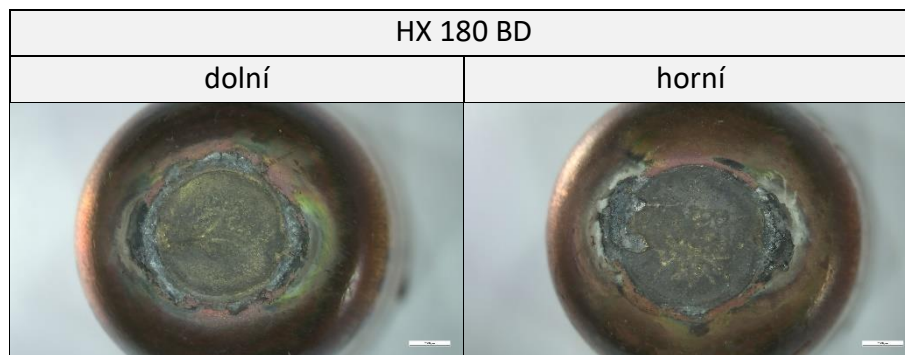
Na několika snímcích je možné spatřit výstupky, které nejspíš vznikly výrobní nerovnostní kovaných elektrodoých čepiček, přičemž se v průběhu experimentu v důsledku postupného opotřebování elektrodoých čepiček zvětšovaly a ovlivnily tak tvar vtisku. Nejlépe je to patrné na snímku 110 %. Na snímku dolní elektrodové čepičky materiálu DC 05 (Tab. 6) je viditelné vytlačování zoxidované vrstvy zinku ve tvaru šupin. Detailní pohled je zobrazen na Obr. 19.

Na snímcích elektrodoých čepiček použitých pro svařování materiálu HX 180 BD (viz Tab. 7) jsou dobře zřejmé již komentované výstupky. Rovněž jsou zde dobře viditelné krátery, pravděpodobně způsobené již zmíněnou difuzí a odtrháváním vrstvičky mosazi.

Tab. 6 - elektrodové čepičky po sváření vzorků DC 05

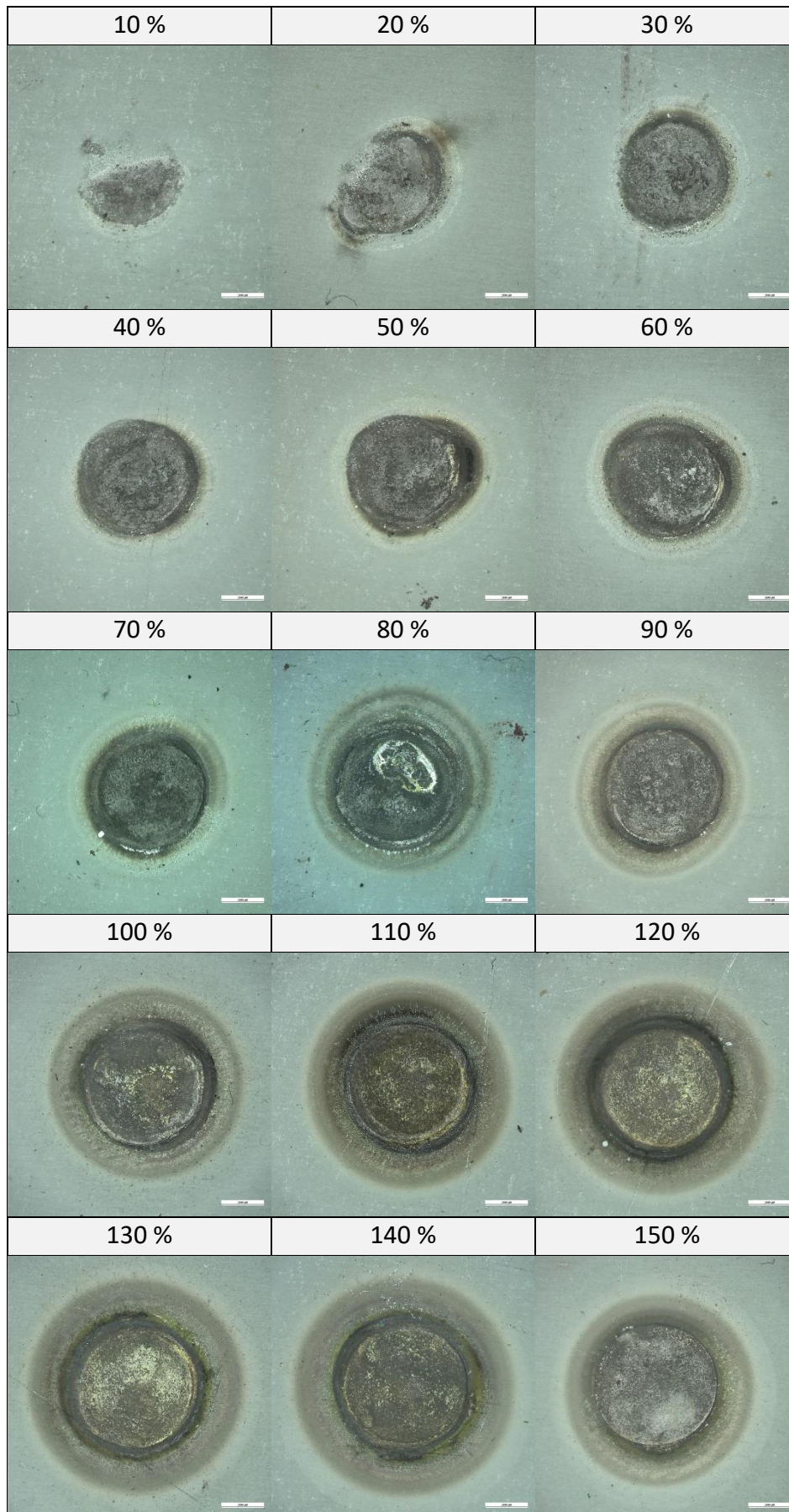


Tab. 7 - elektrodové čepičky po sváření vzorků HX 180 BD

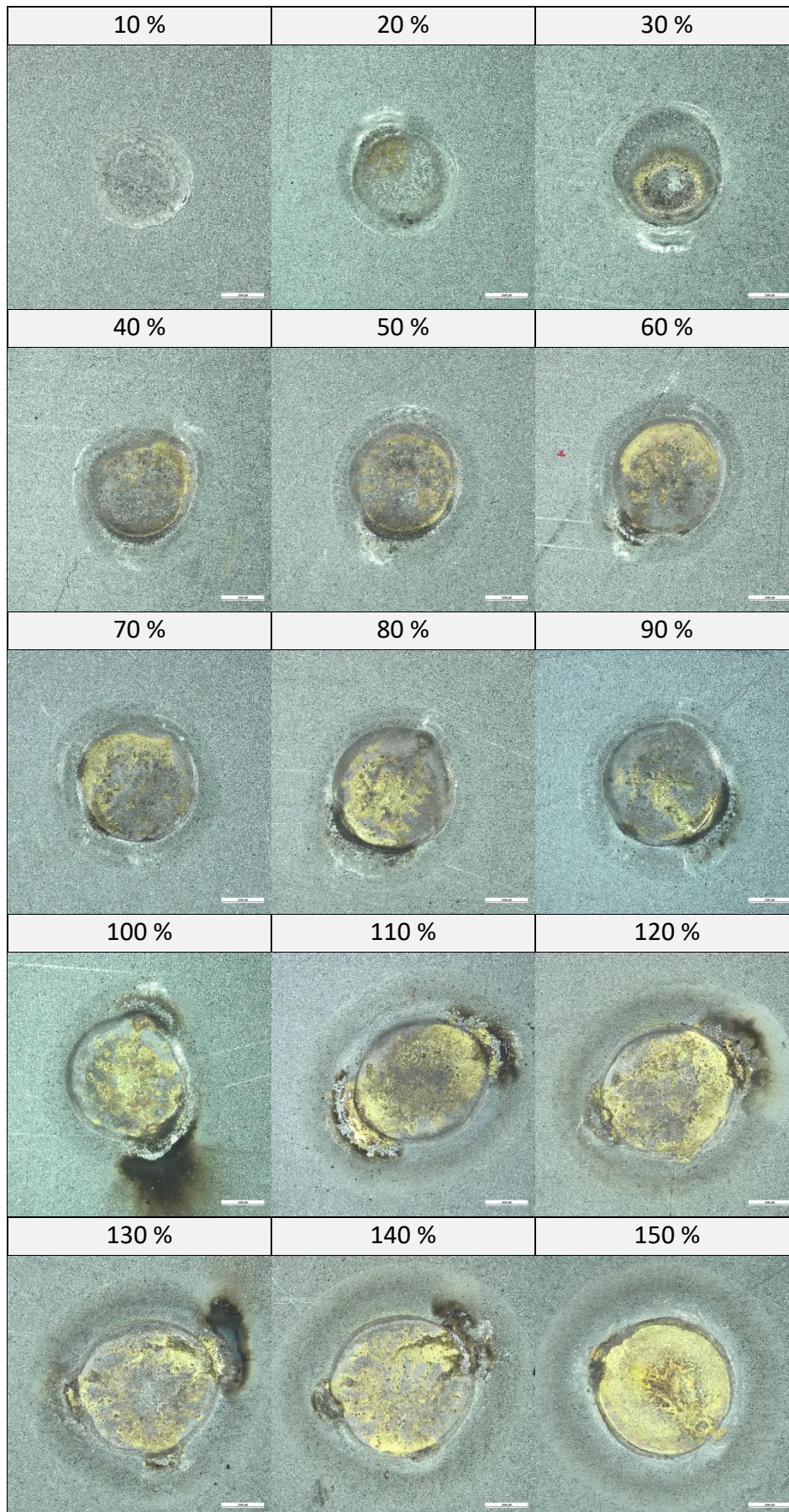


Obr. 19 - detail dolní elektrodové čepičky po sváření vzorků DC 05 (zvětšení 2,5x)

Tab. 8 - snímky kontaktní plochy svarů DC 05



Tab. 9 - snímky kontaktní plochy svarů HX 180 BD



7.3 Metalografická zkouška

Metalografická zkouška byla vyhotovena vždy na jednom vzorku pro každé nastavení parametru W02 od každého materiálu. Nejprve byl svar rozříznut v rovině průměru svarové čocky, následně byl broušen, leštěn a leptán. Dále byly pořízeny snímky svarů kolmo na rovinu řezu, které jsou pro materiál DC 05 zobrazeny v Tab. 11 a pro materiál HX 180 BD v Tab. 12.

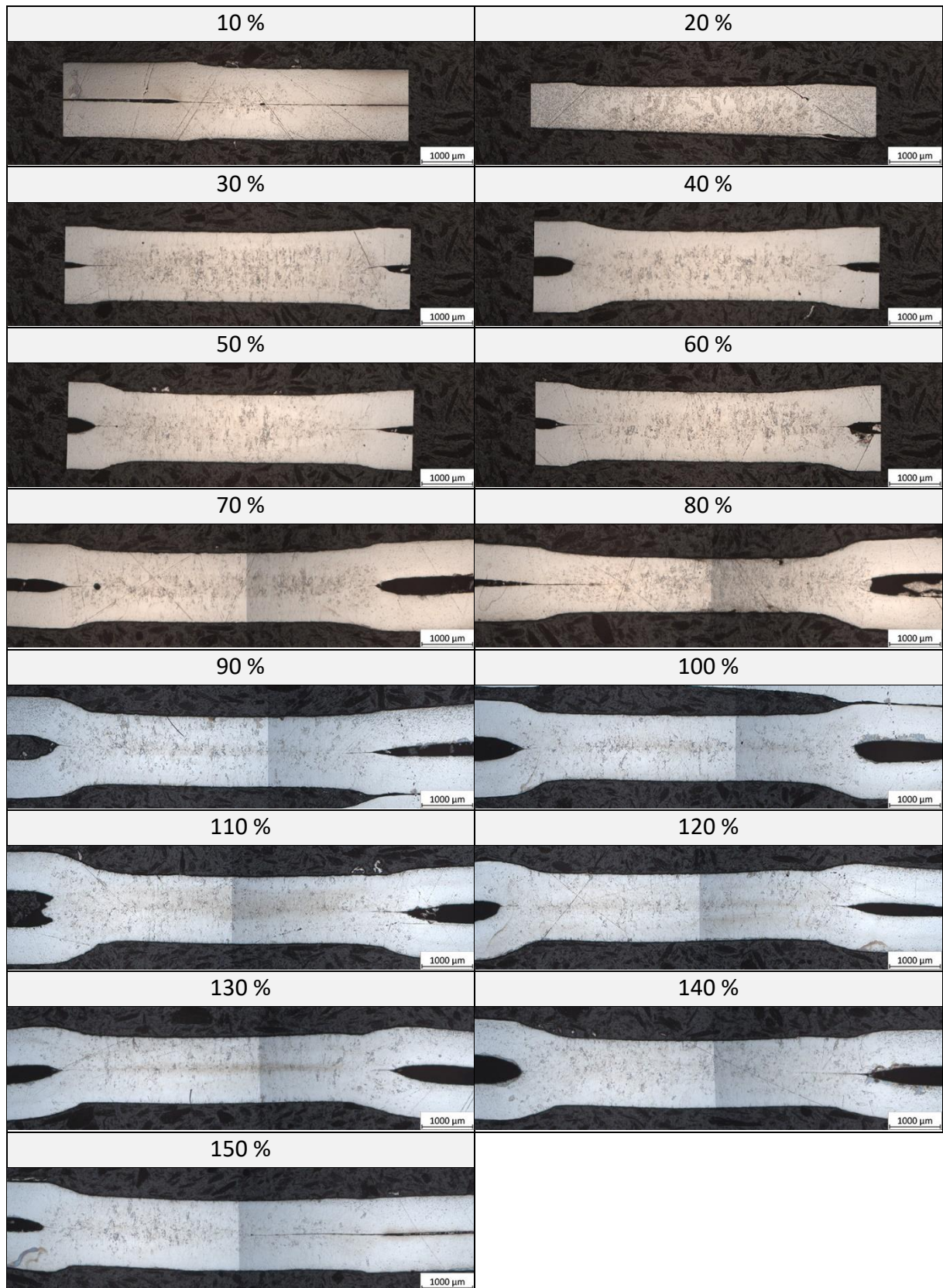
Na snímcích 20 % materiálu DC 05 a 90 % materiálu HX 180 BD došlo k zalití jednoho z plechů. Na snímku 10 % materiálu HX 180 BD nejsou plechy spojeny, jelikož nedošlo k jejich dostatečnému natavení a již při lehkém zatížení řezným kotoučem od sebe spojované plechy odpadly. Uvnitř několika svarů se vyskytují póry, které vznikly rozstříkem rozžhaveného kovu. Zjevné jsou na snímku 70 % materiálu DC 05 a snímcích 30 % a 130 % materiálu HX 180 BD. Důležité je také poznamenat, že svým rozměrem nejsou zvláště výrazné, jelikož použitý řídicí systém dokáže na případný rozstřík zareagovat a minimalizovat rozměr póru natavením dalšího materiálu. U materiálu HX 180 BD lze od 110 % pozorovat svar vytvořený pouze po obvodu kontaktní plochy elektrod, což je způsobeno vlivem opotřebení elektrodových čepiček.

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 o tloušťce pechů $t_p(DC\ 05) = 0,7\ mm$ je maximální přípustná hodnota hloubky vtisku $t_{Emax}(DC\ 05) = 140\ \mu m$ a pro materiál HX 180 BD o tloušťce plechů $t_p(HX\ 180\ BD) = 0,6\ mm$ je maximální přípustná hodnota hloubky vtisku $t_{Emax}(HX\ 180\ BD) = 120\ \mu m$. Naměřené hodnoty hloubek vtisků jsou zaznamenány v Tab. 10, přičemž barevné zabarvení značí, zda je hloubka vtisku vyhovující (zelená barva) či nevyhovující (červená barva). Pro materiál DC 05 jsou vyhovující hodnoty do 60 % nastavení parametru W02 včetně a pro HX 180 BD do 50 % nastavení parametru W02 včetně.

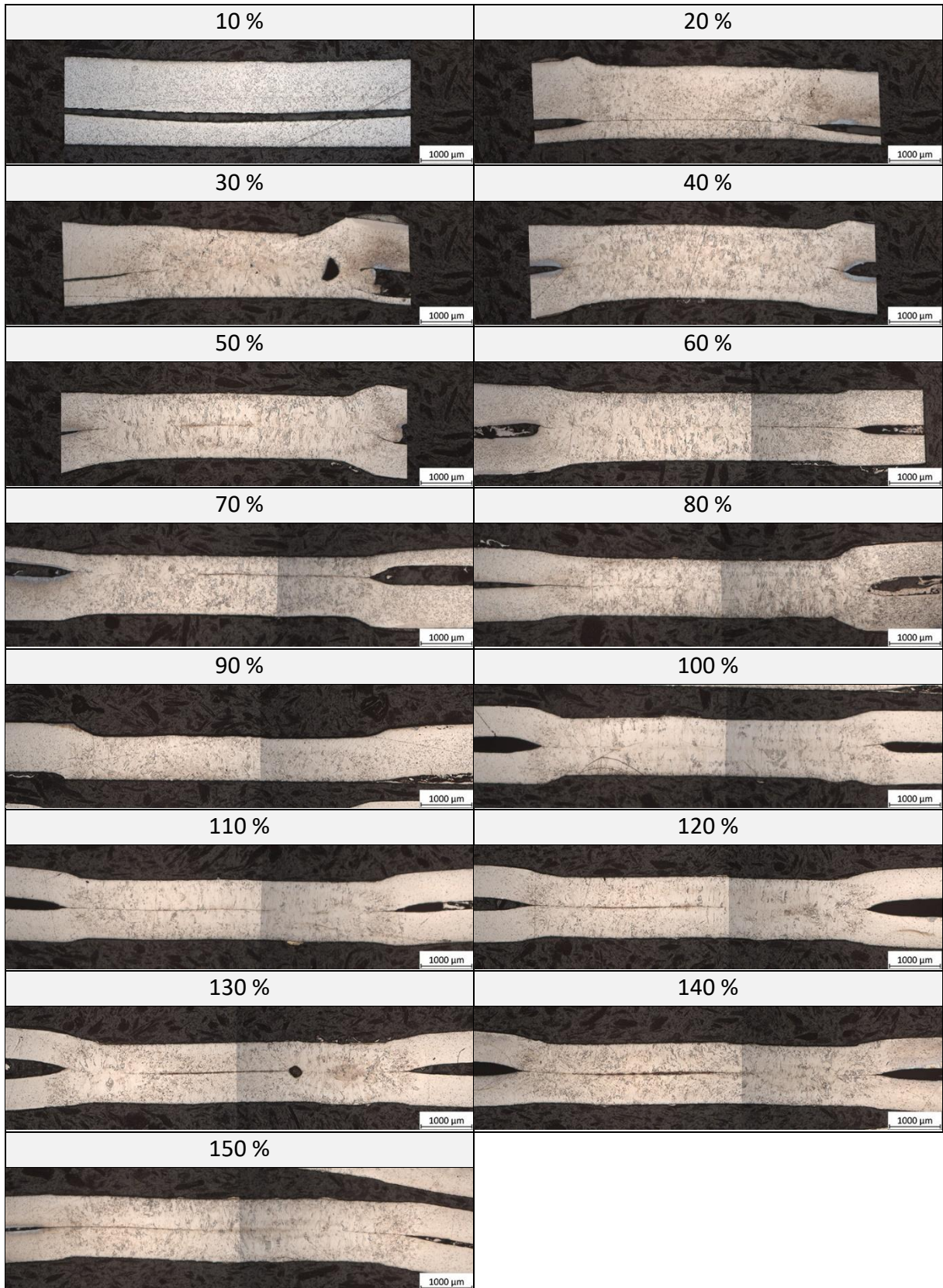
Tab. 10 - hloubky vtisků elektrod

W02 [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
DC 05	70	40	80	130	140	140	160	270	230	230	300	330	270	320	280
HX 180 BD	30	50	120	120	110	150	140	250	240	180	200	210	260	180	160

Tab. 11 - snímky metalografické zkoušky materiálu DC 05 (zvětšení 25x)



Tab. 12 - snímky metalografické zkoušky materiálu HX 180 BD (zvětšení 25x)



7.4 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. 20.



Obr. 20 - LabTest 5.100SP1

Pro každou sérii nastavení a materiálu bylo podrobena mechanizované zkouše stříhem 11 vzorků. Ke každému porušenému vzorku byla do tabulky vynesena maximální síla pro přetržení. Tyto hodnoty byly poté vyneseny do grafů (viz Graf 4 a Graf 5). Vzhledem k tomu, že každý materiál má jinou tloušťku, byly hodnoty vyneseny do dvou grafů včetně čáry vyznačující počátek zpomalujícího nárůstu hodnot sil, hranice maximálního vyhovujícího vtisku a čáry vyznačující minimální hodnoty sil potřebných k porušení svaru, které jsou dány dle tloušťky materiálu normou ČSN EN ISO 14273.

Minimální hodnoty sil potřebných k porušení svaru pro oba materiály o tloušťkách plechů $t_p(DC\ 05) = 0,7\ mm$ a $t_p(HX\ 180\ BD) = 0,6\ mm$:

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

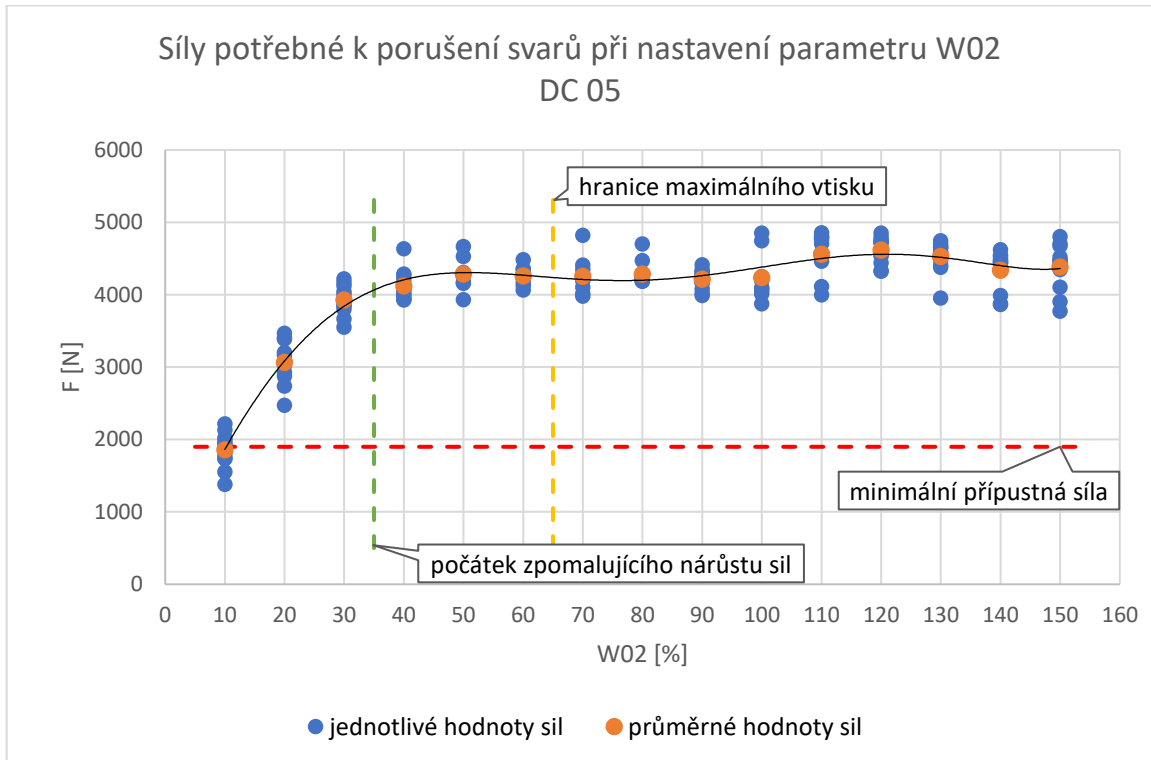
$$F_{min}(HX\ 180\ BD) = 1\ 500\ N$$

Z grafu je zjevné, že minimální sílu splňují všechny vzorky kromě několika vzorků materiálu DC 05 (viz Graf 4 - nastavení 10 % parametru W02). Hodnoty sil potřebných k porušení vzorků materiálu HX 180 BD (Graf 5) při nastavení 10 % parametru W02 se velmi úzce blíží minimální hodnotě. Z toho lze usoudit, že svařovat na nejnižší možné nastavení je nežádoucí.

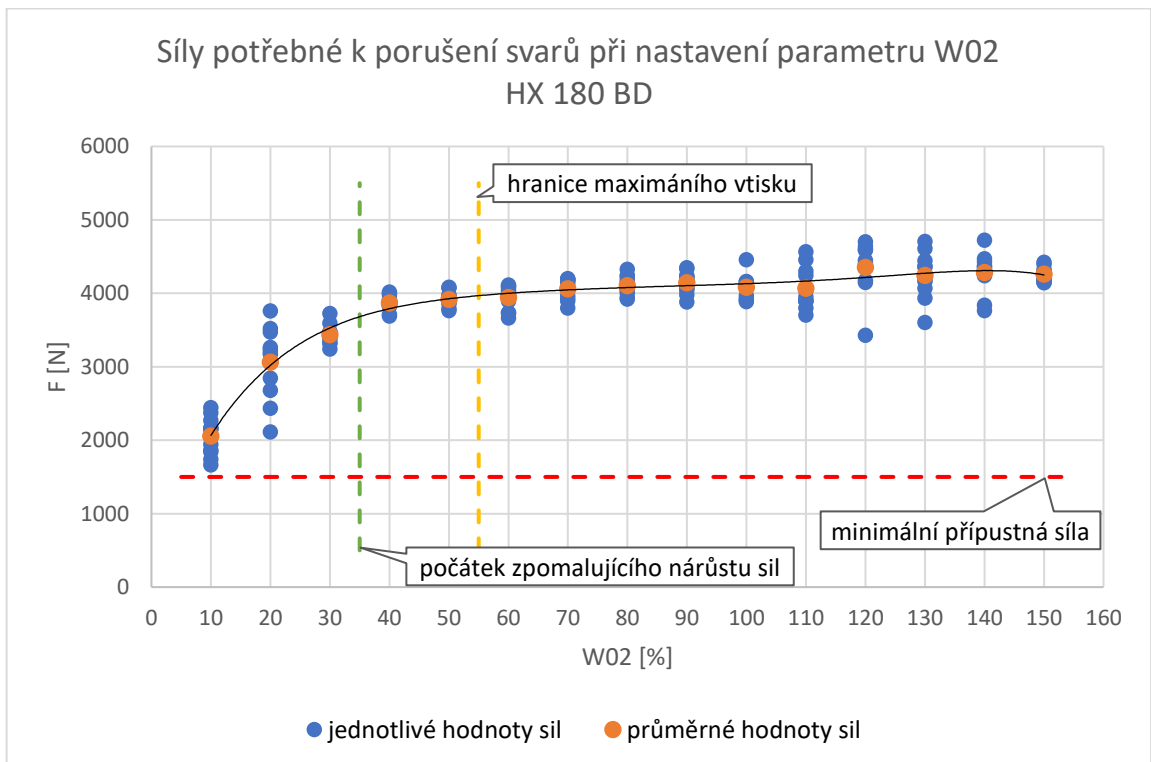
Při zvyšujícím se nastavení procent parametru W02 síla potřebná k porušení vzorků narůstá se zpomalující tendencí na relativně konstantní hodnotu, kde se drží a poté opět mírně narůstá. To platí jak pro materiál DC 05, tak i pro materiál HX 180 BD, z čehož lze usoudit, že závislost bude pro další materiály podobná.

Z grafu jasně vyplívá oblast nastavení parametru W02, která je vhodná pro dosažení stabilních, opakovatelných a kvalitních výsledků svařování. Tato oblast je zleva omezena přímkou vyznačující počátek zpomalujícího nárůstu sil a zprava hranicí udávající maximální vyhovující vtisk. Zdola je poté tato oblast omezena minimální přípustnou hodnotou síly potřebné k porušení svarů. U materiálu DC 05 spadají do této oblasti nastavení 40 % až 60 % W02 a pro materiál HX 180 BD vyhovují nastavení 40 % až 50 % W02.

Důležité je se rovněž zaměřit i na rozptyly hodnot. Z grafů je patrné, že se rozptyl zvyšuje s rostoucím nastavením parametru W02. Z toho lze opět dojít k závěru, že je zbytečné svařovat na příliš vysoké nastavení. Nejlépe je zvyšující se rozptyl vidět u materiálu HX 180 BD. U tohoto materiálu je ale také jasně viditelný velmi výrazný rozptyl hodnot pro nastavení 20 % W02. To mohlo být způsobeno problémy při upínání vzorků do čelistí stroje a následnými prokluzy.



Graf 4 - síly potřebné k porušení svarů při nastavení referenční energie (DC 05)



Graf 5 - síly potřebné k porušení svarů při nastavení referenční energie (HX 180 BD)

7.5 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:

$$d_{min} = 3,5 \cdot \sqrt{t_p} \quad (2)$$

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

t_p – tloušťka plechu [mm]

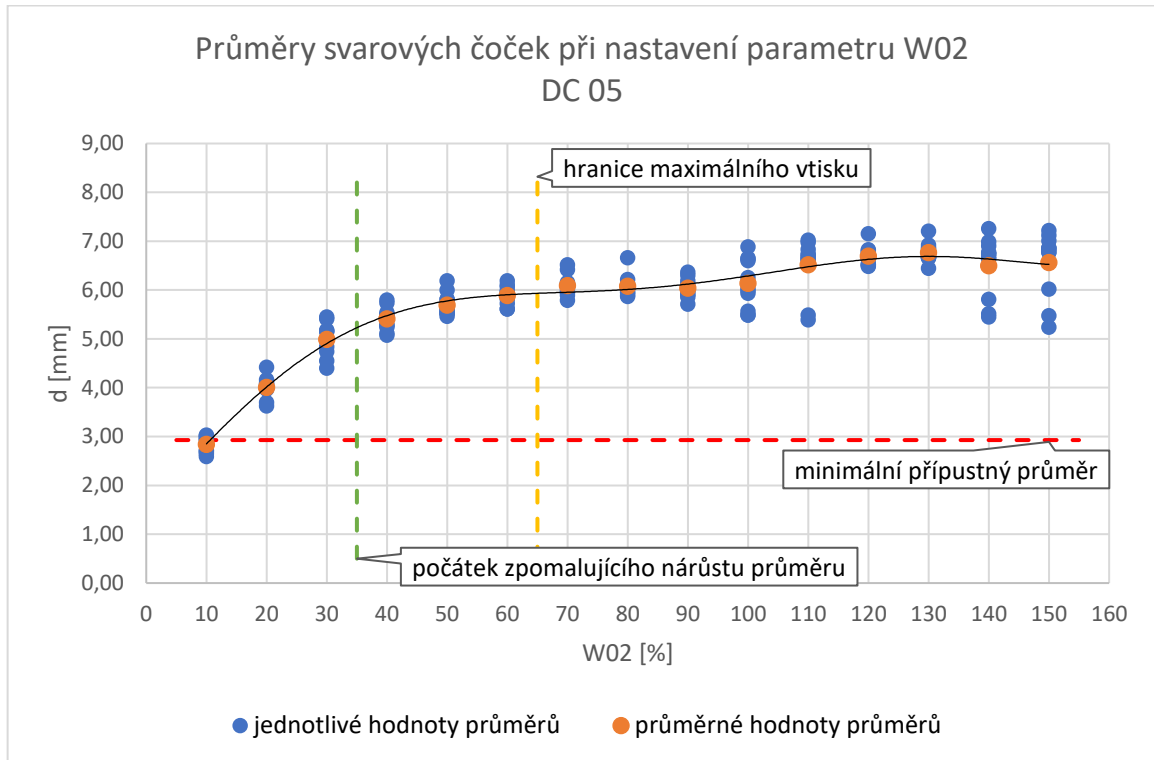
Výsledné minimální průměry svarových čoček pro oba materiály o tloušťkách plechů $t_p(DC 05) = 0,7 \text{ mm}$ a $t_p(HX 180 BD) = 0,6 \text{ mm}$:

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

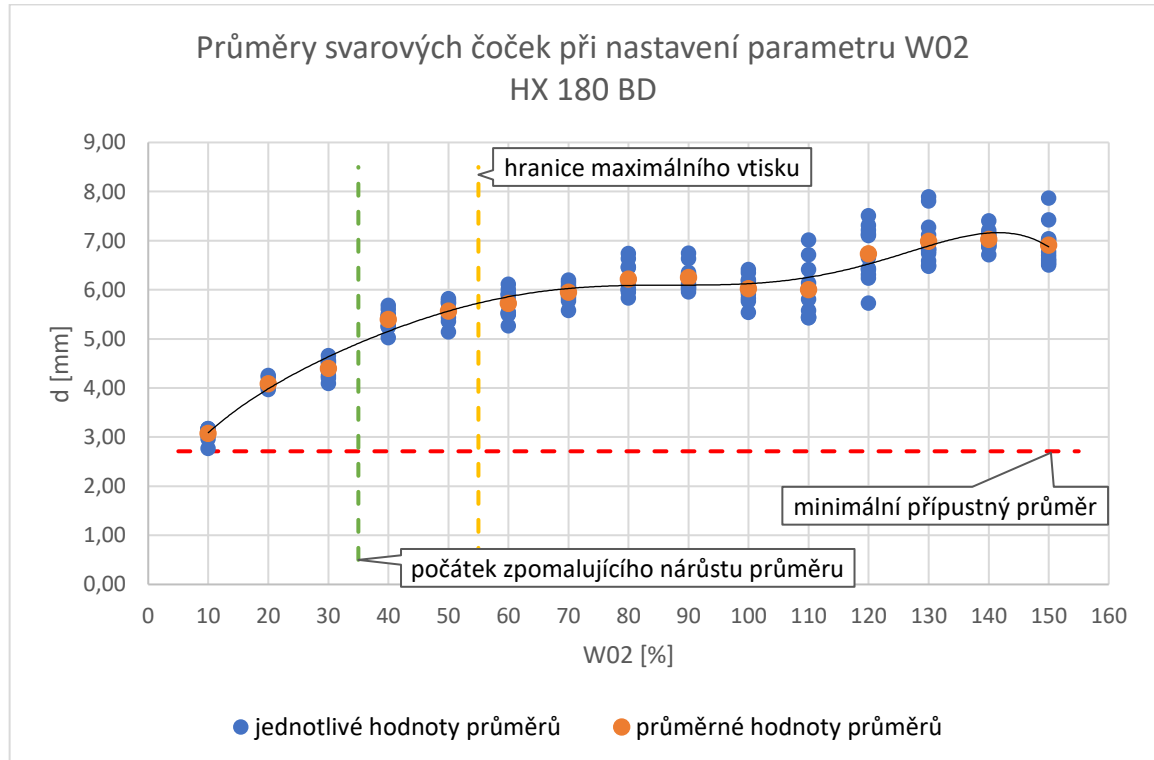
$$d_{min}(HX 180 BD) = 2,7 \text{ mm}$$

Všechny naměřené hodnoty byly zaneseny do grafů (Graf 6 a Graf 7). V těch je také zakreslena linie vyznačující počátek zpomalujícího nárůstu hodnot průměrů svarových čoček, hranice maximálního vyhovujícího vtisku a čára vyznačující minimální přípustnou hodnotu průměru svarové čočky. Výsledné závislosti jsou velmi podobné závislostem sil potřebných k porušení svarů. To platí i pro rozptyl hodnot, který se výrazně zvyšuje se stoupajícími hodnotami parametru W02. Pro materiál DC 05 opět vyhovuje oblast 40 % až 60 % nastavení W02 a pro materiál HX 180 BD to je 40 % až 50 % W02.

Z těchto výsledků je opět zjevné, že je nežádoucí svařovat při minimálním nastavení parametru W02 tak, aby bylo dosaženo co největší pevnosti svaru a zároveň je nežádoucí svařovat na vyšší nastavení než 60 %, jelikož by byla příliš velká hloubka vtisku elektrody do materiálu. Za optimální hodnotu by se tedy dalo považovat nastavení kolem 50 %.



Graf 6 - průměry svarových čoček při nastavení referenční energie (DC 05)



Graf 7 - průměry svarových čoček při nastavení referenční energie (HX 180 BD)

8 Závěr

Primárním cílem bakalářské práce bylo porovnání kvality a geometrie svarového spoje při různém nastavení svařovacího proudu, v našem případě parametru W02 [%], v režimu automatického svařování na zařízení s adaptivním řízením vnesené energie. Na svařovacím zařízení se tak nastavoval pouze jeden parametr, kterým byl zmíněný parametr W02 a ostatní parametry si stroj nadeřinoval sám podle tloušťky plechů a přechodového odporu.

Pro experiment byly navrženy dva materiály. Jedním byl materiál DC 05, patřící do skupiny hlubokotažných ocelí, a druhým byl HX 180 BD, který spadá do skupiny vysokopevnostních ocelí. Vzorky z těchto materiálů byly svařovány vždy v sériích po dvanácti, přičemž jedenáct vzorků bylo použito na mechanizovanou zkoušku stříhem a zbylý jeden vzorek byl použit na zkoušku vizuální a poté metalografickou. Každá série vzorků byla svařována při jednom nastavení parametru W02 a to od 10 % do 150 % vždy po deseti procentech. Po provedení mechanizované zkoušky stříhem byly na roztržených vzorcích měřeny průměry svarových čoček.

Z výsledků vyplývá, že optimální nastavení parametru W02 se pohybuje kolem 50 %. Při tomto nastavení je dosahováno maximální pevnosti svaru, při stabilních a opakovatelných výsledcích a bez přesáhnutí maximálního povoleného vtisku elektrod do materiálu, který činí 20 % tloušťky plechu. U nejnižších hodnot nastavení W02 není zaručena potřebná pevnost, respektive průměr svarové čočky. Z výsledků také vyplývá, že závislost síly potřebné k porušení vzorku, respektive velikost svarové čočky na nastavení procent parametru W02 není ani pro jeden materiál lineární. Grafy mají velmi podobné průběhy, takže lze předpokládat, že pro další materiály budou závislosti podobné. Pro oba použité materiály síla potřebná k porušení vzorků, respektive svarová čočka, v závislosti na parametru W02 narůstá se zpomalující tendencí na relativně konstantní hodnotu, kde se drží a poté opět mírně narůstá, avšak s větším rozptylem hodnot.

Bibliografie

- [1] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování v praxi*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1960.
- [2] KOLAŘÍK, Ladislav. *Automatizace výrobních procesů svařování* [online]. Praha: ČVUT, 2010, 214 s. [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/107516052-Ing-ladislav-kolarik-ph-d-iwe.html>
- [3] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1975.
- [4] Elektrické odporové svařování. In: *ELUC - ELEKTRONICKÁ UČEBNICE* [online]. Olomoucký kraj [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1808>
- [5] 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. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2014/154784>
- [6] AMBROŽ, Oldřich. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001.
- [7] 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.
- [8] HOLUB, Štěpán. *NDT kontrola odporových bodových svarů*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [9] 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.
- [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] MA, Yanhua, Pei WU, Chuazhong XUAN, Yongan ZHANG a Hu SU. Review on Techniques for On-Line Monitoring of Resistance Spot Welding Process. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2013, , 6 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2013/630984>
- [12] 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>
- [13] PODRŽAJ, P., I. POLAJNAR, DIACI a Z. KARIŽ. Overview of resistance spot welding control. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. 2008, , 10 [cit. 2021-07-13]. ISSN 1743-2936. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/174329308X283893>
- [14] YU, Jiyoung. Adaptive Resistance Spot Welding Process that Reduces the Shunting Effect for Automotive High-Strength Steels. *MDPI - Metals* [online]. (2018), 20 [cit. 2021-07-09]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met8100775>

- [15] CHO, Yongjoon, In Sung CHANG a Heui Bom LEE. Advanced Resistance Spot Welding Technologies: New Machine, Adaptive Control and FEM Simulation. *Materials Science Forum* [online]. 2008, 4 [cit. 2021-07-09]. ISSN 1662-9752. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.580-582.367>
- [16] *Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl* [online]. Praha: Workswell, 2017 [cit. 2021-06-11]. Dostupné z: <https://workswell.cz/rozdeleni-oceli-pro-automobilovy-prumysl/>
- [17] Next-gen Audi A8 introduces new four-material space frame; light weight and rigid. *Green Car Congress* [online]. 2017 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2017/04/20170406-asf.html>
- [18] HANKE, Petr. AUDI SPACE FRAME – MIX MATERIÁLŮ. *Automobil Revue* [online]. 2017 [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/clanky/technika/audi-space-frame-mix-materialu_45805.html
- [19] PADEANU, Adrian. Audi A8 Roots – A Look Back At The 1993 ASF Concept. In: *Motor 1* [online]. 2017 [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://www.motor1.com/news/161902/1993-audi-space-frame-concept/>
- [20] Audi A8. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Audi_A8
- [21] Audi V8. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Audi_V8
- [22] Audi A8: aluminum and steel. In: *ALUMINUM INFORMATION PORTAL* [online]. [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://aluminium-guide.com/en/alyuminievjy-audi-a8/>
- [23] Aluminum body Audi A8: model D3. In: *ALUMINUM INFORMATION PORTAL* [online]. 2013 [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://aluminium-guide.com/en/alyuminievjy-kuzov-audi-a8-model-d3/>
- [24] DC05 (1.0312). In: *European Steel and Alloy Grades / Numbers* [online]. [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=202
- [25] HX180BD (1.0914). In: *European Steel and Alloy Grades / Numbers* [online]. [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=612
- [26] ELMA VMC VISION ROB. In: *ELMA-Tech GmbH* [online]. [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://www.elmatech-gmbh.de/index.php/en/elma-tech-products/resistance-welding-technology/spot-welding-systems-for-robot-welding-guns/elma-vmc-vision-rob-control-cabinet-for-automotive-industry>
- [27] 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. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://www.confer.cz/metal/2019/read/855-changes-in-emissivity-of-the-electrodes-for-resistence-spot-welding-due-to-their-wear.pdf>
- [28] 39D 1978/2. In: *LASKA Technika Przemysłowa* [online]. [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://www.laska.com.pl/en/offer/electrodes>

Seznam obrázků

Obr. 1 - schéma bodového svařování [4]	4
Obr. 2 - schéma švového svařování [4]	5
Obr. 3 - schéma výstupkového svařování [4]	5
Obr. 4 - schéma stykového svařování [4]	6
Obr. 5 - časová závislost elektrického odporu v průběhu svařování [2]	7
Obr. 6 - přechodové a materiálové odpor [5]	8
Obr. 7 - rozdělení přímého bodového svařování [3]	9
Obr. 8 - rozdělení nepřímého bodového svařování [3]	10
Obr. 9 - geometrie bodového svaru [3]	11
Obr. 10 - rozměry vzorku pro jeho správné upnutí dle normy [7]	13
Obr. 11 - obecné rozměry vzorku pro jeho správné upnutí dle normy [7]	13
Obr. 12 - schéma systému pro adaptivní řízení svařovacího procesu [14]	17
Obr. 13 - porovnání celkové tažnosti a meze kluzu ocelí [16]	18
Obr. 14 - materiálový koncept karosérie Audi A8 L [17]	21
Obr. 15 - povrchová vrstva oceli DC 05 (zvětšení 500x)	23
Obr. 16 - povrchová vrstva oceli HX 180 BD (zvětšení 500x)	24
Obr. 17 - použité svařovací zařízení	25
Obr. 18 - schéma a reálná fotografie elektrodových čepiček 39D 1978-2 [28]	26
Obr. 19 - detail dolní elektrodové čepičky po sváření vzorků DC 05 (zvětšení 2,5x)	30
Obr. 20 - LabTest 5.100SP1	36

Seznam grafů

Graf 1 - závislost naměřených veličin na čase (DC 05 - 70 % W02)	27
Graf 2 - závislost naměřených veličin na referenční energii (DC 05)	28
Graf 3 - závislost naměřených veličin na referenční energii (HX 180 BD)	28
Graf 4 - síly potřebné k porušení svarů při nastavení referenční energie (DC 05)	38
Graf 5 - síly potřebné k porušení svarů při nastavení referenční energie (HX 180 BD)	38
Graf 6 - průměry svarových čoček při nastavení referenční energie (DC 05)	40
Graf 7 - průměry svarových čoček při nastavení referenční energie (HX 180 BD)	40

Seznam tabulek

Tab. 1 - chemické složení oceli DC 05 [24]	23
Tab. 2 - mechanické vlastnosti oceli DC 05	23
Tab. 3 - chemické složení oceli HX 180 BD [25]	24
Tab. 4 - mechanické vlastnosti oceli HX 180 BD	24
Tab. 5 - chemické složení elektrodových čepiček 39D 1978-2 [27]	26
Tab. 6 - elektrodové čepičky po sváření vzorků DC 05	30
Tab. 7 - elektrodové čepičky po sváření vzorků HX 180 BD	30
Tab. 8 - snímky kontaktní plochy svarů DC 05	31
Tab. 9 - snímky kontaktní plochy svarů HX 180 BD	32
Tab. 10 - hloubky vtisků elektrod	33
Tab. 11 - snímky metalografické zkoušky materiálu DC 05 (zvětšení 25x)	34
Tab. 12 - snímky metalografické zkoušky materiálu HX 180 BD (zvětšení 25x)	35