



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Ověření citlivosti ultrazvukové kontroly bodových odporových svarů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. David Stárek

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

STUDIJNÍ PROGRAM: N0715A270001 Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: N071TVIN Bez specializace

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stárek** Jméno: **David** Osobní číslo: **483380**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Ověření citlivosti ultrazvukové kontroly bodových odporových svarů

Název diplomové práce anglicky:

Verification of sensitivity of ultrasonic inspection of spot resistance welds

Pokyny pro vypracování:

- Popis odporového svařování a problematiky nedestruktivní kontroly bodových svarových spojů.
- Popis možného využití ultrazvukové analýzy pro hodnocení kvality bodových svarů.
- 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] Krejčich, M. Monitorování vybraných parametrů svařovacího procesu a kvalita odporových bodových svarů, Diplomová práce, TU v Liberci, Liberec, 2009
[3] Pereda, M., Santos, J.I., Martín, Ó., Galán, J.M. (2015) Direct quality prediction in resistance spot welding process: Sensitivity, specificity and predictive accuracy comparative analysis. Science and Technology of Welding and Joining, Volume 20, Issue 8 (November 2015), pp. 679-685. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000052>
[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:

Ing. Tomáš Burket ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **16.10.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **15.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

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

V první řadě bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za perfektní vedení, věcné připomínky, trpělivost, její ochotu a konzultování po celou dobu tvorby diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat asistentovi diplomové práce Ing. Tomášovi Burketovi za obrovskou ochotu vypomáhat při tvorbě experimentu a za jeho odborné rady. Také chci poděkovat společnosti Toyota Motor Manufacturing Czech Republic s.r.o. a všem ostatním za podporu poskytnutou při řešení experimentální části práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval své přítelkyni, rodině a přátelům, kteří mě podporovali při psaní diplomové práce a zejména po celou dobu vysokoškolského studia.

Anotace

Diplomová práce se zabývá ověřením citlivosti ultrazvukové kontroly na bodových odporových svarech. V teoretické části byly popsány metody odporového svařování, kvalita bodových svarů a jejich vady, ultrazvuková kontrola, její techniky a aktuální trendy, ke kterým tato kontrola směřuje. V experimentální části se práce zaměřuje na ultrazvukovou kontrolu technikami A-scan a C-scan, jejichž výsledky byly porovnány s daty získanými počítačovou tomografií, destrukcí svarů Chisel testem, následným ručním měřením průměrů svarových čoček a metalografickou zkouškou. Experiment byl proveden na pěti sadách laboratorně svařených vzorků a na reálném svařenci z průmyslu. Metody ultrazvukové kontroly byly hodnoceny z pohledu přesnosti měření průměru svarové čočky a tloušťky svaru. Také byla ověřována citlivost metod na zjistitelnost přítomnosti vad, které byly na laboratorně svařených vzorcích záměrně vytvořeny.

Název diplomové práce:	Ověření citlivosti ultrazvukové kontroly bodových odporových svarů
Autor práce:	Bc. David Stárek
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE
Konzultant:	Ing. Tomáš Burket
Akademický rok:	2023/2024
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	96 stránek, 13 tabulek, 53 obrázků
Klíčová slova:	odporové bodové svařování, ultrazvuková kontrola, automobilový průmysl, počítačová tomografie, vady bodových odporových svarů

Annotation

The thesis deals with the verification of sensitivity of ultrasonic inspection of spot resistance welds. In the theoretical part the methods of resistance welding, the quality of spot welds and their defects, ultrasonic inspection, its techniques and current trends towards which this inspection is heading were described. In the experimental part, the thesis focuses on ultrasonic inspection techniques A-scan and C-scan, the results of which were compared with data obtained by computed tomography, weld destruction by Chisel test, subsequent manual measurement of weld nugget diameters and metallographic testing. The experiment was carried out on five sets of laboratory welded specimens and on a real weldment from industry. The ultrasonic inspection methods were evaluated in terms of the accuracy of measurement of nugget diameter and weld thickness. The sensitivity of the methods to detect the presence of defects that were deliberately created on the laboratory welded samples was also verified.

Title of the final thesis: Verification of sensitivity of ultrasonic inspection of spot resistance welds

Author: Bc. David Stárek

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

Consultant: Ing. Tomáš Burket

Academic year: 2023/2024

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: 96 pages, 13 tables, 53 pictures

Keywords: resistance spot welding, ultrasonic inspection, automotive industry, computed tomography, defects in resistance spot welds

Obsah

1. Úvod	11
2. Odporové svařování	12
2.1 Metody odporového svařování	13
2.1.1 Odporové bodové svařování	13
2.1.2 Výstupkové svařování	13
2.1.3 Odporové švové svařování	14
2.1.4 Stlačovací stykové svařování	14
2.1.5 Odtavovací stykové svařování	15
2.2 Geometrie bodového svaru	16
2.3 Elektrody pro odporové svařování	17
2.3.1 Životnost elektrod pro bodové svařování	18
2.4 Kvalita bodových svarů	19
2.5 Vady bodových svarů	19
3. Nedestruktivní kontrola	22
3.1 Ultrazvuková zkouška	23
3.2 Ultrazvukové sondy	25
3.3 Problematika ultrazvukové kontroly bodových svarů	26
3.4 Technika A-scan	27
3.5 Technika B-scan	29
3.6 Technika C-scan	29
3.7 Techniky zkoušení phased array a matrix array	30
4. Trendy ultrazvukové kontroly	32
4.1 Skenovací akustická mikroskopie	32
4.2 Online detekce trhlin	33

4.3	Zkoušení se suchým vazebním prostředím.....	35
5.	Cíle práce.....	38
6.	Experimentální část.....	39
6.1	Návrh a podmínky experimentu	39
6.1.1	Použité materiály.....	41
6.1.2	Použité zařízení pro svařování a analýzy.....	42
6.1.3	Návrh experimentu v bodech.....	45
6.2	Ultrazvuková kontrola zařízením Matrixeye VI (C-scan).....	46
6.3	Ultrazvuková kontrola zařízením RSWA F2 (C-scan).....	48
6.4	Ultrazvuková kontrola zařízeních EPOCH 650 (A-scan)	50
6.5	Kontrola pomocí CT	52
6.5.1	Návrh a tisk držáku do CT	53
6.5.2	Skenování v Metrotom 1500	54
6.5.3	Vyhodnocení snímků ve VGSTUDIO MAX.....	55
6.5.4	Vyhodnocení snímků a naměřené hodnoty z CT.....	56
6.6	Ruční měření průměrů svarových čoček.....	58
6.7	Metalografie	59
7.	Vyhodnocení a diskuze.....	60
8.	Závěr.....	67
	Bibliografie.....	69
	Seznam tabulek	72
	Seznam obrázků.....	73
	Seznam příloh	75

Seznam zkratek

TOO	Tepelně ovlivněná oblast
RWMA	Resistance Welder Manufactures Association
NDT	Non-destructive testing – Nedestruktivní zkoušení
VT	Visual testing – Vizuální zkouška
PT	Penetrant testing – Kapilární zkouška
MT	Magnetic particle testing – Magnetická prášková zkouška
RT	Radiographic testing – Radiografická zkouška
UT	Ultrasonic testing – Ultrazvuková zkouška
NOK	Not OK – Není v pořádku
SAM	Scanning acoustic microscopy – Skenovací akustická mikroskopie
MPA	Matrix phased array
UHSS	Ultra-high strenght steel – Ultra-vysokopevnostní oceli
SAFT	Synthetic aperture focusing technique
CT	Computed tomography – Počítačová tomografie
CAD	Computer aided design – Projektování s podporou počítače
FDM	Fused deposition modeling

Seznam použité symboliky

Q	Generované teplo	[J]
I	Svařovací proud	[kA]
R	Elektrický odpor	[Ω]
τ	Čas průtok elektrického proudu	[s]
d	Průměr svarové čočky	[mm]
t_{pl}	Tloušťka plechu	[mm]
λ	Vlnová délka	[m]
c	Rychlost zvuku	[m/s]
f	Frekvence kmitání	[Hz]
F	Přítlačná síla	[kN]
T	Svařovací čas	[ms]
E	Youngův modul	[GPa]
A_{80}	Tažnost	[%]
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[MPa]
t	Tloušťka svaru	[mm]

1. Úvod

Odporové bodové svařování je jednoduchý a z hlediska nákladů velmi efektivní výrobní proces, který je využíván zejména pro spojování ocelových plechů v automobilovém průmyslu. Další nezpochybnitelnou výhodou odporového bodového svařování pro využití v automobilovém průmyslu je jeho vysoká rychlost a možnost automatizace. Obvyklý počet bodových svarů na karoserii vozidla se pohybuje mezi 3000 a 7000 svary, už jen z toho důvodu je kladen vysoký tlak na vývoj efektivních, rychlých a flexibilních nástrojů pro vyhodnocení kvality těchto svarů. [1]

Kontrola kvality u bodových svařenců je zcela zásadní, protože často bodové odporové svary spojují bezpečnostní prvky, které zabezpečují zdraví lidí, ať už u karoserie vozidla nebo jiného bodově svařeného stroje.

Pro zkoušení kvality svarů se využívá destruktivních a nedestruktivních metod. Zásadním problémem destruktivních metod, jak už z jejich názvu vyplývá, je porušení zkoušeného dílu. Nedestruktivní metody jsou zásadně méně invazivní a jejich využití se stává stále více populární. Bodové odporové svary se v průmyslu kontrolují nedestruktivními metodami, jednou z konkrétně používaných metod je právě ultrazvukové zkoušení.

Používaných technik ultrazvukové kontroly se v praxi využívá celá řada, bohužel část z nich je velmi náročná z důvodu potřeby velmi kvalifikovaných pracovníků, kteří obsluhují ultrazvukové zařízení a popřípadě i vyhodnocují získané echogramy. I proto se stále velmi používá destruktivních metod jako je například Chisel test. Pro použití ultrazvukové kontroly v praxi je důležité porozumět výsledkům této metody nedestruktivního zkoušení a umět tyto výsledky správně interpretovat. Ze zkušeností je známo, že využití ultrazvukové kontroly v praxi není vždy stoprocentně spolehlivé, ekonomicky výhodné a vhodné, ať už z pohledu finančně nákladné obsluhy ultrazvukového zkoušení nebo z důvodu použití vazebních prostředků mezi sondou a kontrolovaným dílem. Už jen proto je třeba ověřit citlivost ultrazvukové kontroly a popřípadě najít cesty, jak celou kontrolu automatizovat nebo snížit její finanční náklady. Tato diplomová práce se těmito tématy zabývá.

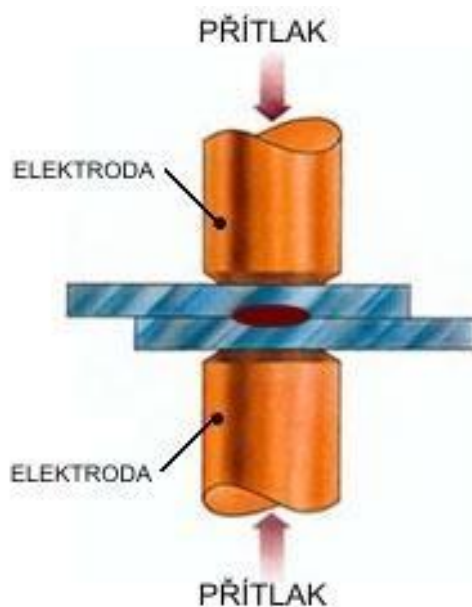
2. Odporové svařování

Při odporovém svařování je teplo potřebné k vytvoření koherence materiálů generováno aplikací elektrického proudu skrze přeplátované plechy mezi elektrodami. I proto tvorba svarového spoje, včetně svarové čočky a tepelně ovlivněné oblasti závisí na elektrických a tepelných vlastnostech svařovaného materiálu. Se znalostí fází a jejich přeměn lze tvorbu svaru spojit s elektrickými a tepelnými procesy svařování. Obecné vyjádření tepla generovaného v elektrickém obvodu lze při znalosti Joulova-Lenzova zákona vyjádřit jako:

$$Q = I^2 R \tau \text{ [J]}$$

kde Q označuje teplo, I proud, R elektrický odpor a τ značí dobu, po kterou proud protéká obvodem.

Pro odporové svařování je důležitější tvorba tepla ve všech místech svařence, spíše než celkové generované teplo, protože ohřev není a neměl by být ve svařenci rovnoměrný. Mimo to je také důležitější rychlost ohřevu než množství generovaného tepla, protože to, jak rychle bylo teplo aplikováno během svařování má zásadní vliv na teplotní historii svařence a následně na výslednou mikrostrukturu. Obecně platí, že elektrické a tepelné procesy by měly být uvažovány společně, to je nezbytné pro pochopení procesu odporového svařování a výběr správného nastavení parametrů svařovacího procesu. [2]



Obrázek 1- Schéma tvorby odporového bodového svaru [3]

Norma ČSN EN 14610 definuje odporové svařování jako tlakové svařování, při kterém se nezbytné teplo potřebné ke svařování vytváří vlivem odporu, průchodem elektrického proudu oblastí požadovaného ke spojení. [4]

2.1 Metody odporového svařování

Jednotlivé metody odporového svařování rozděluje norma ČSN EN ISO 4063, ta je dělí na 5 metod, nadále popisuje jejich příbuzné metody a stanovuje číselné značení jednotlivých metod. [5]

2.1.1 Odporové bodové svařování

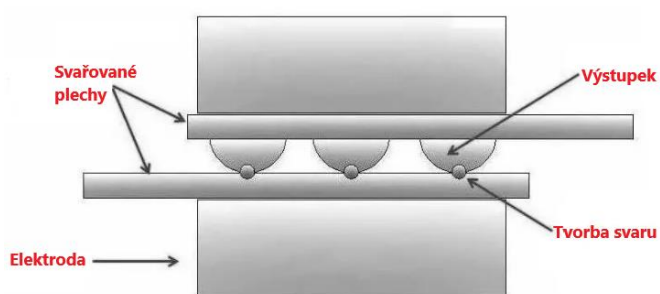
Při tomto procesu jsou spojované ploché díly pevně drženy mezi dvěma elektrodami, které jsou zapojeny v sekundárním obvodu transformátoru. Maximální odpor vzniká na kontaktní ploše obou spojovaných částí a vzniká teplo. Vzniklé teplo taví plechy na rozhraní plechů mezi elektrodami. Současně je na plechy aplikován tlak a dochází ke svařování. Velikost proudu a čas po který proud prochází musí být optimální pro správné roztavení svařovaného rozhraní.

Po ukončení průchodu proudu elektrodami nadále působí tlak po krátkou dobu, během této doby svar rapidně chladne. Následně jsou elektrody přesunuty jinam. Takovým postupem vznikají na svařenci čočkové svary. Velikost svarových čoček závisí na velikosti kontaktní plochy elektrody, ty mají obvykle průměr 4–7 mm. [6]

Elektrody pro bodové svařování jsou většinou z mědi nebo ze slitin podobných vlastností a jsou uvnitř chlazeny vodou. V důsledku rychlejšího chladnutí je ve svarech dosažena jemnozrnější struktura a rovnoměrnější mechanické vlastnosti svaru. Před začátkem svařování je třeba nastavit svařovací parametry, kterými jsou proud, čas a přitlak elektrod. Jedním z projevů správně nastavených parametrů je dosažení tzv. tepelné rovnováhy, která vede k vytvoření symetrického tvaru vznikajících svarů. S těmito parametry je také úzce spojeno opotřebení elektrod, které má velký vliv na kvalitu bodového svaru.

2.1.2 Výstupkové svařování

Výstupkové svařování je podobné bodovému svařování, ale používá plochou elektrodu. Při této metodě jsou tok proudu a výsledný ohřev lokalizovány do oblasti výstupku, díky tomu mohou být svařeny díly s větší tloušťkou, které nelze spojit bodovým svařováním. Schéma metody je zobrazeno na Obrázku 2. [6]

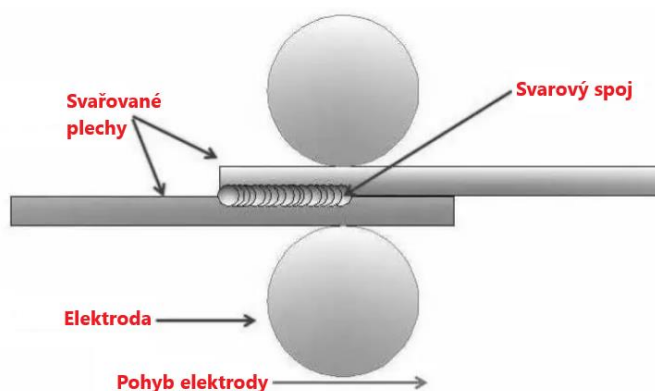


Obrázek 2 - Výstupkové svařování [6]

2.1.3 Odporové švové svařování

Svar je vytvářen předáváním práce (tepla) mezi odvalujícími se elektrodami ve tvaru kotouče, které vyvíjejí tlak a také vedou svařovací proud, Obrázek 3 schematicky zobrazuje princip metody. Svar může být kontinuální nebo přerušovaný.

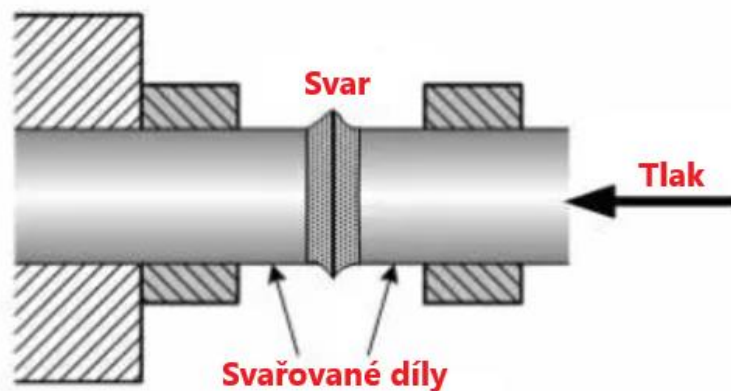
V prvním kroku jsou elektrody, jimiž prochází velké množství proudu, přitlačeny na svařované díly. Tyto styčné plochy jsou roztaveny a je vytvořen svarový spoj. Po vytvoření prvního spoje se elektrody začnou odvalovat, tím vznikne spojitý svar. Tato metoda se používá k vytváření těsnících spojů. [6]



Obrázek 3 - Odporové švové svařování [6]

2.1.4 Stlačovací stykové svařování

Jedná se o typ procesu odporového svařování, který lze použít pro spojování konců plechů, drátů, tyčí nebo trubek (jako je tomu na Obrázku 4). Při této metodě svařování jsou díly přitlačovány silou, díky které dojde k dosažení tlaku mezi svařovanými díly. Po dosažení požadovaného přitlaku začne procházet svařovací proud, v místě kontaktu vznikne velký přechodový odpor a místo se začne ohřívat. Při této metodě nedochází k zapálení svařovacího oblouku a teplota svařování nedosahuje teploty tavení. Kvalita výsledného svaru touto metodou závisí na jakosti obrobení stykových ploch, na teplotě a na velikosti tlaku. [6]

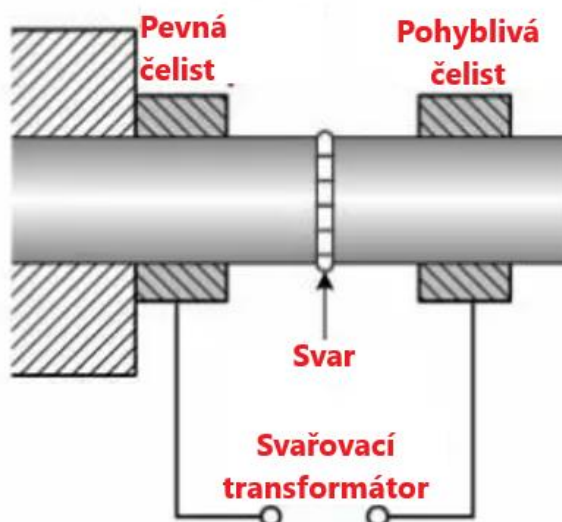


Obrázek 4 – Stlačovací stykové svařování [6]

2.1.5 Odtavovací stykové svařování

Metoda je velice podobná stlačovací odporové metodě svařování, s tím rozdílem, že zde dochází k tvorbě elektrického oblouku. Oproti styčným plochám u stlačovacího odporového svařování není nutné, aby byly svařované plochy zcela čisté a opracované, protože se nerovnosti odstraní odtavením. Metoda se nejčastěji používá pro svařování drátů nebo profilů.

Přiblížením konců svařovaných dílů dojde k zažehnutí více drobných elektrických oblouků po celé styčné ploše, jejich pomocí dojde k zahřátí na svařovací teplotu. Po dosažení teploty tavení povrchu jsou díly ještě přitlačeny pýchovací silou, díky které vznikne charakteristický výronek (viz. Obrázek 5) a odstraní se nečistoty ze vzniklého spoje. [6]



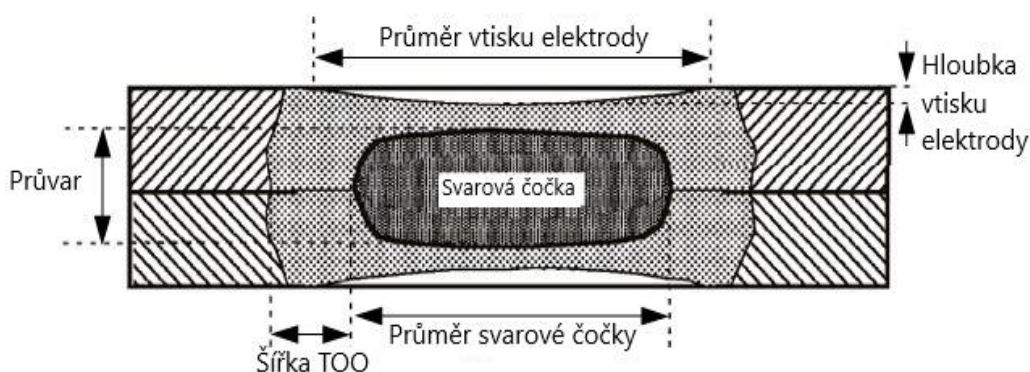
Obrázek 5 - Odtavovací stykové svařování [6]

2.2 Geometrie bodového svaru

Geometrické parametry bodových svarů jsou buď to přímo viditelné, nebo je k jejich odhalení nutné použití destruktivního či nedestruktivního zkoušení. Mezi nejčastěji používané pojmy vystihující geometrii svaru patří:

- velikost svarové čočky
- velikost průvaru
- hloubka vtisku elektrody
- praskliny (vnitřní vnější)
- pórovitost/dutiny
- oddělení plechů.

Mezi těmito atributy svaru je velikost svarové čočky, ať jde o šířku čočky nebo její průměr, nejčastěji měřeným a nejsmysluplnějším parametrem při určování pevnosti svaru. Když jsou dva plechy spojeny bodovým svarem, velikost svarové čočky určuje oblast homogenního spoje a jeho nosnost. Samotná velikost svarové čočky však často nestačí k popisu kvality svaru, protože nutně neznamená strukturální integritu svaru. Další vlastnosti svaru, jako je průvar, doplňují informace o velikosti svarové čočky a poskytují užitečné informace o pevnosti svaru. I když úzce souvisejí, nejsou z definice nebo způsobem měření stejné. Ve skutečnosti má svar obsahovat kromě svarové čočky všechny části svařence, jako je například tepelně ovlivněná oblast, ta je zobrazena na Obrázku 6. Struktura tepelně ovlivněné oblasti a rozměry svarové čočky jsou parametry svaru, jejichž prostřednictvím lze vysledovat závislost mezi parametry svařování a kvalitou výsledného svařence. [2]



Obrázek 6 - Geometrie bodového svaru [2]

Jak už bylo zmíněno, nejčastěji kontrolovaným parametrem bodových svarů je průměr svarové čočky. Její požadovaný průměr je určován na základě tloušťky tenčího plechu a požadavku na bezpečnost.

- Pro běžné svarové spoje: $\varnothing d = 4\sqrt{t_{pl}}$
- Pro méně namáhané svarové spoje: $\varnothing d = 3\sqrt{t_{pl}}$
- Pro vysoce bezpečnostní svary: $\varnothing d = 5\sqrt{t_{pl}}$

kde $\varnothing d$ vyznačuje průměr svarové čočky a parametr t je tloušťka jednoho plechu, v případě různých tlouštěk svařovaných plechů se průměr vypočítá z toho tenčího. [7]

2.3 Elektrody pro odporové svařování

Pracovní plocha elektrody je nejvíce zatěžovanou částí svařovací soustavy. Je důležité vzít v úvahu materiál elektrody, tvar, velikost, profil hrotu a chlazení. Všechny tyto faktory mají zásadní vliv na finální kvalitu odporového svaru. Elektrody jsou konečnou součástí sekundárního vnutí svářecího lisu a zajišťují přenesení sil, svařovacího proudu a odvádějí teplo. I přes tyto zatěžující podmínky musí mechanické, elektrické a chemické vlastnosti elektrod pro tvorbu kvalitního bodového svaru zůstat konstantní.

Elektrod pro odporové svařování existuje velké množství, to samé platí i pro profil hrotu. Průměr pracovní plochy se volí v závislosti na tloušťce svařovaného plechu, složení materiálu plechu a jeho povrchové úpravy. Materiál elektrody musí splňovat funkční vlastnosti, optimální vlastnosti vykazují slitiny na bázi mědi s obsahem prvků jako chrom, zirkon, nikl, hliník a wolfram. Měď vykazuje skvělou elektrickou vodivost, ale ne dostatečnou pevnost, proto se zpracovává za studena, čímž její pevnost stoupne, tím oproti tomu mírně klesá její vodivost. [8][9]

Obecně se rozumí, že materiály elektrod s vysokou vodivostí (třídy 1 a 2 podle systému normy ČSN EN ISO 5182) jsou ideální pro svařování materiálů s nízkou vodivostí. Naopak, kovy s vysokou vodivostí vyžadují elektrody s nižší vodivostí, jako jsou žáruvzdorné kovové elektrody označované jako elektrody třídy 3 podle ČSN EN ISO 5182. Například široce dostupné elektrody ze slitiny mědi a chromu nebo slitiny mědi, chromu a zirkonu fungují skvěle s nízkouhlikovou ocelí a ocelí s vysokou pevností. Alternativně při svařování mědi se používají kovy s nízkou vodivostí, jako jsou například žáruvzdorné kovové elektrody včetně čistě wolframových, molybdenových elektrod a elektrod ze slitin wolframu a mědi.

Při odporovém bodovém svařování kovů s nízkou vodivostí se materiál svařence zahřívá. Měď je ideální v tom, že umožňuje výtečný přenos proudu a tepla k svařovanému materiálu díky svému nízkému měrnému odporu. Na druhou stranu, při svařování vysoce vodivých kovů, materiál teplo rozptyluje a působí jako chladič. V tomto případě se využívají elektrody, které udrží teplo, zejména v hrotu elektrody a zároveň jsou dostatečně tuhé při vysokých teplotách, aby udržely polohu a maximalizovaly kontakt mezi elektrodou a svařencem. [9]

Další rozdělení materiálů elektrod uvádí RWMA (Resistance Welder Manufacturers Association), materiály se dělí do tří základních skupin, které se dále rozdělují do jednotlivých tříd. Třída elektrody určuje její vodivost a pevnost při vysokých teplotách, čím vyšší je číslo třídy, tím nižší je obsah mědi ve slitině, ale narůstá její odolnost proti opotřebení. Základní skupiny se dělí na:

- skupina A: slitiny na bázi mědi
- skupina B: slitiny z žáruvzdorných kovů
- skupina C: speciální materiály. [8]

2.3.1 Životnost elektrod pro bodové svařování

Elektrody v průběhu svařování podléhají mechanickým, metalurgickým a elektrickým změnám, které jsou zapříčiněny velkým mechanickým a tepelným zatížením. Tyto změny mají zásadní vliv na jakost svarů a snažíme se je eliminovat. S rostoucím počtem svarových cyklů dochází na kontaktní ploše k difúzním procesům. To má za následek výrazné snížení elektrické a tepelné vodivosti pracovních ploch elektrod. Samotná životnost se dá definovat jako počet svarů, které elektroda vykoná v dostatečné kvalitě, než dojde k úpravě kontaktní plochy například obrobením. [10]

K omezení životnosti elektrod přispívá zinkový povlak na základním svařovaném materiálu. Zinek v povlaku difunduje do pracovní plochy bodových elektrod. Během svařování se průběžně zvyšuje obsah zinku v povrchových vrstvách elektrody, čímž se zvyšuje odpor mezi svařovaným materiálem a elektrodou. Dochází ke snížení proudové hustoty v místě svařování díky transformaci kontaktní plochy elektrody a kvalita svařování rychle klesá. Kontaktní plochy elektrody se při dodatečném ohřevu deformují. Není-li kontaktní plocha elektrody upravena obrobením, může dojít k nedostatečné penetraci svaru, i když je rozměr svarové čocky vyhovující. Řešením může být postupné zvyšování svařovacího proudu, avšak na úkor životnosti elektrod.

Dalším parametrem ovlivňujícím kvalitu svařování a tím i životnost elektrod je přechodový odpor. Velikost přechodového odporu ovlivňuje velikost svařovací síly, čím větší je svařovací síla, tím nižší je přechodový odpor. Přechodový odpor také závisí na vodivosti spojovaných kovů, drsnosti povrchu materiálu a jeho čistotě. [11]

2.4 Kvalita bodových svarů

Pro posouzení kvality svarových spojů je nutné komplexně klasifikovat požadované vlastnosti bodových svarů. Pro vyhodnocení kvality je třeba nejprve stanovit jednotlivá kritéria a metodické postupy tohoto vyhodnocování. Kritéria kvality musí umožnit stanovení jednotlivých svarových spojů jako vyhovující a nevyhovující. Vyhodnocování kvality bodových svarů je při výrobě produktů prioritní záležitostí. Jakost svarových spojů je většinou stanovena podle požadavků zákazníků. Z důvodu využití bodového odporového svařování hlavně ve velkosériové výrobě, je potřeba kvalitu spojů kontrolovat nejlépe během výroby dílů.

K vyhodnocení kvality bodových svarů jsou využívány různé destruktivní i nedestruktivní zkoušky, které více či méně objektivně hodnotí výsledný efekt svařovacího procesu. Vhodný rozsah a metoda hodnocení kvality závisí především na účelu prováděných zkoušek a na podmínkách následného provozu svařence. [8]

2.5 Vady bodových svarů

Polotovary pro svarové spoje podléhají stejným zákonitostem jako každý kovový materiál. Tedy, že již od výroby každý obsahuje značné množství vad v submikroskopickém měřítku, ať se jedná o vady na úrovni krystalových mřížek, atomů, nebo zrn. Tyto vady si mnohdy ani neuvědomuje a zaměřujeme se hlavně na ty makroskopické, které jsou snadněji zjištělné a jejich vznik je pochopitelnější. Makroskopické vady zásadně ovlivňují mechanické vlastnosti každého kovového materiálu, ale ne všechny zabraňují efektivnímu praktickému využití. Vady bodových svarů můžeme rozdělit na vnější a vnitřní, ale není vyloučeno, že se oba druhy mohou vyskytovat současně.

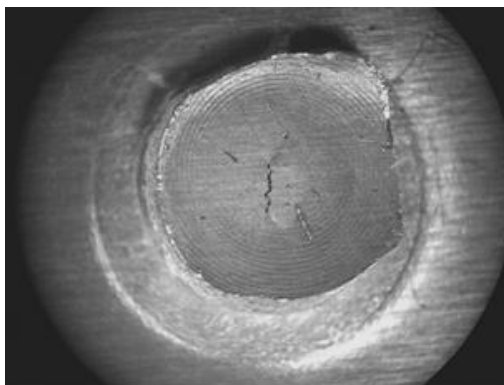
Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami případně smluvním vzorkem. Vady výrobku mohou být zjevné, které lze zjistit při prohlídce výrobku okem (vizuální kontrolou), potažmo jednoduchými pomůckami, nebo skryté, které obvykle zjistíme za pomoci přístrojů a laboratorních zkoušek. Podle ustanovení příslušných předpisů, mohou být vady přípustné nebo nepřípustné. Vady přípustné jsou takové, které normy, technické podmínky

nebo smluvní vzorek dovolují a jejich odstranění není nutné. Vady nepřijatelné jsou takové, které neodpovídají povoleným hodnotám. Tyto vady mohou být buď opravitelné, nebo neopravitelné. [12]

Geometrické vady svarů provedených tlakem klasifikuje a upravuje norma ČSN EN ISO 6520-2: Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 2: Tlakové svařování. Norma uvádí jednotné značení jednotlivých vad, jejich typ a tvar. Norma nezohledňuje metalurgické odchylky a neuvádí nevyhovující rozměry vad pro jejich vyhodnocení. Norma rozděluje vady do šesti kategorií [13]:

- **P1: Trhlina**

Tato vada vzniká místním porušením důsledkem vnitřního pnutí či ochlazování. Trhlina vzniká jako důsledek špatné svařitelnosti materiálu, kde po svaření dojde k jeho zakalení. Vzhledem k tomu, že trhlina snižuje únosnost spoje z hlediska dynamického namáhání, klasifikují se jako nepřijatelné. Vznik trhliny lze potlačit použitím měkkého svařovacího režimu, nebo nechazením elektrod v průběhu svařovacího cyklu. Trhlina bodového svaru je zobrazena na Obrázku 7. [2,13]



Obrázek 7 - P1: Trhlina [2]

- **P2: Dutiny**

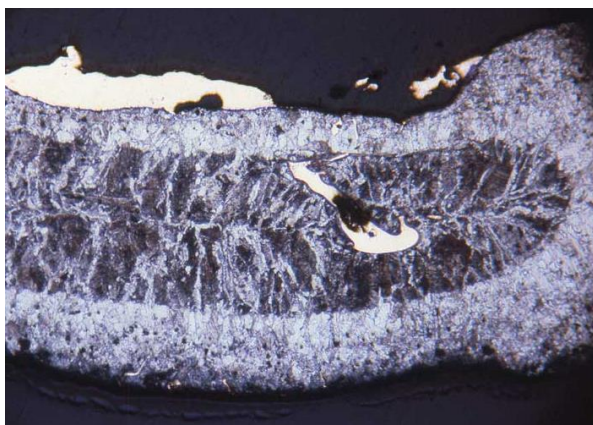
Dutiny vznikají díky zachycenému plynu ve svaru nebo v tepelně ovlivněné oblasti. Dalším důvodem vzniku dutin může být nevhodné zvolení svařovacích parametrů, zejména příliš dlouhý ohřev materiálu. Velmi často vznik dutin souvisí s rozstříkáním svarového kovu buď mezi svařovanými plechy, nebo pod elektrodou. Tvorbu dutin lze zamezit správným nastavením svařovacích parametrů a kontrolou čistoty materiálu. Na Obrázku 8 lze vidět typickou dutinu ve svarové čáře. [2,13]



Obrázek 8 - P2: Dutina [2]

- **P3: Pevné vměstky**

Jedná se o cizorodé části zachycené ve spoji (viz. Obrázek 9), ty se nejčastěji dostávají do svaru ze znečištěného svařovaného materiálu. Důsledkem obsahu pevných vměstků ve svarovém spoji může dojít ke snížení meze únavy. Zamezit vzniku této vady lze pomocí čištění svařovaného materiálu a svařovacích elektrod. [2,13]



Obrázek 9 – P3: Pevný vměstek [14]

- **P4: Studené spoje**

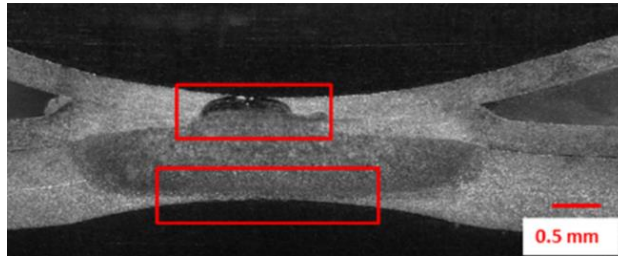
Vznik studeného spoje (Obrázek 10) znamená, že nedošlo k dostatečnému natavení materiálu. Příčinou nedostatečného natavení mohou být špatně nastavené svařovací parametry pro daný materiál, velké opotřebení elektrod nebo působení bočních proudů. [2,13]



Obrázek 10 - P4: Studený spoj [2]

- **P5: Vady tvaru a rozměru**

Patří sem veškeré odchylky od požadovaného tvaru a rozměru svarového spoje, příklady mohou být převýšená nebo nízká svarová čochka, nedostatečný průměr svaru, velká hloubka vtisku elektrod či asymetrie svarové čochky, která je zobrazena na Obrázku 11. [2,13]



Obrázek 11 - P5: Asymetrie svaru [15]

- **P6: Ostatní vady**

Do této skupiny patří veškeré vady, které se nedají přiřadit do předchozích skupin. Nejběžnější vadou této skupiny je rozstřík svarového kovu (Obrázek 12), ten nejčastěji vzniká při svařování se špatně zvolenými svařovacími parametry. [2,10]



Obrázek 12 - P6: Ostatní vady (rozstřík) [2]

3. Nedestruktivní kontrola

Tradičně je kvalita svarů sledována pomocí destruktivního zkoušení. To ale vyžaduje zničení části svařovaných dílů, aby došlo k ověření procesu. Nevýhody jsou zřejmé, nápravná opatření lze provést až po ověření určitého počtu svarů podle stanovených svařovacích plánů a po čase svařování, během kterého nejsou možné korekce svarových kontrol a samotného procesu. Pro ušetření nákladů na vyřazené díly, které jsou zničeny v průběhu destruktivního zkoušení, bylo vynaloženo mnoho úsilí na vývoj nedestruktivních metod kontroly svarů.

Obecně lze rozdělit metody nedestruktivního zkoušení na metody sloužící k odhalení povrchových vad a metody k odhalení vnitřních vad. Technik pro provedení nedestruktivní

kontroly bodových svarů je mnoho, příkladem může být zkoušení vířivými proudy, radiografická zkouška nebo ultrazvuková zkouška. Většina současných nedestruktivních metod silně závisí na zkušenostech a úrovni dovedností operátora, tím se stává nedestruktivní kontrola velice nákladnou a její výsledky nejsou stoprocentně spolehlivé. [2]

Spektrum NDT je poměrně široké a zahrnuje celou řadu metod. Dle standardů a norem se často NDT metody dělí na standardní a ostatní. Standardní metody lze rozdělit na:

metody kontroly povrchových vad:

- zkoušení vizuální metodou – VT
- zkoušení kapilární metodou – PT
- zkoušení magnetickou práškovou metodou – MT

metody kontroly vnitřních vad:

- zkoušení radiografickou metodou – RT
- zkoušení ultrazvukem – UT. [16]

Na bodové svary lze použít většinu metod NDT, které se používají pro běžné tavné svary. Nejčastější metodou v automobilovém průmyslu pro kontrolu bodových svarů je ultrazvukové testování, ale zkušenosti ukazují, že spolehlivost testu často závisí na dovednostech operátora, času, místě a podmínkách testování.

3.1 Ultrazvuková zkouška

Základním principem zkoušky je šíření mechanického vlnění v rozsahu ultrazvukových frekvencí (více než 20 000 Hz) skrze prostředí v důsledku jeho elastických vlastností. Když ultrazvukové vlnění dopadne na rozhraní, kterým může být například dutina v materiálu, je odraženo. Vzhledem k vnitřní struktuře materiálu (hranice zrn, strukturní složky, nehomogenity a další) také dochází k rozbíhání svazku, absorpci a rozptylu ultrazvukových vln, čímž se jejich energie se vzdáleností od zdroje snižuje.

Vysílání, přijímání i zpracování ultrazvukových signálů zprostředkovává ultrazvukový přístroj s přidruženou sondou. Přístroj koná budící impuls, který vybudí mechanické kmity v elektroakustickém měniči sondy, tyto kmity mají frekvenci v ultrazvukovém pásmu a šíří se součástí jako zvuková vlna. Při nárazu do nehomogenity v materiálu dojde k odražení části vlnění zpět do sondy a na obrazovce ultrazvukového přístroje se zobrazí jako echo. Podle vzdálenosti příslušného echa od vysílacího impulsu na obrazovce lze určit vzdálenost vady od povrchu součásti.

Hranici nejmenší ještě zjištělné velikosti reflektoru lze teoreticky odhadnout jako polovinu vlnové délky, tu lze vypočítat jako:

$$\lambda = \frac{c}{f} [m]$$

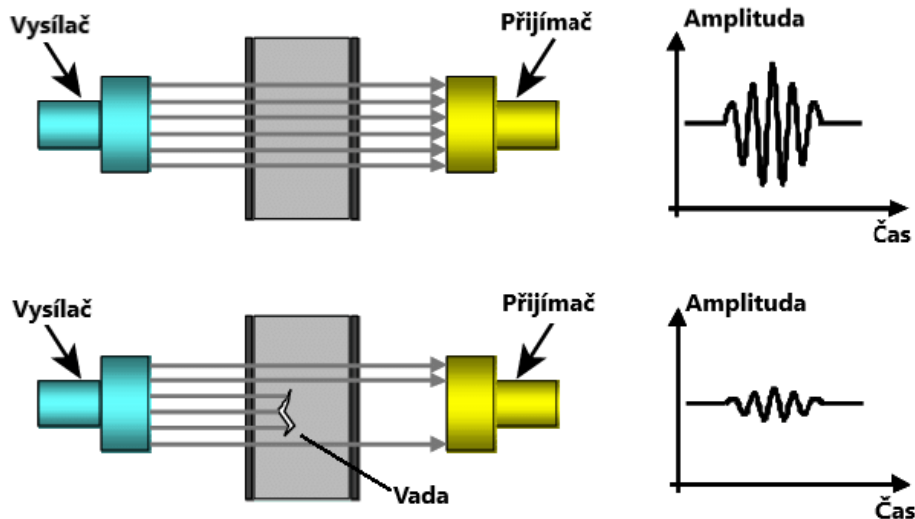
kde λ označuje vlnovou délku, c rychlost zvuku, a f určitou frekvenci kmitání. Z toho vyplývá závislost citlivosti na frekvenci, čím vyšší jsou požadavky na citlivost zjištělnosti vad, tím vyšší musí být použitá frekvence. Nejčastěji se při zkoušení ultrazvukem frekvence pohybují v řádech MHz, pro kontaktní zkoušení se z většiny využívají frekvence v rozsahu 2-5 MHz a pro imersní zkoušení frekvence až 25 MHz. [16]

Techniky a metodika zkoušení ultrazvukem se řídí normou ČSN EN ISO 17640: Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Techniky, třídy zkoušení a hodnocení. [17] Vyhodnocení případně nalezených vad a stanovení jejich přípustnosti se řídí normou ČSN EN ISO 11666: Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Úrovně přípustnosti. [18]

Metody ultrazvukové kontroly lze rozdělit na:

- Metodu průchodovou (Obrázek 13)
- Metodu odrazovou – impulsovou

Průchodová metoda je nejjednodušší metodou zkoušení ultrazvukem. Při nárazu vlny na vadu dojde k vytvoření ultrazvukového stínu neboli akustický tlak vlny se v daném místě sníží. Vysílací a přijímací sondy musí být souose umístěny na dvou protilehlých površích. Základem metody je měření hodnoty akustické energie, která projde zkoušeným předmětem, v místech, kde se nachází vada bude tato energie naměřena menší. Metoda je vhodná pro zkoušení výrobků menších tlouštěk, které mají rovnoběžné povrchy přístupné z obou stran. Mezi nevýhody této metody patří nemožnost odlišit, zda se jedná o vadu nebo špatné navázání akustické vazby, další nevýhodou je potřeba dvou sond, které musí být umístěny souose. [12]



Obrázek 13 - Ultrazvuková zkouška metoda průchodová [19]

Více používaná je metoda odrazová – impulsová. Oproti metodě průchodové poskytuje informace i o struktuře materiálu, rozměrech a podobně. Metoda spočívá ve vysílání krátkého ultrazvukového impulsu, který se odráží od všech rozhraní a vrací se do sondy, kdy časový průběh se zaznamenává na obrazovce. Generátor, který vybudí ultrazvukovou sondu, je spouštěn synchronizátorem současně se zdrojem časové základny, která se přivádí na horizontální vychylovací destičky obrazovky. Výstup zesilovače je připojen na její vertikální vychylovací systém. Metodou získáme informaci o vzdálenosti plochy, od které se odrazila vlna, pomocí měření zpoždění, se kterým se impuls vrátí do sondy. Informace o velikosti odrazové plochy lze určit podle výšky echa. Výhodami této metody jsou použití pouze jedné sondy a možnost kontrolování dílů, které jsou přístupné pouze z jedné strany. [12]

3.2 Ultrazvukové sondy

Sondy jsou vyráběny v mnoha typech a tvarech, výběr záleží na účelu použití. Sondy se od sebe liší frekvencí, velikostí, tlumením a dalšími parametry.

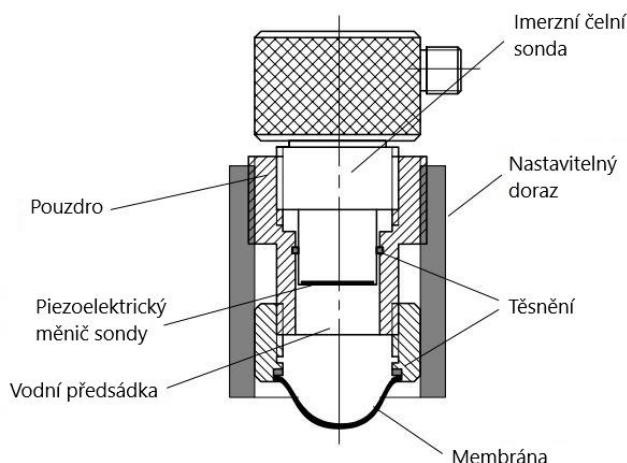
Sondy s měničem vysílajícím podélné vlny, kdy svazek prochází materiálem v kolmém směru, se nazývají přímé sondy (Obrázek 14). Jsou běžně dostupné jako kontaktní nebo imersní sondy.

Pro zlepšení rozlišení blízko povrchu a ke zmenšení šumu se používají dvojité sondy a sondy s předsádkou.

Úhlové sondy vysílají ultrazvukový svazek příčných nebo podélných vln šikmo do materiálu pod úhlem 35 až 80 stupňů. Příčné vlny vznikají transformací podélných vln na rozhraní s materiálem.

Dvojité sondy byly už pospány u metody průchodové, obsahují oddělený vysílací a přijímací měnič a používají se hlavně pro zjišťování vad pod povrchem. [16]

Pro kontrolu bodových svarů se primárně využívají přímé sondy s vodní nebo plexisklovou předsádkou a metoda odrazová. Frekvence nejčastěji používaných sond pro zkoušení bodových odporových svarů se pohybuje v rozmezí 10-20 MHz. [20]



Obrázek 14 - Konstrukce přímé sondy [20]

3.3 Problematika ultrazvukové kontroly bodových svarů

Použití ultrazvukové kontroly se ukázalo jako rentabilní prostředek kontroly ve výrobním prostředí. Ultrazvuková kontrola byla poprvé použita v roce 1978 k detekci vadných odporových bodových svarů pomocí techniky ring-down. Princip techniky spočívá v pozorování série ozvěn ultrazvuku odraženého mezi povrchy svařovaných desek, tato technika je známá jako A-scan. Časové intervaly odrazů se používají k měření tloušťky materiálu. Neúplné svary vytvářejí odrazy, které mají zhruba poloviční interval, zatímco méně zjevné defekty svaru vykazují jak sérii odrazů s polovičním intervalem, tak sérii odrazů s delšími intervaly. Potíž spočívá ve vztahu amplitudy půlintervalových ozvěn a delších intervalových ozvěn k fyzikálním parametrům svaru. Nejednoznačnosti v amplitudě echa vyplývají z tvaru, povrchové úpravy horní a spodní části svaru, z umístění defektů a jejich typu. Většina ultrazvukových nedestruktivních zařízení je založena na technice A-scan, pro dosažení lepších výsledků ultrazvukové kontroly bodových svarů byly vyvinuty technologie kontroly B-scan a C-scan. [2]

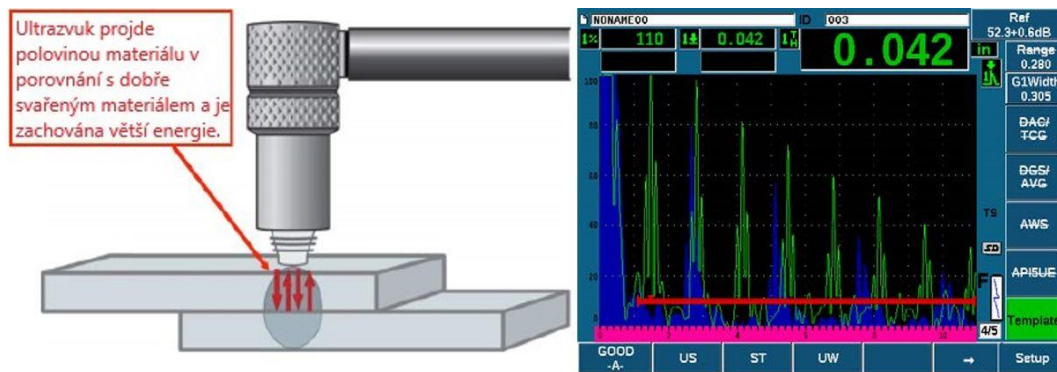
Ultrazvuk se často používá k posouzení kvality svaru v průmyslu a lze jej použít k měření průměru svarové čočky, aniž by došlo k jeho zničení. Proto Summerville a kol. [21] provedli

porovnání naměřených C-scanů průměrů svarových čoček s naměřenými hodnotami průměrů po Chisel testu. Rozdíly v kvalitě svarů byly dosaženy nesouosostí sestavy plech-elektroda, což je běžnou chybou v průmyslu, která má za následek nerovnoměrné odsazení plechů. To způsobuje problémy při ultrazvukovém měření průměru svarových čoček a vede k nepřesnému měření. Vzhledem ke způsobu, jakým je měřen průměr svarové čočky na ultrazvukovém C-scanu u bodového svaru, faktory, které ovlivňují mechanismy porušení, jako je vyrovnaní svarové čočky se základním materiálem, pórovitost, nečistoty nebo vměstky na povrchu nebo v svarové čočce, nemusí být dobře charakterizován. Průměr svarové čočky měřený ultrazvukem vykazoval malou korelaci s naměřeným průměrem svaru z Chisel testu pro shromážděná data, nicméně data byla shromážděna za podmínek, o kterých bylo známo, že jsou pro ultrazvuk náročné. Několik bodových svarů bylo ultrazvukem vyhodnoceno jako NOK (Not OK = není v pořádku) a nebyl naměřen žádný měřitelný průměr svarové čočky. Tento problém byl způsoben nepravidelnými tvary svarových čoček nebo nesprávným zarovnáním svaru vzhledem k povrchu plechu, ze kterého bylo měření provedeno. Autoři vyhodnotili korelaci v případě horší kvality svarů mezi měřeným průměrem svaru po Chisel testu a naměřenými průměry svarových čoček za pomoci ultrazvukové zkoušky za minimální.

3.4 Technika A-scan

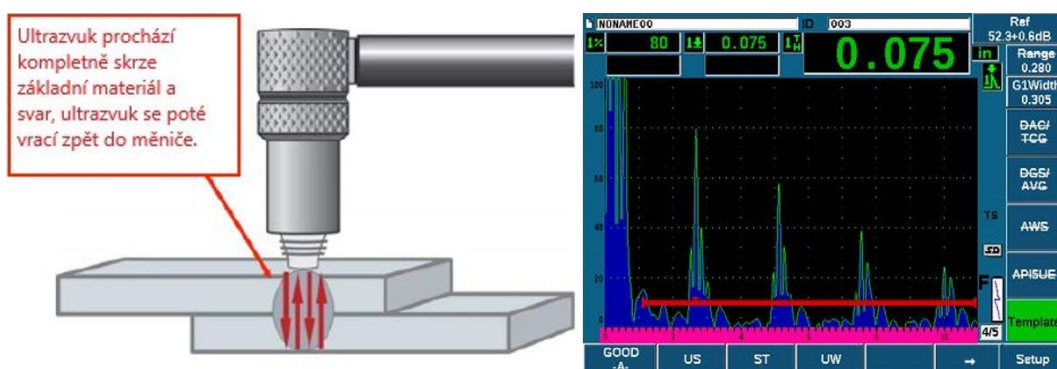
Ultrazvukový oscilogram získaný technikou A-scan je grafem závislosti amplitudy vlny na čase, kdy je ultrazvukový paprsek odražen od rozhraní, což způsobí sérii ozvěn, jejichž pozice označuje umístění odrazného rozhraní a jehož výšky jsou funkcí zvukového útlumu, to je mikrostruktury svarové čočky. [22]

Princip techniky spočívá v předpokladu, že v dobrém svaru bude vzdálenost mezi odrazy úměrná tloušťce svaru a rychlost tlumení, to je rychlost, se kterou po sobě jdoucí odrazy klesají v amplitudě, bude souviset s útlumem v svarové čočce. S každým stavem svaru je spojen charakteristický vzor ozvěny. Pokud nedojde k svaření mezi dvěma kusy kovu, budou po sobě jdoucí ozvěny blíže k sobě a budou mít větší amplitudu jako je tomu na Obrázku 15.



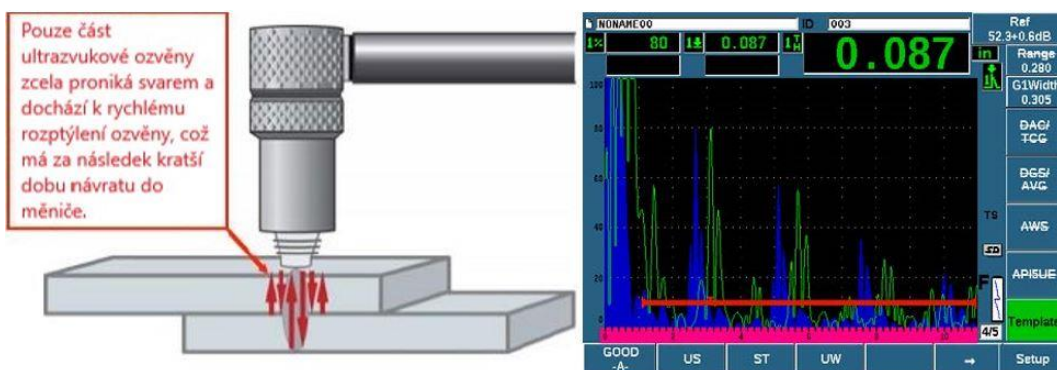
Obrázek 15 - A-scan nesvařeného materiálu [23]

V případě, že je svar provedený správně budou mít ozvěny menší amplitudu a budou dále od sebe, to zobrazuje Obrázek 16.



Obrázek 16 - A-scan dobře svařeného materiálu [23]

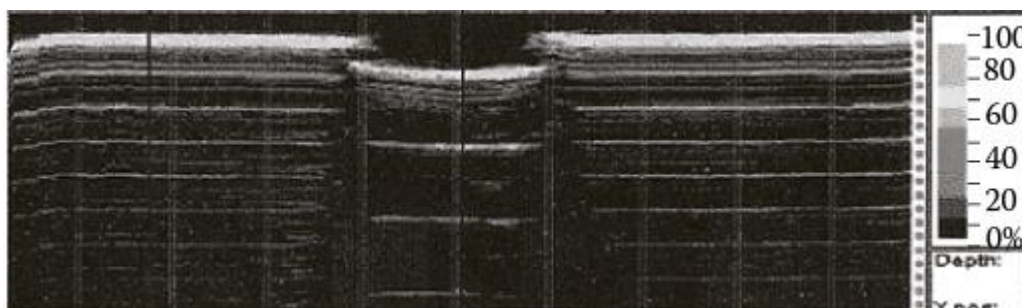
Pokud nedojde k dostatečnému svaření dvou materiálů a svar je poddimenzovaný, tak se pouze část ultrazvukové vlny bude odrážet od celkové tloušťky dvou plechů, protože část se odráží již od tloušťky vrchního plechu. Takový odraz vytváří vzor, ve kterém se mezi většími amplitudami odrazu reprezentujícími plnou tloušťku svaru objevují odrazy s menší amplitudou představující tloušťku jednoho plechu, takový echogram lze vidět na Obrázku 17. [23]



Obrázek 17 - A-scan studeného spoje [23]

3.5 Technika B-scan

Snímek B-scan je často považován za obraz průřezu svaru podobný obrazu získanému z metalurgického výbrusu. Představuje sérii ozvěn ultrazvukových vln, kdy se sonda pohybuje přes svar. Echo je spojeno s tvarem ultrazvukového paprsku, který může pokrýt významnou část svařence. B-scan lze popsat také jako otočení série signálů A-scan tak, abychom na monitoru ultrazvukového přístroje viděli ozvěny charakterizující průřez svaru. V každém místě sonda vytváří řadu ozvěn mezi horní a zadní částí kontrolované součásti a upravuje je tak, aby odpovídaly tloušťce součásti. Poté jsou amplitudy ozvěn barevně kódovány a doby letu vlny jsou reprezentovány jako linie barevných pixelů v počítačovém obrazu. Výsledek získaný technikou B-scan zobrazuje průřez svařence, včetně základního kovu, vtisku elektrod a oblasti svarové čočky (Obrázek 18).



Obrázek 18 - Průřez bodovým svarem získaný technikou B-scan [2]

Důležité vlastnosti B-scanu spočívají v přesnosti umístění a velikosti odrazů ultrazvuku od horního a spodního povrchu plechu a na umístění jakýchkoliv anomálních reflektorů uvnitř svařence. Na samotném echogramu osa X reprezentuje dráhu sondy a na ose Y se zobrazuje hloubka zkoušeného materiálu. [2]

3.6 Technika C-scan

C-scan využívá projekci ultrazvukových dat do půdorysu testované součásti k vytvoření obrazu. Tato technika mapování se obvykle používá pro mapování koroze nebo tloušťky součásti, stejně jako pro vizualizaci trhlin a vměstků v součásti. C-scan zobrazuje data spolu s hloubkou (časem letu) nebo amplitudou vlny. Tato data, prezentovaná ve vysokém rozlišení a s různými barevnými vzory, zvyšují přesnost detekce vad v součásti. Mapovací a vizualizační techniky jsou velmi užitečné nejen z hlediska detekce anomálií, ale také z hlediska zlepšení efektivity procesu. Schopnost monitorovat a vizualizovat vady na objemové úrovni umožňuje zkrátit dobu inspekcí a analýz v průmyslovém odvětví. Detekce vad může být založena na hloubce nebo amplitudě ultrazvukového svazku.

C-scan založený na amplitudě: Tato metoda umožňuje kontrolu struktury materiálu. Monitorování ozvěny zadní stěny může pomoci při detekci anomálií pozorováním poklesu nebo změny amplitudy odražené od zadní stěny. Podobně může amplitudové skenování pomoci také při detekci bodů se slabou vazbou, která je důsledkem spojení dvou různých materiálů.

C-scan založený na hloubce: Tento proces monitoruje tloušťku kontrolovaného objektu. Kontrola tloušťky materiálu také pomáhá při lokalizaci přesné polohy vad, vměstků nebo porozity. [24]

3.7 Techniky zkoušení phased array a matrix array

Matrix Array a Phased Array UT se od běžného ultrazvuku liší tím, že k vysílání a příjmu zvukových vln používají více na sobě zcela nezávislých měničů, kde jsou jednotlivé malé elementy z PZT keramiky zalité do epoxidové pryskyřice. Naproti tomu konvenční UT sonda používá ke generování ultrazvuku jediný krystal, a proto může v daném místě vytvořit pouze jeden A-scan.

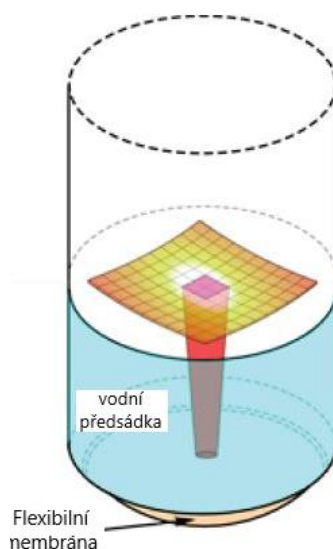
V termínu Phased Array UT se slovo "phased" vztahuje k řízení časování a slovo "array" se vztahuje k více prvkům. Princip, že vlny se navzájem ruší, umožňuje systémům fázového pole tvarovat ultrazvukový svazek. Toho se dosahuje změnou časového zpoždění zvukového impulsu vysílaného každým prvkem. Paprsek tak může být zaostřen a úhel paprsku může být elektronicky měněn. Zaostřování zlepšuje citlivost v daném místě, zatímco elektronická změna úhlu svazku pomáhá v situacích, kdy je přístup k povrchu omezený nebo kdy vnitřní prvky, které jsou předmětem zájmu, neleží rovnoběžně s kontrolním povrchem. Fázová pole jsou však složitá a vyžadují pochopení složitějších pojmů, jako jsou ohniskové zákony, které řídí časovou posloupnost pulzování prvků. Ačkoli je fázová soustava výkonná a všestranná, její nastavení může být časově náročné a interpretace výsledků může být složitá. Protože sondy s fázovaným polem mají obvykle pouze jednu řadu ultrazvukových prvků, mohou v daném místě sondy vytvořit pouze jeden průřez (B-scan, D-scan nebo S-scan). K vytvoření rovinné mapy kontrolní oblasti (C-scan) je nutný mechanický pohyb s externím nástrojem, a to buď pomocí snímače, nebo portálové sestavy.

Využitím techniky Phased Array lze značně uspořit čas v porovnání s konvenčním ultrazvukovým zkoušením. To je zapříčiněno výhodami jako je téměř 100% pokrytí zkoušené oblasti, lepšího vyhodnocení objemových vad díky libovolné fokusaci, kde se zlepšuje odstup signálu od šumu nebo tím, že je možné jednou sondou zkoušet přímo, pod úhlem a fokusovat

bez použití čoček a podobných zařízení. Přístroje využívající techniku Phased Array často automaticky zaznamenávají výsledky, což je výhodné pro názornější interpretaci těchto výsledků a použití v automatizované výrobě.

V termínu Matrix Array UT se "Matrix" vztahuje na 2D pole a v tomto kontextu na 2D pole ultrazvukových prvků. Vzhledem k tomu, že systém využívá pouze vlny o úhlu 0° (při pohledu přímo dolů do materiálu), je koncepčně jednoduchý na pochopení a poskytuje jasné údaje. Mapy C-skenů velkých ploch lze sestavit pomocí spojení nasbíraných C-skenů, aniž by bylo nutné používat další nástroje. Se sondou není nutné pohybovat a metoda nevyžaduje tak vysoké nároky na dovednosti obsluhy jako je tomu u Phased Array. [16,25]

Ke spojení obou metod může dojít při použití Matrix phased array sondy (Obrázek 19). Tato sonda obsahuje množství piezoelektrických prvků uspořádaných do trojrozměrného pole a pružnou membránu, která se přizpůsobuje tvarovanému povrchu bodového svaru a zároveň umožňuje přenos zvukové energie přímo do zkoušeného bodového svaru. K matici je připojeno buzení a dílčí skupina prvků snímače je kombinována tak, aby vyslala ultrazvukový paprsek směrem k bodovému svaru. Každý prvek snímače v podskupině může být pulzován v různých časových intervalech (fázové zpoždění) a jejich jednotlivé vlny se sčítají, aby se dosáhlo zaostřovacího účinku paprsku. Celkový počet prvků, celkový rozměr a pracovní frekvence určují celkové trojrozměrné uspořádání tvaru povrchu a jeho provozní vlastnosti.



Obrázek 19 - Schéma MPA sondy [26]

Při kontrole se nejprve na povrch horního plechu nanese kapka vody a poté se na vtisk svaru umístí sonda MPA. Pružná membrána umožňuje, aby se hrot sondy přizpůsobil obrysu svařované oblasti. Komora naplněná kapalinou nebo pevným materiálem se zvukovým

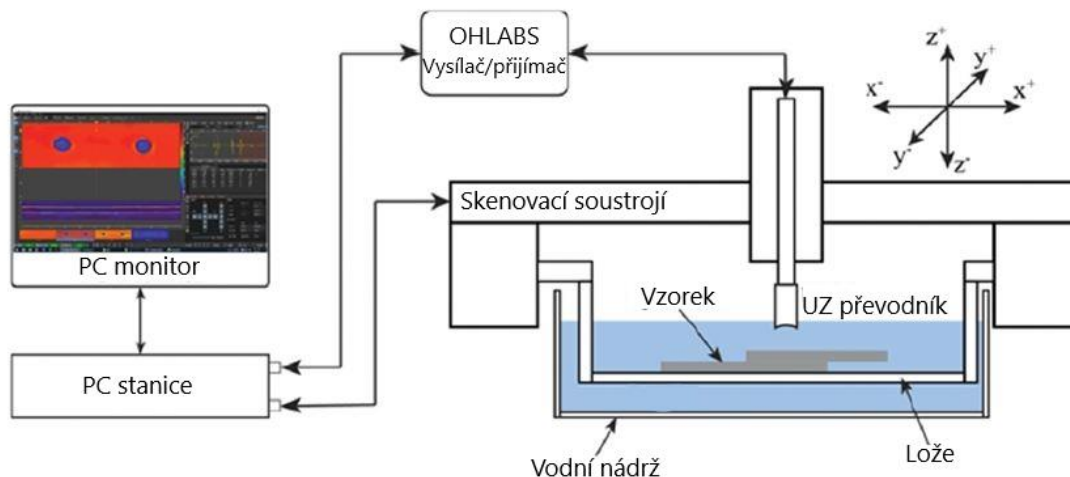
zpožděním slouží jako dráha pro zaostření a usměrnění ultrazvukových paprsků. Zakřivená soustava ultrazvukových prvků vysílá ultrazvukové vlny do svařované oblasti a zachycuje související odrazy. Jednotka fázového pole je v elektrickém spojení s ultrazvukovými prvky prostřednictvím signálových cest. Jednotka fázového pole je rovněž v elektrické komunikaci s počítačem, který zpracovává příchozí ultrazvuková data a generuje vizuální obraz. [26]

4. Trendy ultrazvukové kontroly

4.1 Skenovací akustická mikroskopie

Systém skenovací akustické mikroskopie (SAM) je potenciální ultrazvukový testovací přístroj, který využívá ultrazvukový převodník integrovaný s modulem skeneru ke kontrole kvality odporových bodových svarů. Díky skenovacímu modulu se rozsah velikostí zkoušených vzorků pohybuje od několika milimetrů až do jednoho metru. Ultrazvukový převodník je upevněn na ose Z a kontaktní úhel snímání je během procesu skenování udržován konstantní. Systém SAM na základě ultrazvukových signálů poskytuje informace o povrchové i vnitřní struktuře. Převodník se využívá k odesílání a přijímání signálu, následně generuje snímky A-scan, B-scan i C-scan. [27]

Pham a kol. [27] ve své studii vyvíjeli a navrhovali systém skenovací akustické mikroskopie TSAM-400 pro hodnocení kvality spojů odporového bodového svařování korozivzdorných plechů SUS 316 o tloušťce 1,5 mm při různých svařovacích parametrech. Pro hodnocení kvality bodových svarů byly použity informace o vtisku v plechu vytvořeném vlivem tlaku elektrody a rozměrech svarové čočky. Získaná echa A-scan autoři použili pro výpočet tloušťky svařovaného dílu v místě svaru. Průměr svarové čočky byl stanoven ze snímků C-scan. Informace o vnitřní stavbě svarů (tvar svarové čočky, defekty) byly získány ze snímků B-scan a C-scan. Pro zkoušení byl použit fokusující převodník s vysokou citlivostí o frekvenci 50 MHz, který byl částečně ponořen ve vodní nádrži. Dalším cílem studie bylo vyvinutí intuitivního softwaru SAM tak, aby při jeho použití došlo ke zkrácení doby vyhodnocování odporových bodových svarů. Vyvinutý modul SAM měl skenovací plochu 400x400 mm² s maximální rozlišením 0,01x0,01 mm². Uspořádání metody je schematicky zobrazeno na Obrázku 20.



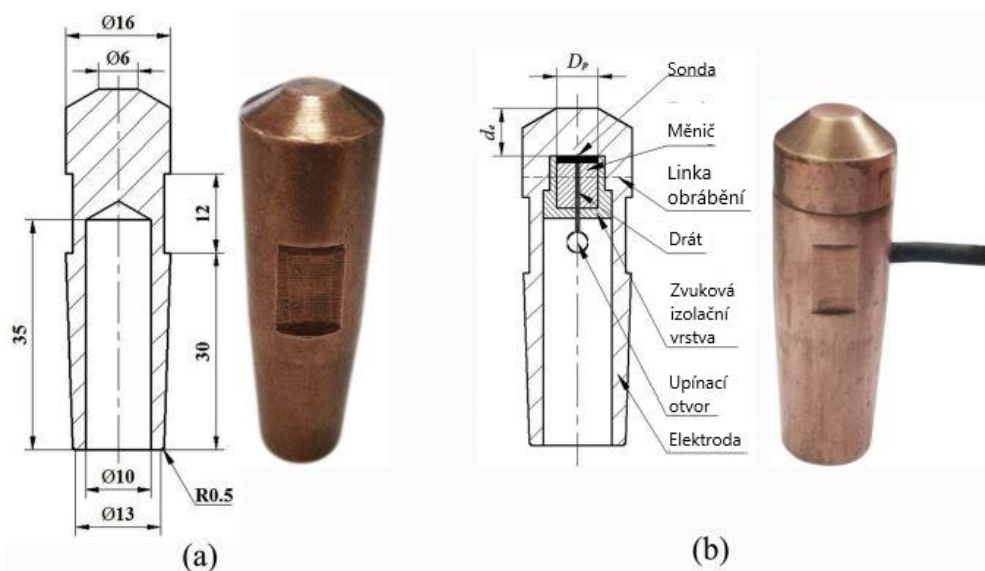
Obrázek 20 - SAM (skenovací akustická mikroskopie) [27]

Na základě získaných dat a jejich analýzy, autoři vyhodnotili jako nejlepší parametry pro svařování plechů z oceli SUS 316 o tloušťce 1,5 mm svařovací proud 6 kA, čas svařování 200 ms, přítlačnou sílu elektrody 2500 N a dobu přítlaku po ukončení průchodu svařovacího proudu 50 ms. Autoři dále nechali povrch zkoumaných součástí ofrézovat, aby zjistili vliv topografie povrchu na zkoušení. Výsledky ukázaly, že maximální chyba získaných dat byla 10,9 %, čímž potvrdili dostatečnou kvalitu použití systému SAM pro zkoušení bodových odporových svarů. Autoři metodou dosáhli dobré přesnosti, bohužel velikou nevýhodou systému je nutnost ponoření kontrolovaných dílů do vody.

4.2 Online detekce trhlin

Autoři Hua a kol. [28] navrhli online ultrazvukový detekční systém, který byl vyvinut pro automatické vyhodnocení kvality odporových bodových svarů během samotného procesu svařování. Pro získání ultrazvukového signálu byla použita vestavěná sonda, která byla implementována ve svařovací elektrodě (Obrázek 21). Pomocí sondy byly získávány vlastní hodnoty signálů jako amplituda akustického tlaku, vzdálenost ozvěn, hlavní frekvence a amplituda hlavní frekvence. Pro kvantifikaci ultrazvukového hodnocení kvality bodových odporových svarů byly potřeba odpovídající matematické výpočtové modely, ty byly zprostředkovány pomocí specializovaných vyhodnocovacích softwarů, které automaticky vyhodnocovaly velikost svarové čočky a klasifikovaly svar. Při samotném experimentu ultrazvukové vlny procházely třemi médii, těmi byly vlastní elektroda (slitina mědi), vazební prostředek (motorový olej) a odporový bodový svar spojovaných plechů o tloušťce 1,6 mm z oceli DP590. Elektroda s integrovanou sondou byla umístěna na horním rameni svařovacího

lisu. Výsledky získané pomocí navrženého zařízení autoři porovnávali s metalografickými výbrusy, zjistili, že relativní chyby mezi naměřenými hodnotami jejich systémem a skutečnými hodnotami zjištěnými pomocí metalografických výbrusů nebyly větší než 7 %, což metodu řadí mezi nejpřesnější možnost online detekce použitelných v průmyslové výrobě z uvedených metod.



Obrázek 21 - a) Standardní elektroda, b) upravená elektroda pro online detekci [28]

Dalším systémem pro online vyhodnocování kvality bodových odporových svarů za pomoci ultrazvukové kontroly je systém CYCLOPS (Obrázek 22), který byl vyvinut, testován a implementován automobilovou společností Ford. Jedná se o zcela automatický systém pro kontrolu, vyhodnocování a sledování bodových svarů pomocí ultrazvuku, jehož kontrola polohy a řízení je uskutečněno pomocí robotického vidění.

Systém využívá ultrazvukovou sondu s vysokým rozlišením se suchým kontaktem z pevné vyměnitelné pryže. Sonda umožňuje testování většího rozsahu tloušťek plechů a průměru svarů, než je možné kontrolovat tradičně používanými sondami. Aplikační software automaticky vyhodnocuje ultrazvukový signál a vizuální vstup, pomocí těchto informací klasifikuje svar a přidá výsledky do databáze.

Výhody systému CYCLOPS:

- zlepšení spolehlivosti díky sledovatelnosti, konzistenci a opakovatelnosti ultrazvukových testů.
- širší rozsah kontroly kvality díky rychlejším kontrolním procesům, které umožňují testovat mnohem větší počet bodových svarů (3-6 s včetně polohování)
- testování bodových svarů na každé části karoserie díky online kontrole

- monitorování svařovacího procesu díky dostupnosti datových výstupů
- odstranění ruční kontroly a rychlejší odhalení chyb. [29]



Obrázek 22 - Online systém CYCLOPS [29]

Ačkoliv systém zahrnuje velkou řadu výhod, ze své podstaty není online jako tomu je v případě sondy integrované do svařovacích elektrod, protože nedochází ke kontrole svaru přímo při svařování, ale až v další operaci.

Další studii, která se zabývala online ultrazvukovým zkoušením, vytvořili autoři Ji a kol. Integrovali komerčně dostupný ultrazvukový zobrazovací systém MPA (Matrix phased array) do robotického ramene a tím vytvořili asistovanou automatizovanou metodu nedestruktivního testování pro odporové bodové svary. Autoři zkoumali vliv přitlaku sondy a úhel dopadu ultrazvukových vln. Na základě výsledků automatizované nedestruktivní kontroly s pomocí robotického ramene byl stanoven optimalizovaný kontaktní tlak 0,5 lb a úhel dopadu ultrazvukových vln $\pm 0,5^\circ$ vzhledem k normálovému směru. Při těchto optimálních podmínkách kontaktu sondy bylo zjištěno, že lze dosáhnout nejistoty měření menší než 5 %. Autoři v závěru uvádí, že potřeba systém ověřit na reálné výrobní lince. [30]

Integrovaný systém MPA do robotického ramene dosáhl ze všech uvedených metod online detekce nejlepších výsledků. Bylo tomu ale zapříčiněno v laboratorních podmínkách, což neověřuje použití systému v průmyslu. Stejně jako tomu bylo u systému CYCLOPS by integrovaný MPA systém musel být umístěný až v operaci po svařování.

4.3 Zkoušení se suchým vazebním prostředím

Kapalná vazební prostředí mají některá přirozená omezení a nevýhody. Můžou být citlivá na extrémní povětrnostní podmínky, můžou být chemicky škodlivá pro díl nebo životní

prostředí, můžou některé kontroly ztížit nebo znemožnit a jejich použití a likvidace může být velmi nákladné. Alternativním řešením těchto omezení a nevýhod je použití ultrazvukové kontroly se suchým vazebním prostředím.

Příkladem může být řada piezoelektrických snímačů DCUT, které odolávají velmi vysokým napětím a mohou být účinně spojeny skrze pryž se zkoušenou součástí bez nutnosti použití konvenčních vazebních prostředků. Tyto snímače lze použít ke kontrole kovů, kompozitů a jakéhokoli materiálu vhodného pro šíření ultrazvuku s následujícími výhodami oproti běžným možnostem:

- kontrola je čistší, jednodušší a nekontaminuje kontrolovaný materiál ani životní prostředí
- snímače jsou nízkoprofilové a velmi flexibilní
- inspekce se stává méně nákladnou, jsou eliminovány všechny náklady spojené s vazebními prostředky.

V současné době pryžový materiál omezuje zkoušení na materiály o teplotě do 80 °C, ale pokračuje intenzivní vývoj o začlenění materiálů, které umožní měření pomocí DCUT sond při ještě vyšších teplotách. Stávající senzory DCUT zahrnují pružné a pevné kontaktní sondy, rotační sondy a vzdálené kontaktní sondy pro detekci vad, měření tloušťky a kontrolu svarů. Metoda kontroly může umožnit lepší využití času inspektorů, snížit náklady na vybavení a poskytnout možnosti kontroly, které nebyly dostupné nebo možné. [31]



Obrázek 23 - Nízkoprofilová sonda DCUT [31]

Použití hydrofilních polymerů jako vazebního prostředku má velkou řadu výhod, ve srovnání s běžně používanými kapalnými vazebními prostředky to mohou být:

- nízká cena
- nehořlavost
- snadná manipulace

- flexibilita materiálu
- schopnost přenášet vysoké frekvence
- teplotní rozsah od -30 °C do 70 °C

Vazební prostředí na bázi hydrofilních polymerů mají vynikající ultrazvukové vlastnosti. Měkký gelový povrch těchto materiálů dává možnost navázat dobrý a nepřetržitý akustický kontakt s kontrolovanou součástí bez nutnosti použití dalších kapalin. Tyto materiály se velmi dobře přizpůsobují drsným a geometricky složitým povrchům. Akustická impedance hydrofilních materiálů je blízká impedanci imerzní kapaliny a jejich koeficient útlumu je nižší než u všech ostatních doložených elastomerů a mnoha plastů. V závislosti na typu hydrofilního materiálu a kapaliny, kterou je napuštěn, lze pracovní teplotní rozsah zařízení rozšířit od -30 °C do 70 °C a dosáhnout kontroly s frekvencemi až 25 MHz. [32]

Studie autorů Bourne a kol. zkoumala proveditelnost použití hydrofilních polymerů jako nových ultrazvukových vazebních prostředků. Hydrofilní materiály absorbují velké množství vody a stávají se měkkými a pružnými, přitom si však pod mechanickým tlakem zachovávají hydrataci. Bylo zkoumáno mnoho jejich ultrazvukových vlastností, včetně akustické impedance, schopnosti přenášet vysoké frekvence a účinnosti vazby na hladký ocelový povrch. Výsledkem této studie se stal prototyp rotační sondy se suchou vazbou, která je schopna pracovat při frekvenci větší než 5 MHz při odrazové metodě a poskytuje vynikající rozlišení při vyloučení rizika kontaminace zkušební vzorku. Autoři v závěru vyhodnotili, že hydrofilní materiály vykazují akustické vlastnosti, které se velmi dobře hodí pro použití při ultrazvukovém nedestruktivním zkoušení. Nabízejí zejména nízký útlum při vysokých frekvencích a schopnost účinně se spojit s materiály, které se běžně vyskytují při NDT. Dosažené výsledky byly srovnatelné s výsledky získanými konvenčními ponornými zkouškami. Vzhledem k tomu, že rotační sondu lze provozovat za mokra i za sucha, eliminuje se riziko kontaminace zkušební vzorku. To je považováno za klíčové, protože používání materiálů citlivých na vodu v konstrukcích kritických z hlediska bezpečnosti stále roste, stejně jako potřeba spolehlivě je kontrolovat bez rizika degradace. [33]

Další možností vazebního prostředí je pryžová kulička umístěna v sondě, která umožňuje suchý kontakt mezi snímačem a zkoušenou součástí. Příkladem je ruční systém Herkules, který je určen pro ultrazvukové zkoušení bodových svarů. [34]

5. Cíle práce

Cílem experimentální části této diplomové práce je ověřit citlivost ultrazvukové kontroly pro bodové odporové svary. Tato metoda, jak již bylo zmíněné v rešeršní části, je nejvíce používanou nedestruktivní kontrolou bodových odporových svarů v automobilovém průmyslu. Možnosti ultrazvukových kontrol a jejich přesnost jsou různé a tato experimentální část práce se zabývá vybranými UT metodami, ze kterých byly výsledky získány průmyslově, ale i laboratorně.

Pro ověření citlivosti byly výsledky různých metod ultrazvukové kontroly porovnány s výsledky z výpočetní tomografie, měření průměru po destrukci svarů pomocí Chisel testu a měření průměrů svarů z metalografických výbrusů.

Podstatou experimentu byla v prvním kroku laboratorně svařit pět sad vzorků, každou s rozdílnými vstupními parametry svařování a získat reálný svařenec bodově svařovaný výrobními parametry, které se používají v automobilovém průmyslu. Laboratorně svařené sady vzorků obsahovaly 11 svarů provedených za stejných podmínek kvůli statistice. Každá sada připravených vzorků byla zkontrolována pomocí více ultrazvukových zařízení a více zkušenými kontrolory, aby se co nejvíce eliminovala chyba vlivu lidského faktoru. Získaná data bylo nutné ověřit jinými metodami kontroly, v tomto případě, jak už bylo zmíněno, bylo ověření zajištěno pomocí výpočetní tomografie většiny vzorků a ručním měřením těch zbylých. Pro metalografické výbrusy byly vybrány představitelé z každé sady svařených vzorků s cílem zobrazit nalezené vady, pokud svary z dané sady vzorků vady obsahují.

Očekávaným výstupem tohoto experimentu bylo ověřit a porovnat výsledky ultrazvukové kontroly bodových odporových svarů vůči jiným metodám, které správnost výsledků z ultrazvukové kontroly buď to potvrdí, nebo určí velikost odchylky měření rozměrů. Dále bylo klíčové ověření citlivosti na přítomnost vad bodových odporových svarů, kde je hranice detekovatelnosti metodou ultrazvukové kontroly s ohledem na velikost a typ vnitřních vad.

Motivací tohoto experimentu je potřeba porovnání výsledků UT metod s výsledky získanými počítačovou tomografií, protože komparace těchto metod nebyla v literatuře dohledatelná. Výsledky by mohly poukázat na slabiny či silné stránky UT metod a tím sloužit k určení citlivosti ultrazvukových systémů kontrolujících bodové odporové svary v průmyslu, obzvlášť v automobilových závodech.

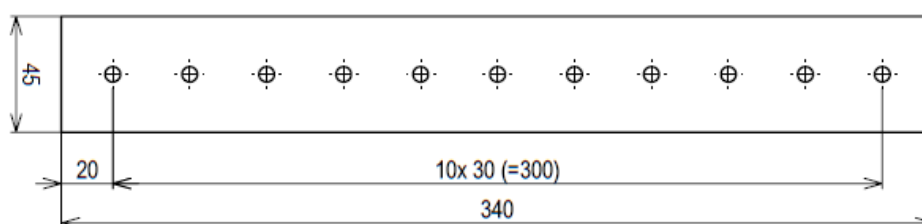
Hlavní cíle experimentální části práce:

- Naměření a zpracování dat všemi navrženými metodami
- Porovnání UT metod
- Zhodnocení citlivosti UT metod

6. Experimentální část

6.1 Návrh a podmínky experimentu

Pro svaření vzorků bylo navrženo pět různých kombinací svařovacích parametrů (proud, čas a přítlak elektrod) a stupně opotřebení vyměnitelných svařovacích hrotů tak, aby byly vyrobeny svary, které by měly být bez vnitřních vad – svařené optimalizovanými parametry (OK) a svary se záměrně vytvořenými vadami, ať už způsobené špatnými svařovacími parametry nebo stupněm opotřebení elektrod (NOK). Jako základní materiál byla zvolena vysokopevnostní ocel HX180 BD + Z100 běžně používaná v automobilovém průmyslu. Byly nastříhány výstřižky o rozměrech 340 x 45 mm z plechové tabule tloušťky 0,6 mm, které byly svařeny. Umístění svarů lze vidět na Obrázku 24.



Obrázek 24 - Schéma umístění svarů na vystřižených pásech

Pro svaření byly navrženy optimální svařovací parametry na základě zkušeností, které vycházely z normy ČSN EN ISO 14327, pro materiál HX 180 BD + Z100 o tloušťce svařovaného plechu 0,6 mm, které byly v rámci předchozích prací v laboratoři určeny. Nízké svařovací parametry byly určeny experimentálně postupným snižováním proudu na zkušebních svarech před počátkem svařování vzorků pro experiment. Vysoké svařovací parametry byly navrženy tak, aby v průběhu svařování docházelo k rozstříku kovu a ve svarech na sadě vzorků se dala očekávat dutina, kterou by bylo možné vysledovat následnými zkouškami. Pro optimální svařovací parametry byly použity tři sady svařovacích hrotů, první sada čepiček byla úplně nová, kde byla očekávána rozdílnost jednotlivých svarů kvůli dynamickým změnám v chemickém složení a topografii na kontaktní ploše elektrod. Další sada čepiček byla optimálně opotřebena, což pro tento experiment znamenalo provedení 20 svarů

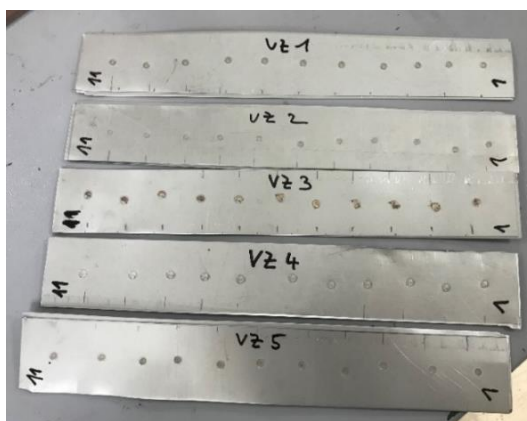
novými čepičkami mimo experiment. Poslední sada čepiček byla velmi opotřebovaná, konkrétně před zahájením experimentu bylo čepičkami provedeno 300 svarů. Označení sad vzorků a svařovací parametry se stavem svařovacích hrotů jsou popsány v Tabulce 1.

Tabulka 1 - Svařovací parametry a stav hrotů pro svařování 5 sad vzorků

Číslo sady vzorku	Svařovací parametry	Stav hrotů	I [kA]	F [kN]	t [ms]
1	Optimální	Optimální	7	2,4	240
2	Nízké	Optimální	5	2,4	240
3	Vysoké	Optimální	8	0,55	175
4	Optimální	Opotřeбенé	7	2,4	240
5	Optimální	Nové	7	2,4	240

Na svařovacím lisu Dalex umístěném v laboratořích ÚST, FS ČVUT, byly nastavovány hodnoty svařovacího proudu v procentech výkonu stroje a přitlačná síla byla nastavována jako napětí ve voltech, které určovalo tlak v pneumatickém válci. Pro přehlednost byly tyto hodnoty do Tabulky 1 přepočítány do konvenčně používaných jednotek pro tyto parametry.

V každé sadě svařené stejnými parametry bylo vytvořeno 11 svarů, každý svar byl očíslován od 1 do 11 podle pořadí, v kterém byly vytvořeny (viz. Obrázek 25). Svary byly nadále v práci označovány jako např. vzorek 3.3, kde první číslice určuje číslo sady a druhá pořadí svaru na sadě vzorků.



Obrázek 25 - Svařené sady vzorků 1 až 5

Kromě laboratorně vyrobených vzorků, byl pro experimentální část k dispozici reálný svařenec z výroby, kde svary byly provedeny parametry odladěnými výrobcem jako optimální. Na svařenci byly provedeny heterogenní spoje, kde byly spojovány kombinace hlubokotažných ocelí a pokročilých vysokopevnostních ocelí. Značení vzorků na svařenci bylo určeno výrobcem a v této práci bylo značení zachováno. Kontrolovaných vzorků bylo 23 a pro přehlednost bylo

jednotlivé značení a tloušťky svařovaných plechů zapsány do Tabulky 2. Pod označením vzorku lze z tabulky vyčíst počet svařovaných plechů a jejich tloušťka [mm].

Tabulka 2 - Značení vzorků na reálném svařenci a tloušťky svařovaných plechů

Značení vzorků na reálném svařenci a tloušťky svařovaných plechů [mm]				
101 0,9 + 1,2	107 0,9 + 1,4 + 1	116 2 + 1 + 1,2	122 2 + 1,4	129 2 + 1,4 + 1
103 0,9 + 1,2 + 1,2	110 0,9 + 1 + 1,4	117 2 + 1 + 1,2	123 2 + 1,4	130 0,9 + 1,4
104 0,9 + 1 + 1	111 0,9 + 1,4	118 1 + 2	125 2 + 1,4	135 2 + 1,4 + 1
105 1,2 + 1,2 + 0,9	112 1 + 1,2	120 2 + 1,4	127 2 + 1,4	136 2 + 1,4 + 1
106 0,9 + 1,2	113 1 + 1,2	121 2 + 1,4	128 2 + 1,4 + 1	L 2 + 1,4

6.1.1 Použité materiály

Jak již bylo zmíněno výše, zvoleným základním materiálem byla ocel HX 180 BD + Z100 patřící do skupiny vysokopevnostních ocelí, která se využívá při výrobě automobilů, a která je dle předchozích zkušeností citlivá na nastavení svařovacích parametrů. Pro experiment byla nejprve svařena sada vzorků z hlubokotažné oceli DC 05 + ZE, ale tato ocel nebyla shledána jako vyhovující pro náš experiment z důvodu nedostatečné citlivosti na správné nastavení svařovacích parametrů, protože svary obsahovaly příliš malé množství cílených vad.

Materiál HX 180 BD + Z100 je vysokopevnostní ocel s povlakem žárového zinku, ekvivalentní označení dle DIN je 1.0354. Polotovary jsou válcované za studena, ocel se může použít například jako materiál pro výtzuhy karoserií automobilů. Chemické složení a mechanické vlastnosti se můžou mírně lišit dle výrobce oceli, pro ocel použitou v experimentální části bylo chemické složení vypsáno v Tabulce 3 a mechanické vlastnosti v Tabulce 4. [35]

Přesné hodnoty chemického složení a mechanických vlastností použitého materiálu pro tento experiment nebyly relevantní, takže nebylo nutné dělat náležitě zkoušky a pro experiment byly údaje z normy vyhodnoceny jako dostačující.

Tabulka 3 - Chemické složení HX 180 BD dle normy [35]

HX 180 BD								
Prvek	C	Mn	Nb	P	Si	S	Ti	Al
Obsah [%]	0,04 – 0,1	0,7	0,09	0,06	0,5	0,025	0,12	0,02

Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti HX180 BD při 20 °C dle normy [35]

E [GPa]	A ₈₀ [%]	Rm [MPa]	Rp _{0,2} [MPa]
200 - 215	34	290 - 360	180 - 240

Svařenec dodaný z průmyslu byl svařen z více ocelí, nejzásadnější pro tuto experimentální část byla kombinace hlubokotažné oceli a UHSS (ultra-high strength steel), další zajímavostí bylo sledování ultrazvukového zkoušení na bodových svarech skrze rozhraní tří přeplátovaných plechů.

6.1.2 Použité zařízení pro svařování a analýzy

Svaření pěti sad vzorků proběhlo na středofrekvenčním odporovém lisu DALEX PMS 11-4 v laboratoři Ústavu strojírenské technologie na FS ČVUT. Lis využívá pro svařování stejnosměrný proud středních frekvencí a pro sevření svařovaných plechů pneumatický válec. Chlazení je zajištěno zařízením o výkonu 2,7 kW s uzavřeným oběhem. Díky vysoké frekvenci 1000 Hz zajištěné invertorem, lze svařovací proud rychle a přesně regulovat. Lis je řízen jednotkou a softwarem SER MEGA 2, který zaznamenává hodnoty svařovacích parametrů ke každému vytvořenému svaru. Parametry svařování byly zadávány na základě přechozích zkušeností v laboratoři a závisí zejména na svařovaném materiálu a jeho tloušťce. Nejzásadnější nastavované svařovací parametry jsou svařovací proud, čas a přítlačná síla. Lis také využívá funkci testovacích svarů, to znamená, že na třech prvních svarech, které mají nastavené target parametry si řídicí jednotka mírně svařovací proces reguluje a další svary probíhají s těmito regulovanými parametry.



Obrázek 26 - Svařovací lis DALEX PMS 11-4

Pro experiment byly použity svařovací hroty s označením 39D 1978-2 z materiálu CuCr1Zr, tedy s chemickým složením 98,98 % Cu, 0,9 % Cr a 0,12 % Zr. Tyto svařovací hroty jsou typické pro použití v automobilovém průmyslu. Průměr kontaktní části hrotu, a tedy stykové plochy je 5 mm. Pro tento experiment, jak již bylo zmíněno, byly použity tři sady elektrodových hrotů s různým stavem opotřebení, reálné fotografie jsou zobrazeny na Obrázku 27.



Obrázek 27 - Elektrodové hroty (zleva: nové, optimálně opotřebené, opotřebené)

Pro ultrazvukovou kontrolu byla použita tři zařízení. Prvním byl přístroj Matrixeye VI (Obrázek 28) od společnosti TOSHIBA, pomocí kterého byly zajištěny C-scany bodových svarů. Pro ultrazvukovou zkoušku byly použity dvě softwarové nastavení. Pro laboratorně svařené sady vzorků, tak i pro svařenec z výroby, bylo použito standardní nastavení používané v konkrétní výrobní lince. Pro svařenec z výroby bylo navíc pro porovnání použito druhé nastavení, které by mělo být citlivější pro kontrolu vysokopevnostních ocelí. Jako vazební prostředek mezi sondou a zkoušenými vzorky byl použit Imagel R03-GEL1. Zařízení je přenosné a disponuje pevným integrovaným diskem pro záznam výsledků ultrazvukové kontroly. Software automaticky vyhodnocuje svar jako OK nebo NOK, pro zjištění přesnosti měření UT sondou byl rozhodující naměřený průměr svarové čočky, který software určuje jako průměr dvou automaticky naměřených na sebe kolmých diagonál umístěných do naskenované oblasti svaru.



Obrázek 28 - Zařízení TOSHIBA Matrixeye VI

Dalším použitým zařízením pro ultrazvukovou kontrolu byl ultrazvukový přístroj Tessonics RSWA F2 (Obrázek 29) se sondou o frekvenci 15 MHz. Přístroj funguje na podobné bázi jako zařízení Matrixeye VI, s tím rozdílem, že software místo diagonál umísťuje do oblasti, kde získal echo od druhého plechu kružnici. Podle jejího průměru a změřeného vtisku vyhodnotí svar jako OK a NOK vůči předepsaným parametrům. Stejně jako u zařízení Matrixeye VI software výsledky C-scanů ukládá do databáze.



Obrázek 29 - Zařízení Tessonics RSWA F2 [36]

Posledním použitým ultrazvukovým přístrojem bylo zařízení Olympus EPOCH 650 (Obrázek 30) s přímou sondou, pomocí kterého byly získány A-scany svarů, které vyhodnotila zkušená obsluha jako OK nebo NOK. U A-scanů byla vyhodnocována naměřená tloušťka v místě spoje, kterou ultrazvukové vlny prošly a na základě zkušeností obsluhy byla vyhodnocována přítomnost vad v jednotlivých svarech.



Obrázek 30 – Zařízení Olympus EPOCH 650 [37]

Pro získání snímků a následné měření průměrů a tloušťek svarů z počítačové tomografie bylo použito zařízení umístěné v laboratoři Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na FS ČVUT v Praze. Použitým zařízením byl počítačový tomograf Zeiss Metrotom 1500 (Obrázek 31) disponující zdrojem o napětí 225 kV. Před samotným procesem prozařování bylo potřeba provést řadu přípravných kroků, jako například určení vzdálenosti součásti od zdroje záření v ose X, protože tato vzdálenost určuje kvalitu a rozlišení nasnímaného mraku bodů. Zpracování získaných dat bylo provedeno také v této laboratoři pomocí softwaru VGSTUDIO MAX, kde naskenované vzorky byly zarovnány do souřadného systému, bylo provedeno měření průměru svarové čočky, tloušťky svaru v místech vtisků elektrod a prozkoumání svarů, zda neobsahují vady.



Obrázek 31 – Počítačový tomograf Zeiss Metrotom 1500

6.1.3 Návrh experimentu v bodech

- Příprava polotovarů nastříháním stolními pákovými nůžkami
- Svaření 5 sad vzorků s různými svařovacími parametry na odporovém lisu v laboratoři
- Ultrazvuková kontrola vzorků zařízením Matrixeye VI standardním nastavením zkušeným operátorem
- Ultrazvuková kontrola vzorků zařízením Matrixeye VI nastavením pro vysokopevnostní oceli zkušeným operátorem
- Ultrazvuková kontrola vzorků zařízením RSWA F2 zkušeným operátorem
- Ultrazvuková kontrola vzorků zařízením Epoch 650 zkušeným operátorem
- Návrh a 3D tisk držáků do výpočetního tomografu METROTOM 1500
- Ořezání vybraných svarů do držáků na metalografické pile

- Naskenování vzorků výpočetním tomografem METROTOM 1500
- Zpracování získaných snímků softwarem VGSTUDIO MAX
- Destrukce vzorků, které nebyly zpracovány výpočetní tomografií, pomocí Chisel testu
- Měření průměru svarů posuvným měřítkem
- Tvorba metalografických výbrusů vybraných vzorků
- Vytvoření snímků metalografických výbrusů na optickém mikroskopu
- Zpracování získaných dat

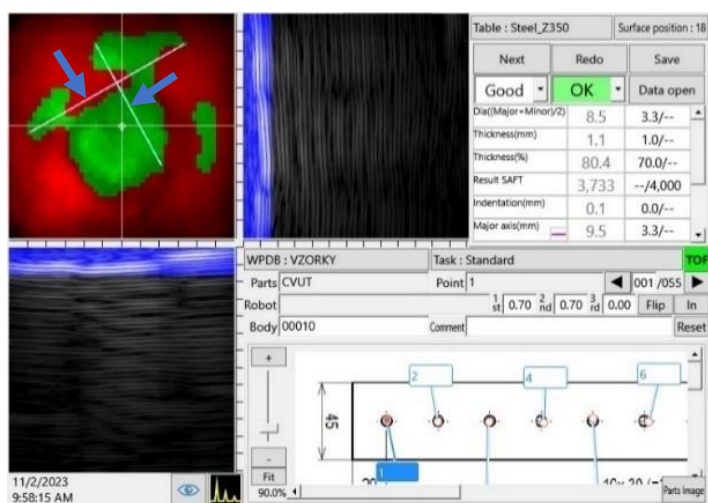
6.2 Ultrazvuková kontrola zařízením Matrixeye VI (C-scan)

Zařízením Matrixeye VI byl každý vzorek zkontrolován dvakrát a na reálném svařenci bylo ozkoušeno nové nastavení pro vysokopevnostní oceli, kterým byla součástí také zkontrolována dvakrát. Přístroj byl ovládán vždy stejnou obsluhou, aby došlo k co nejmenšímu zanesení chyby vlivem lidského faktoru. Při zkoušení ultrazvukem byla sonda vždy stejně natočena, aby byly výsledky co nejlépe porovnatelné.

Na každý svar byl nanesen gel sloužící jako vazební prostředí a poté přiložila sonda. Software ultrazvukového přístroje automaticky vyhodnocoval svary na základě průměru, který vypočítával jako aritmetický průměr dvou naměřených na sebe kolmých diagonál. Další rozměr, který software kontroloval a pomocí něho vyhodnocoval svary byla tloušťka svaru. Posledním vyhodnocovacím údajem byla hodnota SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) na jejímž základě software vyhodnocoval provaření svaru a zda se nejednalo o studený spoj. Konečné zhodnocení svaru prováděl software také automaticky, v této diplomové práci byly vzorky vyhodnoceny jako GOOD (vyhovující svar), SMALL (nevyhovující svar s malým průměrem čočky) a STICK (nevyhovující svar kvůli nedostatečnému provaření).

Z výsledků bylo na první pohled patrné, že se velmi často lišil průměr svaru z první a druhé kontroly ultrazvukem stejného vzorku. Při pohledu na Obrázek 32 bylo patrné, proč docházelo k tak zásadním rozdílům v měření. Ultrazvukové vlny prošly skrze oblast v okolí svaru, kde nemohl existovat homogenní spoj, ale software tyto oblasti přiřadil ke svarové čočce a umístil diagonály (označeny modrými šipkami na Obrázku 32) i do těchto oblastí. Tím došlo k nadhodnocení průměru svarové čočky. Zobrazená okolní oblast mohla mít více příčin, jednou z možností mohl být rozstřík kovu v blízkosti svarové čočky. Oproti tomu, měření

tloušťky svaru bylo velmi přesné a shodovalo se mezi prvním a druhým měřením u každého kontrolovaného vzorku s maximální odchylkou 0,1 mm.



Obrázek 32 – Druhá kontrola vzorku 1.1 na Matrixeye VI

Nejmenší možný průměr svaru, a tedy limitní průměr, byl stanoven jako $\varnothing d = 4\sqrt{t_{pl}}$. Tloušťka musela být větší než 1 mm, tudíž maximální vtisk elektrod byl stanoven jako 0,2 mm. Limitní hodnota parametru SAFT byla stanovena podle zkušeností obsluhy na 4000, tedy pokud parametr při měření vyšel větší, byl vzorek vyhodnocen jako STICK, tedy jako nedostatečně provařený.

Naměřená data ze zařízení Matrixeye VI byla zanesena do tabulek jako zobrazuje Tabulka 5. Kvůli velkému množství dat a zachování přehlednosti práce, byly tabulky s kompletními naměřenými daty umístěny do Přílohy 1.

Tabulka 5 - Naměřená data Matrixeye VI: Sada 1 (optimální parametry, optimální hroty)

Matrixeye VI Standardní nastavení - Sada 1						
	Zkoušení č.1			Zkoušení č.2		
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
1.1	10,1	1,2	Good	8,5	1,1	Good
1.2	5,2	1,1	Good	6,8	1,1	Good
1.3	9,5	1,1	Good	7,7	1,1	Good
1.4	7,5	1,1	Good	6,6	1,1	Good
1.5	6,7	1,1	Good	6,6	1,1	Good
1.6	5,4	1,1	Good	8,3	1,1	Good
1.7	7,7	1,1	Good	7,3	1,1	Good
1.8	7,4	1,1	Good	8,4	1,1	Good
1.9	5,6	1,1	Good	10,3	1,2	Good
1.10	5,8	1,1	Good	6,2	1,1	Good
1.11	8,2	1,1	Good	7,8	1,1	Good

U všech vzorků svařovaných na fakultě ČVUT byl vyzorován stejný fenomén různých naměřených průměrů svarových čoček mezi prvním a druhým zkoušením, to mohlo být způsobeno více faktory, jedním z nich mohla být povrchová úprava zinkem svařovaných plechů, která se při svařování v okolí spojila a pro ultrazvuk působila jako spoj, který ultrazvuk nevyhodnotil vždy stejně. Dalším důvodem mohla být nesymetričnost svarů a záměrně vytvořené vady, které do nich zasahovaly. Sada 1 byla softwarem vyhodnocena jako vyhovující při první i druhé kontrole. U sady 2 při první kontrole bylo vyhodnoceno prvních 7 vzorků jako nevyhovující, kde první byl vyhodnocen jako SMALL a ostatní jako STICK, další čtyři vzorky byly vyhodnoceny jako GOOD. Při druhé kontrole bylo potvrzeno 6 vzorků jako nevyhovující, ale jeden vzorek, který v předchozí kontrole byl vyhodnocen jako nevyhovující touto kontrolou prošel. Sada 3 při první kontrole podle softwaru obsahovala tři vzorky označené jako STICK, ale druhé zkoušení to nepotvrdilo a dle softwaru byly všechny vzorky vyhovující. U sady 4 byl vyhodnocen pouze vzorek 4.11 jako STICK, což potvrdila i druhá kontrola. Sada 5 byla vyhodnocena první i druhou kontrolou jako vyhovující.

Hodnoty průměrů naměřené prvním a druhým zkoušením na reálném svařenci se také lišily, ale rozdíly nebyly tak markantní jako u sad vzorků svařovaných na fakultě ČVUT. To bylo bezpochyby způsobeno lepším odladěním procesu svařování. Na tomto svařenci byly softwarem všechny svary vyhodnoceny jako GOOD. Při porovnání dvou použitých nastavení byl vidět zásadní rozdíl v odlišnosti naměřených průměrů při prvním a druhém zkoušení. U standardního nastavení byl průměrný rozdíl mezi prvním a druhým měřením průměru 0,7 mm, ale u nastavení pro vysokopevnostní materiály pouze 0,4 mm. Z tohoto faktu vyplývá, že byla data velikostí průměrů naměřená nastavením pro vysokopevnostní materiály opakovatelnější. Tloušťka svaru byla vyhodnocována stejně jako u předchozích vzorků velmi přesně, s maximální odchylkou mezi prvním a druhým zkoušením 0,1 mm.

6.3 Ultrazvuková kontrola zařízením RSWA F2 (C-scan)

Zařízením RSWA F2 byl každý vzorek zkontrolován jednou. U sady 2 došlo ke kontrole pouze vzorků 2.8 až 2.11, protože ostatní vzorky, které byly záměrně svařeny s malým průvarem, byly poničeny při přepravě, a tudíž je nebylo možné podrobit ultrazvukové zkoušce. U reálného svařence na vzorcích 116, 117 a 136 se nepodařilo změřit tloušťku svarů z důvodů různého naklonění horního a spodního plechu. Přístroj byl ovládán stále stejnou obsluhou, aby došlo k co nejmenšímu zanesení chyby vlivem lidského faktoru. Stejně jako u kontroly zařízením Matrixeye VI byla sonda vždy stejně natočena.

Vzorky byly opětovně kontrolovány přiložením sondy obsluhou, která spustila proces kontroly a poté byly vyhodnocovány automaticky pomocí přidruženého softwaru, který je zhodnotil na základě naměřeného průměru kružnice do naskenované oblasti svaru. Vzorky byly poté hodnoceny jako OK (vyhovující svar) nebo NOK (nevyhovující svar). Software také měřil tloušťku svaru, velikost vtisku a tloušťku prvního plechu, na kterém byla přiložena sonda. V rámci experimentu byly pro porovnání s dalšími metodami sledovány pouze dva parametry, a to průměry svarových čoček a tloušťky svarů jako je tomu v Tabulce 6 pro sadu 1.

Při porovnání výsledků z ultrazvukové kontroly zařízením Matrixeye VI a RSWA F2 bylo patrné, že výsledné hodnoty průměrů naměřených zařízením RSWA F2 byly u stejných svarů zásadně menší, než tomu bylo u zařízení Matrixeye VI. Důvodem tohoto rozdílu byla rozdílná citlivost nastavení ultrazvukového přístroje a způsob vyhodnocování průměru softwarem. Naopak při pohledu na výsledky měření tloušťky svarů byly rozdíly ve většině případů minimální a pohybovaly se v řádu desetin milimetru. Způsob, jakým software svary vyhodnocuje je vidět na Obrázku 33.



Obrázek 33 – Kontrola vzorku 1.1 na RSWA F2

Obsluha ze zkušeností nastavila v softwaru podmínku $\varnothing d = 3,5\sqrt{t}$. Pro to, aby bylo možné výsledky mezi přístroji porovnávat, byl minimální průměr, podle kterého se vyhodnocuje v Tabulce 6 a v Příloze 2, stanoven ze vzorce $\varnothing d = 4\sqrt{t}$.

Naměřené hodnoty k ostatním vzorkům byly stejně jako v případě ultrazvukového zkoušení zařízením Matrixeye VI umístěny do Přílohy 2.

Tabulka 6 - Naměřená data RSWA F2: Sada 1 (Optimální parametry, optimální hroty)

RSWA F2 - Sada 1			
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
1.1	4,4	1,07	OK
1.2	3,39	1,11	OK
1.3	3,74	1,07	OK
1.4	3,95	1,1	OK
1.5	3,65	1,09	OK
1.6	3,01	1,1	OK
1.7	3,65	1,11	OK
1.8	3,09	1,11	OK
1.9	5,18	1,11	OK
1.10	4,56	1,13	OK
1.11	4,49	1,11	OK

Jak lze vidět v Tabulce 6, všechny vzorky na sadě 1 byly vyhodnoceny jako OK, což se shoduje s vyhodnocením pomocí zařízení Matrixeye VI. Pro sadu 2 nebylo možné data přesně porovnat, kvůli poškození sady vzorků během přepravy. Software vyhodnotil vzorky 2.8 až 2.11 jako nevyhovující z důvodu malého naměřeného průměru svarové čočky, všechny tyto vzorky byly zařízením Matrixeye označeny jako vyhovující. Na sadě 3 byly všechny vzorky kromě vzorků 3.2, 3.3, 3.9 a 3.10 označeny jako NOK. Všechny vzorky na sadě 4 byly vyhodnoceny jako NOK pro malý průměr svarové čočky, zařízením Matrixeye byl vyhodnocen jako nevyhovující pouze vzorek 4.11. Vzorky na sadě 5 (kromě vzorku 5.10) byly všechny vyhodnoceny OK, což se shoduje se zkoušením zařízením Matrixeye VI. Na reálném svařenci byly vzorky 123, 125 a 127 vyhodnoceny jako NOK pro malý průměr svarové čočky.

6.4 Ultrazvuková kontrola zařízení EPOCH 650 (A-scan)

Každý vzorek byl dále zkontrolován zařízením EPOCH 650, u kterého byl zásadní rozdíl ve vyhodnocení scanů v tom, že již neprobíhal za pomoci softwaru, ale probíhal na základě vyhodnocení echogramů podle zkušeností obsluhy zařízení. Vzorky byly obsluhou zařízení vyhodnoceny na základě získaných A-scanů jako OK (vyhovující svar) nebo NOK (nevyhovující svar). Na základě získaných A-scanů byla naměřena tloušťka svaru, u svarů s velmi malou čočkou (studené spoje nebo nedostatečný průvar) to nebylo možné kvůli nedostatečnému echu. Na základě zkušeností obsluhy byly ve svarech nalezeny vady jako póry, malá svarová čočka, malý průměr svarové čočky, dutina ve svaru a natavená vrstva zinku (navářená vrstva zinku, základní materiál není spojen). Měření tloušťky svarů se ukázalo jako velice přesné,

stejně jak tomu bylo u předchozích zařízení. V porovnání se zařízeními Matriceye VI a RSWA F2, tedy zařízeními, které používají software, který svary vyhodnocuje automaticky, bylo použití techniky A-scan a zkoušení zařízením EPOCH 650 zásadně složitější a interpretace výsledků velmi závisela na zkušenostech obsluhy.

Výsledky byly zaneseny do Tabulky 7 a 8. Obsluha ultrazvukového přístroje vyhodnotila vzorky jako NOK nebo pro příliš malý průměr (MP), ty byly vyhodnoceny jako nevyhovující a v tabulce byly označeny červenou barvou. Vzorky, které byly vyhovující, a tedy označeny jako OK byly v tabulce označeny zeleně. Vzorky s nalezenými vadami, které ale nemusely znamenat nevyhovující svar, byly označeny oranžovou barvou. Ve svarech byly nalezeny póry, příliš malé svarové čočky (MČ), dutiny ve svaru (Dut) a natavené vrstvy zinku (Zn).

Tabulka 7 - Naměřená data EPOCH 650: Sady 1 (optimální parametry, optimální hroty), 2 (nízké parametry, optimální hroty), 3 (vysoké parametry, optimální hroty), 4 (optimální parametry, opotřebené hroty) a 5 (optimální parametry, nové hroty)

EPOCH 650 - Sada 1, 2, 3, 4 a 5 (vyhodnocení, pod vyhodnocením tloušťka svaru [mm])												
		Pořadí svaru										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sada	1	OK	OK	Pór	Mč	OK	Pór	OK	OK	OK	OK	OK
		1,07	1,07	1,07	1,08	1,07	1,09	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09
	2	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	MP	MP	MP
		0,57	0,57	0,57	0,57	0,52	0,52	0,57	0,57	-	1,12	-
	3	OK	NOK	NOK	NOK	OK	OK	Pór	OK	OK	OK	OK
		1,15	1,13	1,15	1,13	1,13	1,13	1,14	1,14	1,12	1,09	1,10
	4	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	Dut	NOK	NOK	NOK
		-	-	-	-	-	-	-	1,14	-	-	-
	5	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	MP	OK
		1,08	1,10	1,10	1,08	1,10	1,10	1,11	1,10	1,10	-	1,10

Tabulka 8 - Naměřená data EPOCH 650: Reálný svařenec

EPOCH 650 – Reálný svařenec				
Číslo vzorku - hodnocení, tloušťka svaru [mm]				
101	103	104	105	106
OK 3,06	OK 3,10	OK 2,80	OK 3,01	OK 2,01
107	110	111	112	113
OK 3,12	OK 3,20	Zn 2,18	OK 2,09	OK 2,09
116	117	118	120	121
OK 4,03	OK 3,86	OK 3,00	Mč 3,17	OK 3,20
122	123	125	127	128
OK 3,20	Zn 3,40	Zn 3,45	OK 2,77	OK 4,03
129	130	135	136	L
OK 3,99	OK 2,18	OK 3,66	OK 3,91	OK 2,95

U sady 1 byly vzorky 1.3 a 1.6 označeny pro obsah pórů a vzorek 1.4 pro malou čočku, ostatní vzorky byly označeny jako vyhovující. Všechny vzorky na sadě 2 byly hodnoceny jako nevyhovující, konkrétně u vzorků 2.1 až 2.8 byla naměřena malá tloušťka svaru, čímž se potvrdila existence studeného spoje, protože se ultrazvukový paprsek odrazil již od spodní strany prvního plechu. Vzorky 3.2, 3.3 a 3.4 byly hodnoceny jako nevyhovující a vzorek 3.7 obsahoval póry. Všechny vzorky na sadě 4 kromě vzorku 4.8 byly označeny jako NOK, ve vzorku 4.8 byla nalezena dutina. Vzorek 5.10 byl označen jako nevyhovující kvůli malému průměru svarové čočky, to by potvrzovalo zkoušení zařízením RSWA F2, kde byl vzorek vyhodnocen jako vyhovující, ale byl u něj naměřen nejmenší průměr svarové čočky z této sady. Ostatní vzorky na sadě 5 byly označeny jako OK.

U reálného svařence byla u vzorků 111, 123 a 125 nalezena natavená vrstva zinku a vzorek 120 byl označen kvůli příliš malé svarové čočce. Ostatní vzorky na tomto svařenci byly vyhodnoceny jako OK.

Pro konečný přehled použitých ultrazvukových zařízení a pro porozumění, do kterých technik nejvíce vstupuje vliv lidského faktoru byla vytvořena Tabulka 9.

Tabulka 9 - Přehled použitých UT zařízení – technika UT, ovládání, způsob vyhodnocení

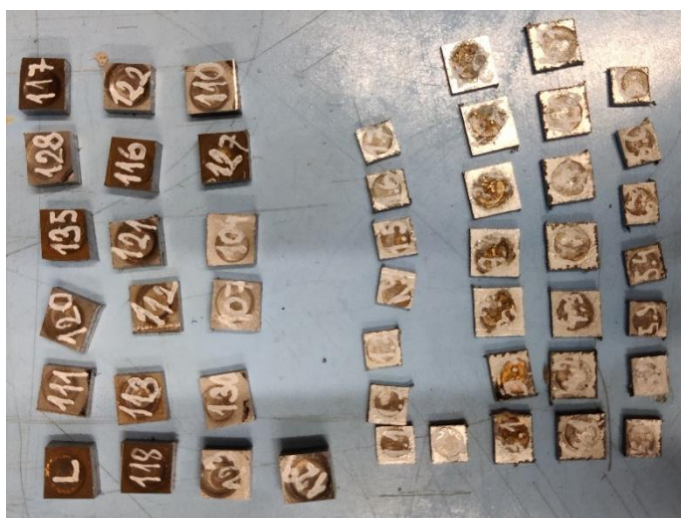
	UT zařízení		
	Matrixeye VI	RSWA F2	EPOCH 650
Technika UT	C-scan	C-scan	A-scan
Ovládání sondy	Člověk	Člověk	Člověk
Vyhodnocení UT	Software	Software	Člověk

6.5 Kontrola pomocí CT

Pro výpočetní tomografii byla vybrána většina vzorků z každé sady, část vzorků nebyla výpočetní tomografií zpracována kvůli ponechání pro destruktivní zkoušení, protože vzorky na CT musely být oříznuty na nejbližší těsné okolí svaru. Cílem skenování pomocí CT bylo prozkoumat vzorky, zda obsahovaly vady, změřit průměr svarových čoček a tloušťky svarů. Skenování bylo provedeno na průmyslovém počítačovém tomografu Zeiss Metrotom 1500 a vyhodnocení v softwaru VGSTUDIO MAX.

Vzorky byly ze sad vyřezány na metalografické pile v laboratoři na Ústavu strojírenské technologie na FS ČVUT. Cíleným rozměrem vyřezaných vzorků byl formát čtverce o rozměrech 7x7 mm nebo 9x9 mm, podle velikosti svaru. Při vyřezávání vzorků byl brán

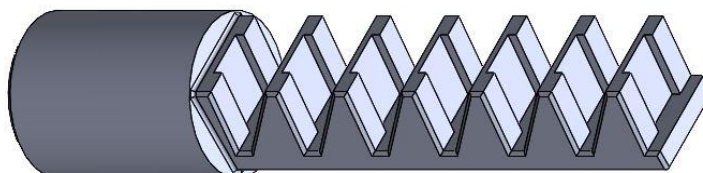
především ohled na to, aby nedošlo k porušení svaru. Obrázek 34 zobrazuje vyřezané čtvercové vzorky a systém popisování, díky kterému nebyly vzorky pomíchány.



Obrázek 34 - Vyřezané vzorky ze sad pro CT

6.5.1 Návrh a tisk držáku do CT

Z důvodu časové náročnosti skenování jednoho vzorku na CT, byl hledán způsob, jak skenovat více vzorků najednou. Byl navržen speciální držák na míru pro skenování až sedmi vzorků najednou. Výška držáku byla omezena pracovním prostorem skenovacího zařízení. Protože se díly do CT upínají do přípravku se sklíčidlem, musela být spodní upínací část držáku válcová o minimální délce 30 mm. Na základě předchozích zkušeností bylo pro kvalitu skenu důležité dodržet náklon vzorků 5° vůči rovině zakládání a dodržet minimálně 5 mm mezeru mezi jednotlivými vzorky, aby nedošlo k překrytí při skenování. Vzorky se během skenování nesměly pohnout, protože se při skenování otáčely kolem osy držáku, tudíž během rotace musely v držáku mít pevnou pozici.



Obrázek 35 - CAD model držáku vzorků do CT

Model držáku zobrazený na Obrázku 35 byl navržen v CAD softwaru Solidworks. Do návrhu byly zahrnuty všechny požadavky uvedené výše. Vzhledem k tomu, že ne všechny

vzorky se podařilo vyříznout přesně na požadovaný rozměr a vzorky v držáku musely pevně držet pozici, bylo vymodelováno sedm držáku, kde šířka lůžka byla o 0,1 mm menší než šířka vzorku, který do něj patřil.

Držáky byly vyrobeny na 3D tiskárně Průša I3 MK3S+ technologií FDM. Po očištění držáků byly vzorky usazeny do stanovených lůžek, jak lze vidět na Obrázku 36.

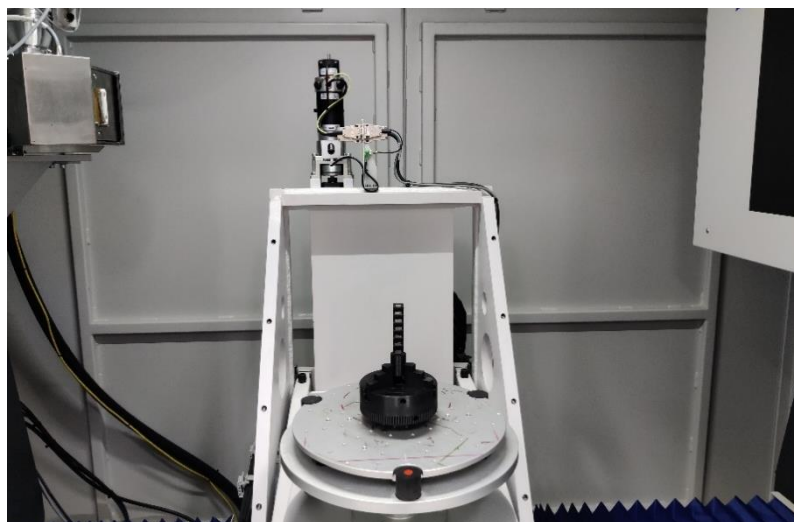


Obrázek 36 - Usazení vzorků ve vytisknutých držácích

6.5.2 Skenování v Metrotom 1500

Po ozkoušení skenování sedmi vzorků najednou byla kvalita snímků vyhodnocena jako nedostačující a byla určena strategie skenování jednoho držáku na dva snímky. Skenování bylo ovládáno softwarem Metrotom OS 3.6.2.19227 s navolenými parametry CT: napětí 224 kV, proud 121 μ A, integration time 100 ms, zvětšení 8x a vzdálenost v ose X od zdroje 150 mm.

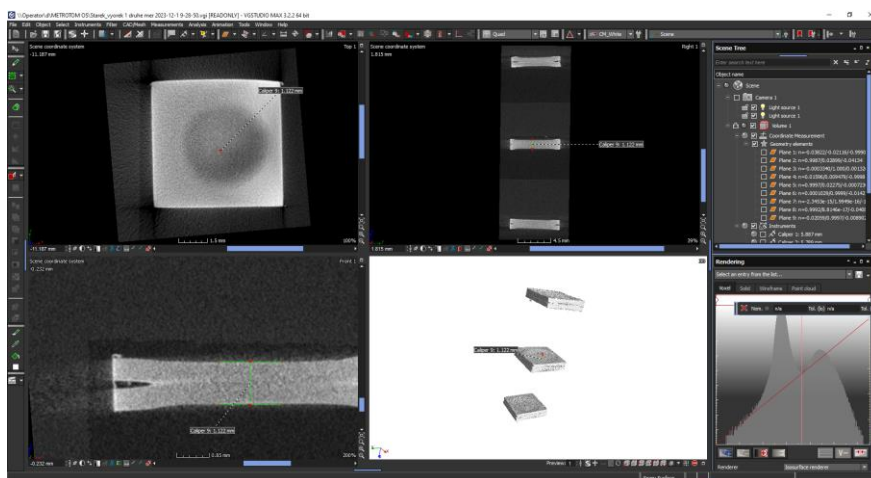
Po nastavení vstupních parametrů byl držák se vzorky umístěn do základací desky a upnut pomocí sklíčidla. Po nastavení polohy vzorků v tomografu a omezení zóny skenování v softwaru pouze na oblast držáku byl spuštěn skenovací příkaz New vast measurement. Snímky byly automaticky uloženy na disk a pro spuštění skenování druhé poloviny vzorků byl stůl posunut nahoru v ose Z do oblasti skenování, takto probíhal postup skenování všech vzorků. Založení držáku do tomografu je vidět na Obrázku 37.



Obrázek 37 - Založení vzorků v držáku do CT

6.5.3 Vyhodnocení snímků ve VGSTUDIO MAX

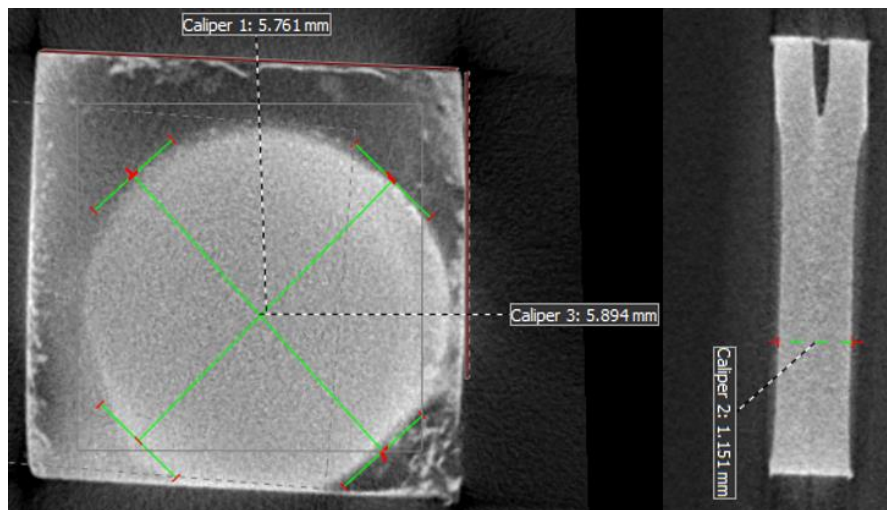
Snímky získané počítačovou tomografií byly vyhodnoceny v softwaru VGSTUDIO MAX 3.2.2. Surová data byla nejdříve potřeba profiltrovat funkcí Surface determination, zde bylo potřeba umístit červenou přímku, která definovala materiál, mezi dva píky. Po filtraci bodů byly na každém vzorku umístěny tři roviny pro definici souřadného systému, to bylo nutné provést pro každý vzorek zvlášť, aby měření bylo co nej přesnější. Následné vyrovnaní proběhlo pomocí funkce 3-2-1 registration, do které byly zadány vytvořené roviny. Pro optimální zobrazení byla zvolena kombinace kontrastu: Level 40 000 a Window 35 000. Po provedení těchto kroků byly upravené snímky připraveny pro softwarové vyhodnocení jako je tomu na Obrázku 38.



Obrázek 38 - Zobrazení profiltrovaných dat ve VGSTUDIO MAX

Vzorky byly poté analyzovány posouváním rovin tak, aby byl zobrazen průřez svarem. Pokud byla ve vzorku nalezena vada, byl pořízen snímek. Pro změření průměru svarové čocky

byla horní rovina posunuta mezi svařené plechy a svarová čočka byla změřena pomocí funkce Caliper. Tloušťka svaru byla změřena stejnou funkcí a průřez vzorku byl zobrazen posunutím boční roviny. Obrázek 39 zobrazuje měření průměru svarové čočky a tloušťky svaru pro svar 1.1.



Obrázek 39 - Měření průměru a tloušťky vzorku 1.1 funkcí Caliper

6.5.4 Vyhodnocení snímků a naměřené hodnoty z CT

Naměřená data byla znovu zanesena do tabulek, které pro přehlednost práce byly umístěny do Přílohy 3. Jak jde vidět na Obrázku 39, průměr byl měřen ve dvou na sebe kolmých směrech, z naměřených hodnot byl vypočítán aritmetický průměr a ten byl zapsán jako výsledek měření průměru v tabulce. Tabulka 10 zobrazuje způsob zapsání dat pro sadu 1.

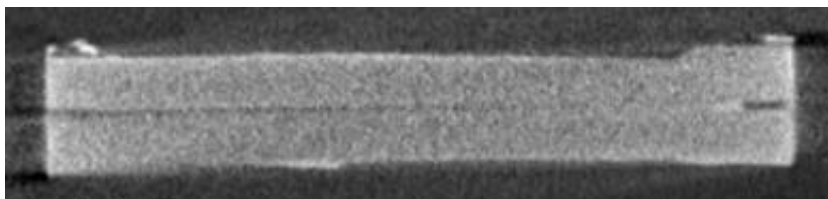
Tabulka 10 – Naměřená data Metrotom 1500: Sada 1
(Optimální parametry, optimální hroty)

Metrotom 1500 - Sada 1		
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]
1.1	5,83	1,15
1.2	5,98	1,15
1.3	5,77	1,13
1.4	5,73	1,11
1.5	5,84	1,14
1.6	5,74	1,12
1.7	5,82	1,12

U sady 2 byl pořízen snímek pouze vzorku 2.11, ostatní vzorky byly poničeny buď při přepravě nebo při vyřezávání metalografickou pilou, to definitivně potvrdilo vadu studeného spoje u vzorků na této sadě. U vzorků 127, 130 a 135 nebylo možné naměřit průměr svarové

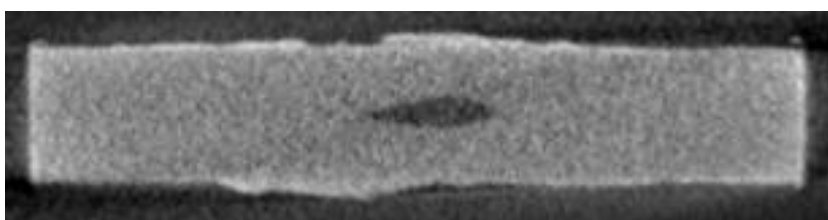
čočky, protože se v blízkosti svarů nacházely výrazné prolisy plechů, kvůli kterým nebylo možné provést vyrovnání.

U sad 2 a 4 byl nalezen studený spoj, konkrétně u vzorků 2.11, 4.2, 4.5 a 4.6. Reprezentativní zástupce je zobrazen na Obrázku 40, kde jde vidět nespojené rozhraní mezi svařovanými plechy.



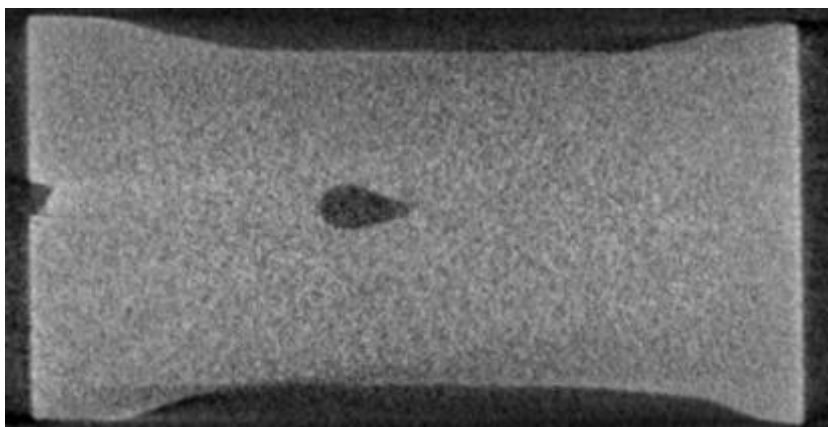
Obrázek 40 - CT vzorku 4.5: Studený spoj

Všechny skenované vzorky ze sady 3 obsahovaly ve středu svaru dutinu. Tento jev byl bezesporu zapříčiněn příliš vysokými parametry svařování, díky kterým bylo umožněno rozstříku kovu. Charakteristický zástupce je zobrazen na Obrázku 41.



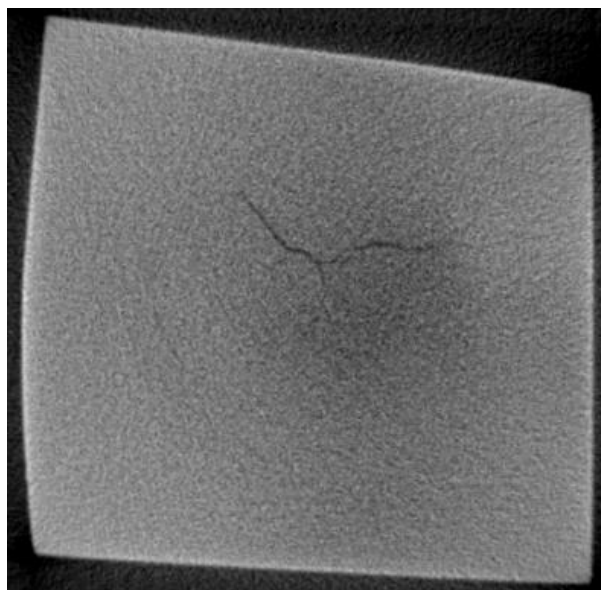
Obrázek 41 - CT vzorku 3.1: Dutina

Vzorky 116, 117, 120, 121, 122, 127, 128, 129 a 130 na reálném svařenci obsahovaly také dutiny. Na Obrázku 42 je vybrána ukázka typického zástupce této vady na vzorku 128.



Obrázek 42 - CT vzorku 128: Dutina

Vzorek 135 obsahoval povrchovou trhlinu, ta je zobrazena na Obrázku 43. Vznik trhlin u bodových odporových svarů byl popsán v rešeršní části.



Obrázek 43 - CT vzorku 135: Povrchová trhлина

6.6 Ruční měření průměrů svarových čoček

K oddělení plechů byla použita metoda Chisel test, kde bylo použito pneumatické zařízení, které je zobrazeno na Obrázku 44. Cílem bylo svar vyloupnout a ručně změřit jeho průměr (u těch co nebyly v CT).



Obrázek 44 - Pneumatické kladivo pro chisel test

Po oddělení plechů byly průměry svarů změřeny posuvným měřítkem ve dvou na sebe kolmých směrech. Ze dvou naměřených hodnot byl vypočítán aritmetický průměr. Výsledky byly zaneseny do Tabulky 11.

Vzorky ze sad 2 a 4 obsahovaly, jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, studený spoj a byly nedostatečně provařeny, tudíž průměry svarových čoček nebylo možné posuvným měřítkem naměřit. U vzorků ze sady 3 byla potvrzena asymetrie svaru, která byla vidět i ze snímků z počítačové tomografie.

Tabulka 11 - Naměřená data ručním měřením

Měření posuvným měřítkem			
Číslo vzorku	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d [mm]
1.8	5,7	5,6	5,65
1.9	5,3	5,9	5,6
1.10	5,6	5,8	5,7
1.11	5,7	5,5	5,6
3.8	6,7	4,8	5,75
3.9	6,4	5,0	5,7
3.10	6,4	4,3	5,35
3.11	6,2	4,4	5,3
5.8	4,9	5,0	4,95
5.9	5,2	4,8	5
5.10	5,0	5,4	5,2
5.11	4,2	4,4	4,3
101	5,9	5,8	5,85
103	5,5	5,2	5,35
105	5,1	5,6	5,35

6.7 Metalografie

Metalografická zkouška byla zařazena jako doplňující metoda k vizualizaci vad vybraných vzorků, které byly zkoumány počítačovou tomografií. Metalografické výbrusy byly vytvořeny ve středu svarové čocky. Po tvorbě metalografických výbrusů byly pořízeny snímky na optickém mikroskopu, na snímcích byl orientačně změřen průměr svarové čocky, který byl pouze informativní, protože nejde přes všechnu snahu s definitivní jistotou tvrdit, že bylo broušení a následné leštění provedeno přesně do středu čocky.

Vzhledem k malým rozměrům vzorků je nebylo možné dělit na metalografické pile, takže byly vzorky zataveny do pryskyřice a postupně odbroušeny do středu svaru. Následně byly vzorky broušeny jemnějšími brusnými papíry, leštěny a leptány pro zviditelnění struktury.

Pro metalografii bylo vybráno 18 vzorků s tím, že z každé sady vzorků byl zpracován minimálně jeden vzorek. Nejčastěji zobrazenou vadou byly dutiny a převýšení svaru, které se projevilo zejména u svarů ze sady 3 s vysokými parametry svařování, dutina ve vzorku 3.1 je zobrazena na Obrázku 45.



Obrázek 45 – Snímek metalografického výbrusu vzorku 3.1: Dutina, převýšení svaru

Na Obrázku 46 jde vidět studený spoj vzorku 4.5. Studený spoj byl nalezen u všech vzorků ze sad 2 a 4, na kterých byla udělána metalografická zkouška.



Obrázek 46 - Snímek metalografického výbrusu vzorku 4.5: Studený spoj

U vzorku 135 je vidět povrchová trhлина, která byla vidět i na snímku z počítačové tomografie, pořízený snímek a detail trhliny jsou zobrazeny na Obrázku 47.



Obrázek 47 - Snímek metalografického výbrusu vzorku 135: Trhлина a její detail

7. Vyhodnocení a diskuze

Jak již bylo pospáno, reálný svařenec byl zařízením Matrixeye zkontrolován dvěma různými nastaveními. Pro zhodnocení přesnosti jednotlivých nastavení byla spočítána průměrná odchylka mezi první a druhým měřením průměrů svarových čoček pro každé nastavení a průměrná odchylka každého měření vůči průměrům naměřených počítačovou tomografií a ručním měřením.

Průměrný rozdíl mezi měřeními průměrů na reálném svařenci u standardního nastavení byl 11,5 % a u nastavení pro vysokopevnostní oceli byl 6,7 %, což potvrzuje tvrzení z kapitoly 5.3, že je měření průměru při zkoušení nastavením pro vysokopevnostní oceli opakovatelnější. Průměrná odchylka byla vypočítána pouze ze vzorků, u kterých byl změřen průměr oběma nastaveními a CT nebo ručním měřením. Po vypočtení aritmetického průměru pro odchylku z prvního a druhého měření UT, vyšla průměrná odchylka průměru naměřeného standardním nastavením od CT/ruční měření 21,9 % a u nastavení pro vysokopevnostní oceli 17 %.

Z těchto výsledků se dá usoudit, že nastavení pro vysokopevnostní oceli bylo pro kontrolu reálného svařence přesnější a citlivější. Porovnání podle měření tloušťky svaru nešlo provést, protože obě nastavení byly velmi přesné a rozdíly se pohybovaly v řádek desetin milimetru.

Pro každou sadu byla vytvořena tabulka (umístěné v Příloze 4), kde byly zobrazeny všechny naměřené průměry jednotlivými metodami a pro UT EPOCH bylo uvedeno hodnocení svaru. V Tabulce 12 byly zobrazeny naměřené průměry u sady 1, kompletní data byly umístěny do Přílohy 4. Průměr naměřený na metalografickém výbrusu byl do tabulky zanesen pouze informativně, protože hodnota není vhodná pro porovnání z důvodů psaných výše.

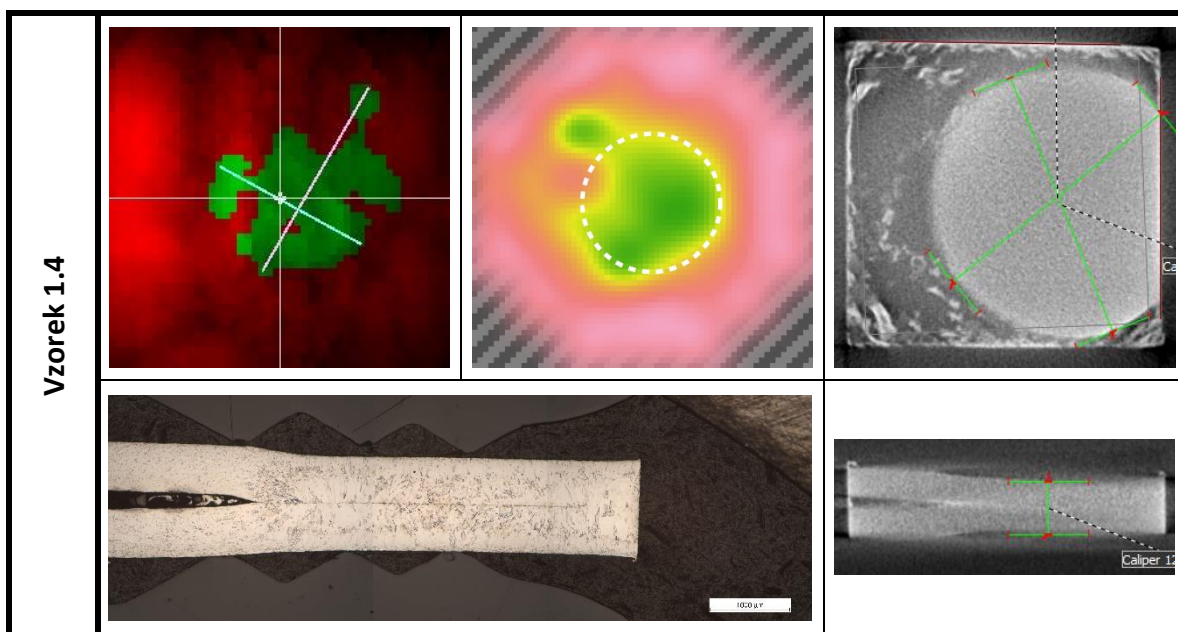
Tabulka 12 - Naměřené průměry pro sadu 1 (optimální parametry, optimální hroty)

Číslo vzorku	UT1 Matrixeye C-scan	UT2 Matrixeye C-scan	UT RSWA C-scan	UT EPOCH A-scan	CT	Ruční měření	Metalografie
1.1	10,1	8,5	4,4	OK	5,83	-	-
1.2	5,2	6,8	3,39	OK	5,98	-	-
1.3	9,5	7,7	3,74	Pór	5,77	-	-
1.4	7,5	6,6	3,95	MČ	5,73	-	-
1.5	6,7	6,6	3,65	OK	5,84	-	5,69
1.6	5,4	8,3	3,01	Pór	5,74	-	-
1.7	7,7	7,3	3,65	OK	5,82	-	-
1.8	7,4	8,4	3,09	OK	-	5,65	-
1.9	5,6	10,3	5,18	OK	-	5,6	-
1.10	5,8	6,2	4,56	OK	-	5,7	-
1.11	8,2	7,8	4,49	OK	-	5,6	-

- Zkratka OK (vyhovující svar), zkratka MČ (malá svarová čočka).

Průměry získané C-scany zařízením Matrixeye byly značně nadhodnocené, to lze tvrdit na základě porovnání naměřených hodnot z CT a ručního měření oproti průměrům jak z prvního, tak z druhého zkoušení tímto zařízením. Při pohledu na Obrázek 48 (první vlevo nahoře) lze vidět, že diagonály měřící průměr svaru byly softwarem umístěny do okolí svaru, kde nebyl homogenní spoj, což potvrzuje snímek z CT na stejném obrázku (třetí zleva nahoře).

Výsledky získané C-scany zařízením RSWA potvrdily přesný opak, a to, že došlo k podhodnocení průměru, a tedy k většímu riziku, že dobrý svar byl zhodnocen softwarem jako nevyhovující. Získaná data z tohoto zařízení byla značně konstantnější a lze tvrdit, že podhodnocení průměrů bylo způsobeno buď způsobem vyhodnocování průměrů, jakým software vkládá kružnici do oblasti, kterou prošel ultrazvuk celým svarem jako na Obrázku 48 (druhý zleva nahoře) nebo nastavením ultrazvukového přístroje.



Obrázek 48 - Vzorek 1.4 (optimální parametry, optimální hroty) - UT, CT, metalografie

Výsledky A-scanů získané zařízením EPOCH 650 nelze porovnat jako výsledky ostatních metod. Zhodnocení vzorků závisí na zkušenostech obsluhy a metoda není automatizovatelná do sériové výroby. U sady 1 obsluha vyhodnotila vzorek 1.4 pro příliš malou svarovou čochku, to ale žádná z ostatních metod nepotvrdila. Snímky vzorku 1.4 z CT a metalografického výbrusu lze vidět na Obrázku 48, kde nebyla nalezena žádná vada. Při dobrých zkušenostech obsluhy se stává metoda velmi přesnou a citlivou pro detekci vad, avšak metoda se díky tomu stává velmi nákladnou a výsledky mohou být dost individuální.

V tabulce 13 byla zobrazena data pro sadu 2, která byla svařena nízkými parametry a u vzniklých svarů se předpokládá nedostatečný průvar.

Tabulka 13 - Naměřené průměry pro sadu 2 (nízké parametry, optimální hroty)

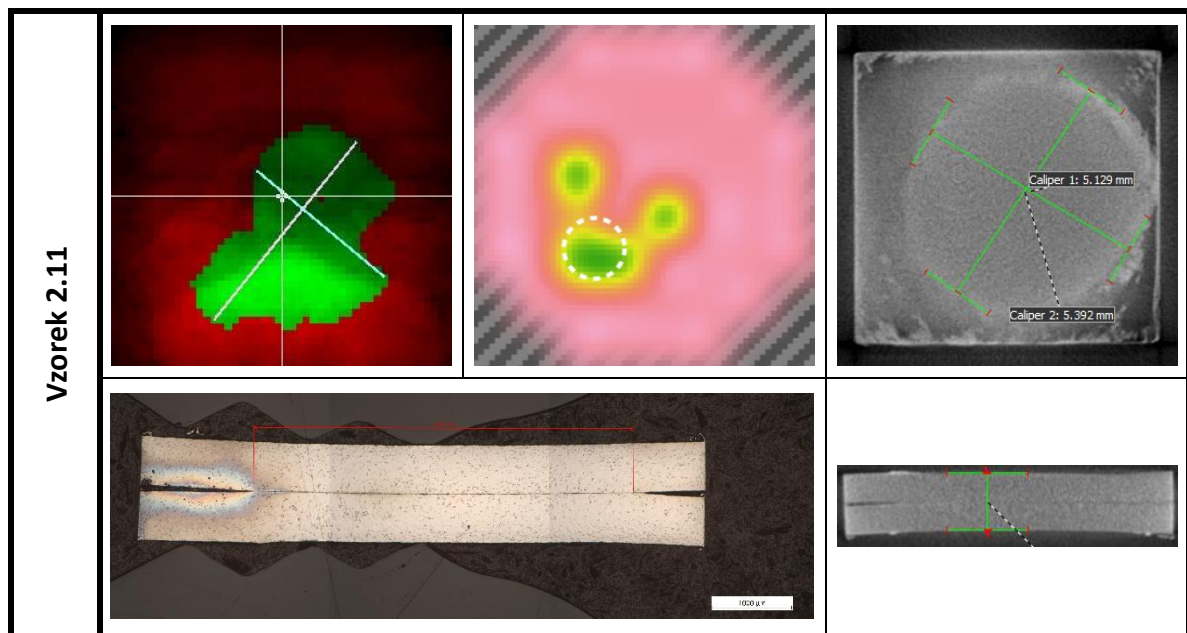
Číslo vzorku	UT1 Matrixeye C-scan	UT2 Matrixeye C-scan	UT RSWA C-scan	UT EPOCH A-scan	CT	Ruční měření	Metalografie
2.1	2,8	5,2	-	NOK	-	-	-
2.2	8,9	8,3	-	NOK	-	-	-
2.3	10,1	3,7	-	NOK	-	-	-
2.4	9,1	10,1	-	NOK	-	-	-
2.5	5,7	8,9	-	NOK	-	-	-
2.6	9,5	8,9	-	NOK	-	-	-
2.7	7,9	6,8	-	NOK	-	-	-
2.8	8,1	6,7	1,68	NOK	-	-	-
2.9	4,9	6	2,06	MP	-	-	-
2.10	9	7,7	2,18	MP	-	-	-
2.11	5,5	6,9	1,73	MP	5,26	-	4,78

- Zkratka NOK (nevyhovující svar), zkratka MP (příliš malý průměr svarové čočky).

Předpoklad byl potvrzen všemi metodami kromě získaných C-scanů zařízením Matrixeye. Tato metoda byla zhodnocena jako nedostatečně citlivá pro odhalení vady studeného spoje, protože už mezi prvním a druhým zkoušením tímto zařízením nesouhlasilo vyhodnocení vzorků jako tomu je u vzorku 2.5 v Tabulce 13. Obrázek 49 zobrazuje získaná data pro vzorek 2.11, kde na C-scanu ze zařízení Matrixeye (první vlevo nahoře) jde vidět, že ultrazvuková vlna svarem prošla i když zde byl buď to malý nebo žádný homogenní spoj.

Ostatní ověřované UT metody dostatečně odhalily studený spoj u těchto vzorků, obzvlášť interpretace ech získaných A-scany byla po odhalení této vady nejspolehlivější. Snímky z CT a metalografie u vzorku 2.11 studený spoj potvrdily (Obrázek 49).

Obdobných výsledků bylo dosaženo u vzorků ze sady 4, ty jsou umístěny v Příloze 4 a Příloze 5.



Obrázek 49 - Vzorek 2.11 (nízké parametry, optimální hroty) - UT, CT, metalografie

Vada svarů v podobě dutin u sady 3 a na reálném svařenci, vzniklá mechanismy, které byly popsány v rešeršní části, byla odhalena pomocí CT a následně potvrzena na snímcích metalografických výbrusů (viz. obrázky v Příloze 5). Všechny použité metody ultrazvukového zkoušení v tomto experimentu byly vyhodnoceny jako nedostatečně citlivé pro tento typ vady. Ačkoliv na C-scanech často byly vady vidět, softwary použitých zařízení s touto vadou nedokázaly pracovat a často vyhodnotily průměr svarové čočky chybně. Metodou A-scan u těchto vzorků vada také nebyla odhalena.

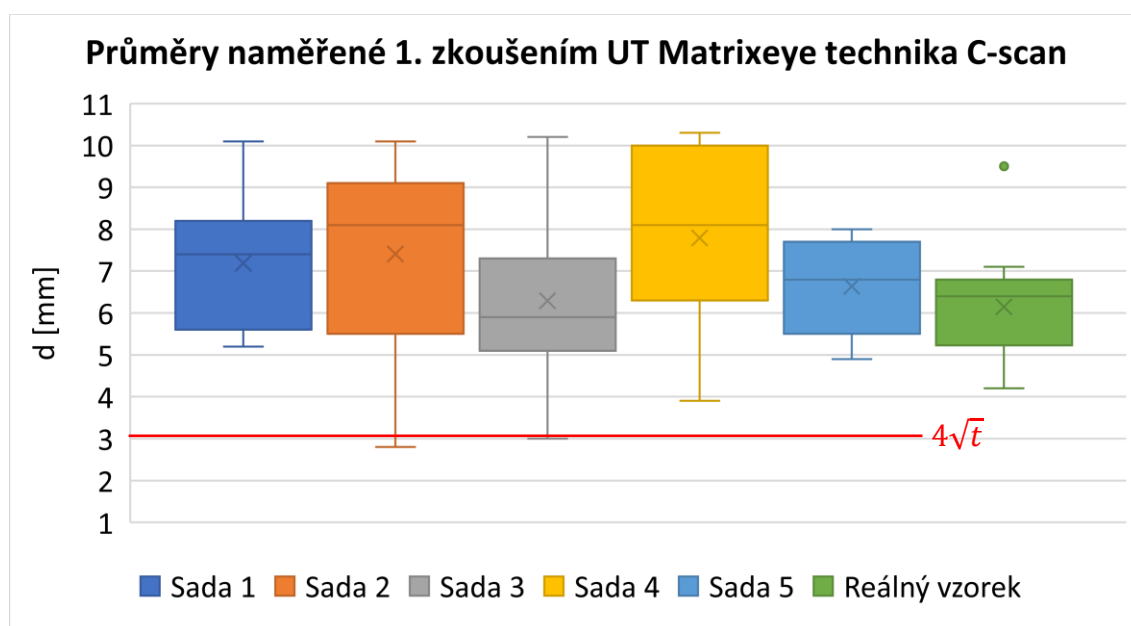
Na snímcích z CT u sady 3 byly naměřeny větší průměry, než bylo očekáváno, důvodem nejspíš bylo natavení okolní zinkové vrstvy v okolí svaru. Větší průměry svarových čoček u vzorků ze sady 4 lze vysvětlit jako důsledek svařování velmi opotřeбенými čepičkami, kde byly kontaktní plochy čepiček větší v důsledku deformace. Vznik studeného spoje u vzorků ze sady 4 potvrzuje tvrzení z rešeršní části, protože došlo k nedostatečné penetraci svaru.

UT metody pro hodnocení vzorků na sadě 5 lze zhodnotit stejným způsobem jako pro vzorky ze sady 1.

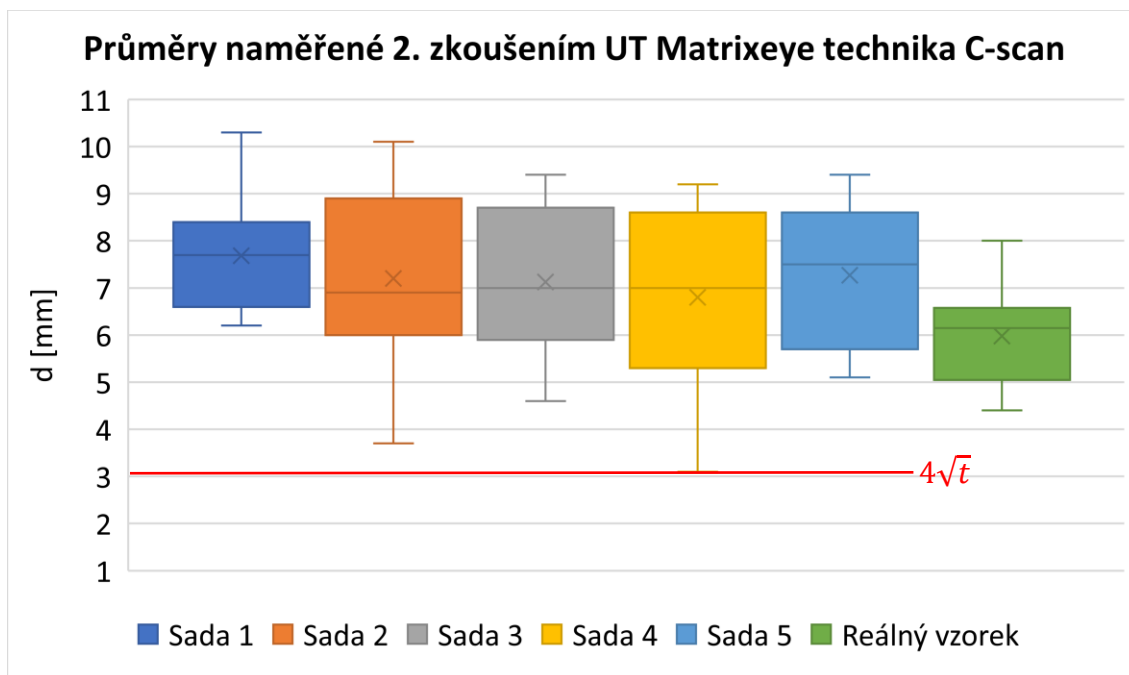
Reálný vzorek svařený odladěnými parametry v průmyslu ukázal lepší výsledky měření průměrů svarových čoček metodou C-scan oběma použitými zařízeními, než tomu bylo u laboratorně svařených sad vzorků. U metody A-scan obsluha označila čtyři vzorky pro natavenou vrstvu zinku místo svarového spoje, to se nepodařilo žádnou jinou metodou ověřit.

Povrchová trhlinka na vzorku 135 byla odhalena na snímku z CT a potvrzena metalografickým výbrusem. Žádná ze zkoušených ultrazvukových metod tuto vadu nezaznamenala, a tudíž se metody dají prohlásit jako nedostatečně citlivé pro odhalení trhlin.

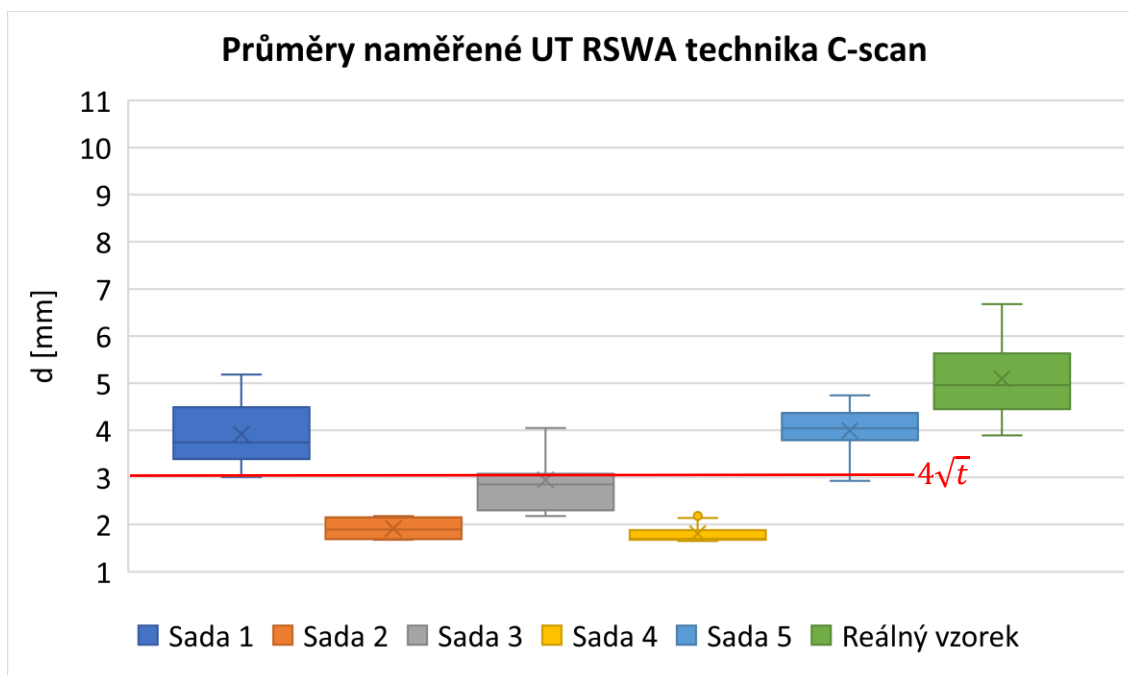
Pro zobrazení rozptylu naměřených průměrů pro laboratorně svařené sady a reálný svařenec jednotlivými metodami byly vytvořeny krabicové grafy. Ty zobrazují kvartil naměřených průměrů a vymezují ze souboru dat odlehlé hodnoty (zobrazeno tzv. vousy). Křížek v grafu zobrazuje střední hodnotu naměřených průměrů. Červená přímka v grafu symbolizuje hraniční hodnotu průměrů pro laboratorně svařené sady vzorků.



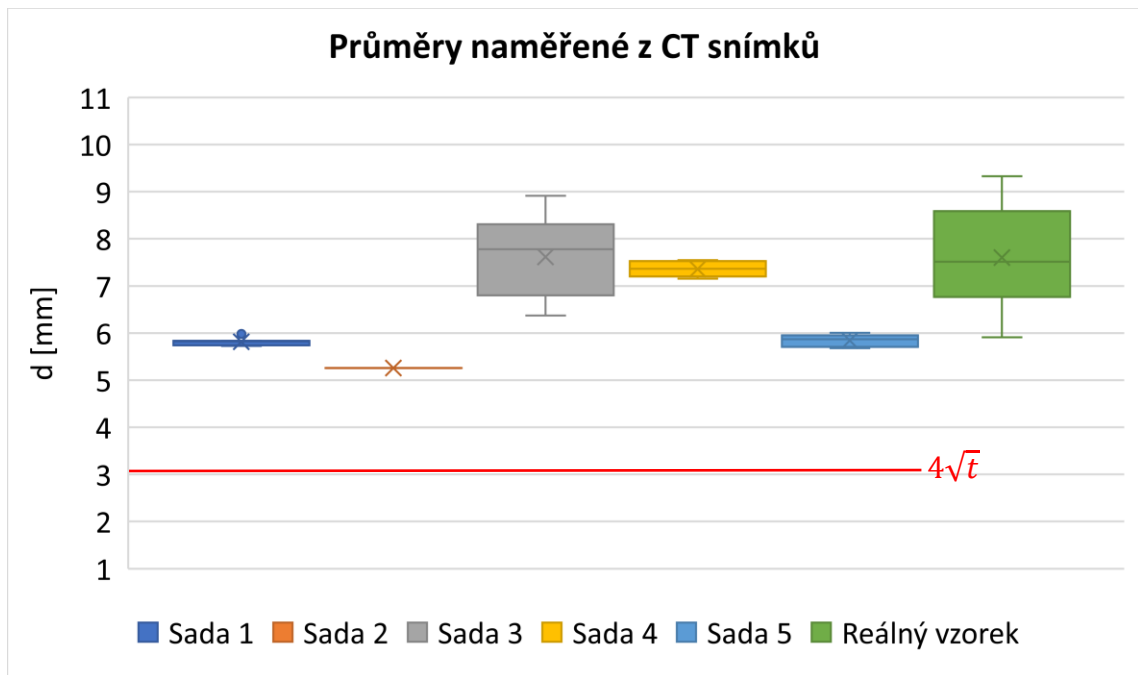
Obrázek 50 - Krabicový graf průměrů měřených z C-scanů zařízením Matrixeye: 1. zkoušení, Sady 1 (optimální parametry, optimální hroty), 2 (nízké parametry, optimální hroty), 3 (vysoké parametry, optimální hroty), 4 (optimální parametry, opotřeбенé hroty) a 5 (optimální parametry, nové hroty) a Reálný vzorek



Obrázek 51 - Krabicový graf průměrů měřených z C-scanů zařízením Matrixeye: 2. zkoušení, Sady 1 (optimální parametry, optimální hroty), 2 (nízké parametry, optimální hroty), 3 (vysoké parametry, optimální hroty), 4 (optimální parametry, opotřebené hroty) a 5 (optimální parametry, nové hroty) a Reálný vzorek



Obrázek 52 - Krabicový graf průměrů měřených z C-scanů zařízením RSWA, Sady 1 (optimální parametry, optimální hroty), 2 (nízké parametry, optimální hroty), 3 (vysoké parametry, optimální hroty), 4 (optimální parametry, opotřebené hroty) a 5 (optimální parametry, nové hroty) a Reálný vzorek



Obrázek 53 -Krabicový graf průměrů měřených z CT snímků, Sady 1 (optimální parametry, optimální hroty), 2 (nízké parametry, optimální hroty), 3 (vysoké parametry, optimální hroty), 4 (optimální parametry, opotřebené hroty) a 5 (optimální parametry, nové hroty) a Reálný vzorek

Grafy charakterizující první a druhé zkoušené zařízením Matrixeye (Obrázek 50 a 51) ukazují velký rozptyl hodnot, který byl zapříčiněn systémem, jakým software průměry měří.

Na Obrázku 52 je zobrazen graf s rozptylem naměřených průměrů ultrazvukovým zkoušením zařízením RSWA. Rozptyl byl zásadně menší a dá se stanovit, že metoda vyhodnocování průměrů tímto zařízením byla opakovatelnější, než tomu bylo u metody vyhodnocování zařízením Matrixeye.

Graf na Obrázku 53 ověřil opakovatelnost měření průměrů analýzou z CT snímků, kde se trendu vyjímá pouze sada 3, kde vzorky vykazovaly asymetrii svarů a reálný vzorek, kde ne všechny svary byly svařovány čepičkami se stejným průměrem.

8. Závěr

V této diplomové práci byla provedena rešerše týkající se rozdělení metod odporového svařování, kvality a vad bodových svarů, problematiky ultrazvukového zkoušení bodových svarů, technik ultrazvukového zkoušení a vývojových trendů v oblasti ultrazvukové kontroly. Obzvláště kapitola 4. Trendy ultrazvukové kontroly byla zaměřena na aktuální stav metod zlepšujících kvalitu výstupu ultrazvukové kontroly, a které zvyšují možnost kontrolu automatizovat. V rámci experimentální části práce byl proveden experiment s cílem ověřit citlivost více metod ultrazvukové kontroly laboratorně svařených sad vzorků bodových odporových svarů a reálného svařence svařovaného optimalizovanými parametry z průmyslu. Pro ověření byly vzorky zkontrolovány počítačovou tomografií, destrukcí využitím metody Chisel testu a metalografickou zkouškou.

V průmyslové praxi jsou bodové svary nejčastěji vyhodnocovány podle průměru svarové čočky, proto byl tento parametr pro experiment brán jako nejzásadnější. V porovnání jednotlivých použitých metod ultrazvukové kontroly se pro přesné měření průměru svarové čočky neosvědčila ani jedna z uvedených. Bylo zjištěno, že ultrazvukovým zařízením Matrixeye VI docházelo k nadhodnocování průměrů svarových čoček, kde důvodem byl způsob, jakým software zařízení svary vyhodnocuje. Při ultrazvukové kontrole zařízením RSWA F2 docházelo naopak k podhodnocení průměrů svarových čoček, kde znovu byl fenomén zapříčiněn způsobem softwarového vyhodnocení. Použitá ultrazvuková zařízení byla zhodnocena jako velmi citlivá na jejich nastavení, protože při analýze dat získaných ultrazvukovou kontrolou reálného svařence nebyly objeveny tak markantní rozdíly jako tomu bylo u laboratorně svařených vzorků. Dalším v praxi často hodnoceným parametrem u bodových odporových svarů je tloušťka svaru, kde citlivost všech použitých metod ultrazvukové kontroly byla naopak vyhodnocena jako velmi přesná, protože naměřené hodnoty se mezi sebou téměř shodovaly.

Jako nejcitlivější metoda ultrazvukové kontroly pro odhalení vady studeného spoje nebo nedostatečného provaření byla vyhodnocena technika A-scan. Technika C-scan se zařízením RSWA F2 byla ověřena také jako účinná pro odhalení této vady, ale zařízení Matrixeye VI už nikoliv.

Žádná z použitých metod nedokázala přesně odhalit přítomnost dutin ve svarech ani vadu v podobě povrchové trhliny na vzorku 135. Citlivost ultrazvukové kontroly pro analýzu těchto vad byla shledána nedostačující.

Protože byl reálný svařenec kontrolován dvěma nastaveními ultrazvukového zařízení Matrixeye využívající techniku C-scan, byla vypočítána průměrná odchylka naměřených průměrů svarových čoček tímto zařízením vůči naměřeným průměrům z CT a ručního měření po destrukci svarů. Pro standardní nastavení byla vypočtena průměrná odchylka 21,9 % a pro nastavení pro vysokopevnostní oceli 17 %. Z takto vypočtených odchylek bylo nastavení pro vysokopevnostní oceli stanoveno jako přesnější a citlivější nastavení ultrazvukové kontroly zařízením Matrixeye VI pro svařence obsahující oceli UHSS.

Bibliografie

- [1] PEREDA, M.; SANTOS, J. I.; MARTÍN, Ó. a GALÁN, J. M. Direct quality prediction in resistance spot welding process: Sensitivity, specificity and predictive accuracy comparative analysis. Online. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2015, roč. 20, č. 8, s. 679-685. ISSN 1362-1718. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000052>. [cit. 2023-09-25].
- [2] ZHANG, Hongyan a Jacek SENKARA. *Resistance welding: Fundamentals and Applications*. 2nd. New York: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4665-5641-6.
- [3] Odporové svařování. *Schinkmann svářecí technika* [online]. [cit. 2023-09-13]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/odporove-bodove-svarovani>
- [4] ČSN EN 14610 (050007), *Svařování a příbuzné procesy - Definice metod svařování kovů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.
- [5] ČSN EN ISO 4063 (050011), *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [6] SAIF, M. *RESISTANCE WELDING: TYPES, WORKING, APPLICATIONS, ADVANTAGES & MORE*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.theengineerspost.com/resistance-welding-types/>. [cit. 2023-09-30].
- [7] MATOUŠEK, Jan. *Nedestruktivní kontrola bodových svarů v automobilovém průmyslu*. ATG, 2016.
- [8] KREJBICH, Michal. *Monitorování vybraných parametrů svařovacího procesu a kvalita odporových bodových svarů*. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2009.
- [9] JABLONS, Joshua. *Resistance Spot Welding Electrodes: Understanding the Variables*. Online. 2021. Dostupné z: <https://metalcutting.com/knowledge-center/resistance-spot-welding-electrodes-understanding-the-variables-2/>. [cit. 2023-11-26].
- [10] BRECHELT, S.; WICHE, H.; JUNGE, J.; GUSTUS, R.; SCHMIDT, H. et al. Increase of electrode life in resistance spot welding of aluminum alloys by the combination of surface patterning and thin-film diffusion barriers. Online. *Welding in the World*. 2023, roč. 67, č. 12, s. 2703-2714. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01614-3>. [cit. 2023-11-29].
- [11] KOLAŘÍKOVÁ, Marie; FOREJTOVÁ, Lucie a KOLAŘÍK, Ladislav. Service live of welding electrodes at resistance welding of zinc coated steels with NIT layer. *International Conference on Metallurgy and Materials*. Metal 2017, roč. 26.

- [12] ČVUT. *Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I : Hodnocení kvality svarového spoje*. Online. Dostupné z: <https://docplayer.cz/104940134-Teoreticky-uvod-k-cviceni-z-predmetu-technologie-i-hodnoceni-kvality-svaroveho-spoje.html>. [cit. 2023-11-11].
- [13] ČSN EN ISO 6520-2 (050005), *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 2: Tlakové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [14] GEE, Phill. *Seeing the Unseen*. Online. Philipgee. Dostupné z: <http://philipgee.com/CIUp-Macro-030.html>. [cit. 2024-01-03].
- [15] KUSTROŃ, Paweł; KORZENIOWSKI, Marcin; PIWOWARCZYK, Tomasz a SOKOŁOWSKI, Paweł. Development of Resistance Spot Welding Processes of Metal–Plastic Composites. Online. *Materials*. 2021, roč. 14, č. 12. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma14123233>. [cit. 2024-01-03].
- [16] JANDURA, Václav a ZAVADIL, Tomáš. *Skriptum NDT - Nedestruktivní zkoušení základní kurz*. ATG, 2020.
- [17] ČSN EN ISO 17640 (051171), *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení ultrazvukem - Techniky, třídy zkoušení a hodnocení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [18] ČSN EN ISO 11666 (051172), *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení ultrazvukem - Úrovně přípustnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [19] KAUFMANN, Markus. *Ultrasonic test setup in through-transmission mode*. Online. 2009. Dostupné z: researchgate.net/figure/Ultrasonic-test-setup-in-through-transmission-mode-11_fig8_256547725. [cit. 2023-12-03].
- [20] HYŽA, R a KUČÍK, P. *Skúšanie bodových zvarových spojov*. Online. NDT Trade. Dostupné z: <http://www.ndttrade.cz/UserFiles/File/Skusanie%20bodovych%20zvarovych%20spojov.pdf>. [cit. 2023-12-10].
- [21] SUMMERVILLE, Cameron; COMPSTON, Paul a DOOLAN, Matthew. A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques. Online. *Procedia Manufacturing*. 2019, roč. 29, s. 305-312. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.142>. [cit. 2023-12-03].
- [22] MARTÍN, Óscar a DE TIEDRA, Pilar. Advances in the Control and Improvement of Quality in the Resistance Spot Welding Process. Online. *Metals*. 2022, roč. 12, č. 11. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met12111810>. [cit. 2023-10-10].
- [23] OLYMPUS. *Spot Weld Testing*. Online. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/spot-weld-testing/>. [cit. 2023-10-10].

- [24] ZETEC. *C-Scans in Ultrasonic Testing: The Importance of Clear Visualization in Analysis*. Online. Dostupné z: zetec.com/blog/c-scans-in-ultrasonic-testing-the-importance-of-clear-visualization-in-analysis/. [cit. 2023-12-03].
- [25] *MATRIX VS PHASED ARRAY ULTRASONIC TESTING*. Online. Dolphitech. Dostupné z: <https://dolphitech.com/matrix-vs-phased-array-ultrasonic-testing/>. [cit. 2023-12-05].
- [26] NA, Jeong K. a GLEESON, Sean T. Matrix phased array (MPA) imaging technology for resistance spot welds. Online. In: . S. 88-94. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.4864806>. [cit. 2023-12-05].
- [27] PHAM, Van Hiep; VO, Tan Hung; VU, Dinh Dat; CHOI, Jaeyeop; PARK, Sumin et al. Development of Scanning Acoustic Microscopy System for Evaluating the Resistance Spot Welding Quality. Online. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2022, roč. 33, č. 3, s. 123-137. ISSN 0934-9847. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/09349847.2022.2073415>. [cit. 2023-10-19].
- [28] HUA, Lin; WANG, Bin; WANG, Xiaokai; HE, Ximing a GUAN, Shanyue. In-situ ultrasonic detection of resistance spot welding quality using embedded probe. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, roč. 267, s. 205-214. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.008>. [cit. 2023-11-06].
- [29] *CYCLOPS Ultrasound Spot Weld Testing*. Online. NDT.net. 2007. Dostupné z: <https://www.ndt.net/news/2007/20070101cyclops.htm>. [cit. 2023-11-07].
- [30] JI, Changwook; NA, Jeong K.; LEE, Yoon-Seok; PARK, Yeong-Do a KIMCHI, Menachem. Robot-assisted non-destructive testing of automotive resistance spot welds. Online. *Welding in the World*. 2021, roč. 65, č. 1, s. 119-126. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01002-1>. [cit. 2023-12-10].
- [31] *Dry-Coupled Ultrasonic Testing: An Effective, Yet Underutilized NDE Method*. Online. Innerspec. 2015. Dostupné z: <https://www.innerspec.com/news/dry-coupled-ultrasonic-testing-nde-method>. [cit. 2023-12-10].
- [32] *ULTRASONIC COUPLANTS*. Online. Nexus engineering. Dostupné z: <http://www.nexus-bg.com/hcouplant.html>. [cit. 2023-12-10].
- [33] BOURNE, S. *Novel Solid Contact Ultrasonic Couplants Based on Hydrophilic Polymers*. Online. NDT net. Dostupné z: <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn406/idn406.htm>. [cit. 2023-12-10].
- [34] RUNNEMALM, Anna a APPELGREN, Anders. Evaluation of non-destructive testing methods for automatic quality checking of spot welds. *SpotLight*. 2012, č. 13.

- [35] *EN 10292 Grade HX180BD hot rolled or cold rolled, hot dip coated,+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS*. Online. Matmatch. Dostupné z: <https://matmatch.com/materials/minfm64674-en-10292-grade-hx180bd-hot-rolled-or-cold-rolled-hot-dip-coated-z-zf-za-az-as>. [cit. 2023-12-26].
- [36] *RSWA F2*. Online. Ndtone.com. Dostupné z: <https://ndtone.com/cs/product/rswa-f2-3/>. [cit. 2023-12-28].
- [37] *EPOCH 650 Ultrasonic Flaw Detector*. Online. Evident. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/cs/epoch650/>. [cit. 2023-12-29].

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Svařovací parametry a stav hrotů pro svařování 5 sad vzorků.....	40
Tabulka 2 - Značení vzorků na reálném svařenci a tloušťky svařovaných plechů.....	41
Tabulka 3 - Chemické složení HX 180 BD dle normy [35].....	41
Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti HX180 BD při 20 °C dle normy [35].....	42
Tabulka 5 - Naměřená data Matrixeye VI: Sada 1 (optimální parametry, optimální hroty)	47
Tabulka 6 - Naměřená data RSWA F2: Sada 1 (optimální parametry, optimální hroty)	50
Tabulka 7 - Naměřená data EPOCH 650: Sady 1 (optimální parametry, optimální hroty), 2 (nízké parametry, optimální hroty), 3 (vysoké parametry, optimální hroty), 4 (optimální parametry, opotřebené hroty) a 5 (optimální parametry, nové hroty)	51
Tabulka 8 - Naměřená data EPOCH 650: Reálný svařenec.....	51
Tabulka 9 - Přehled použitých UT zařízení – technika UT, ovládání, způsob vyhodnocení.....	52
Tabulka 10 – Naměřená data Metrotom 1500: Sada 1 (optimální parametry, optimální hroty)	56
Tabulka 11 - Naměřená data ručním měřením	59
Tabulka 12 - Naměřené průměry pro sadu 1 (optimální parametry, optimální hroty)	61
Tabulka 13 - Naměřené průměry pro sadu 2 (nízké parametry, optimální hroty).....	62

Seznam obrázků

Obrázek 1- Schéma tvorby odporového bodového svaru [3]	12
Obrázek 2 - Výstupkové svařování [6]	14
Obrázek 3 - Odporové švové svařování [6]	14
Obrázek 4 – Stlačovací stykové svařování [6].....	15
Obrázek 5 - Odtavovací stykové svařování [6]	15
Obrázek 6 - Geometrie bodového svaru [2].....	16
Obrázek 7 - P1: Trhlina [2]	20
Obrázek 8 - P2: Dutina [2]	21
Obrázek 9 – P3: Pevný vměstek [14]	21
Obrázek 10 - P4: Studený spoj [2]	21
Obrázek 11 - P5: Asymetrie svaru [15]	22
Obrázek 12 - P6: Ostatní vady (rozštěfik) [2]	22
Obrázek 13 - Ultrazvuková zkouška metoda průchodová [19]	25
Obrázek 14 - Konstrukce přímé sondy [20]	26
Obrázek 15 - A-scan nesvařeného materiálu [23]	28
Obrázek 16 - A-scan dobře svařeného materiálu [23]	28
Obrázek 17 - A-scan studeného spoje [23].....	28
Obrázek 18 - Průřez bodovým svarem získaný technikou B-scan [2].....	29
Obrázek 19 - Schéma MPA sondy [26]	31
Obrázek 20 - SAM (skenovací akustická mikroskopie) [27].....	33
Obrázek 21 - a) Standardní elektroda, b) upravená elektroda pro online detekci [28].....	34
Obrázek 22 - Online systém CYCLOPS [29]	35
Obrázek 23 - Nízkoprofilová sonda DCUT [31]	36
Obrázek 24 - Schéma umístění svarů na vystřižených pásech	39
Obrázek 25 - Svařené sady vzorků 1 až 5	40
Obrázek 26 - Svařovací lis DALEX PMS 11-4	42
Obrázek 27 - Elektrodové hroty (zleva: nové, optimálně opotřebené, opotřebené	43
Obrázek 28 - Zařízení TOSHIBA Matrixeye VI	44
Obrázek 29 -Zařízení Tessonics RSWA F2 [36].....	44
Obrázek 30 – Zařízení Olympus EPOCH 650 [37]	44
Obrázek 31 – Počítačový tomograf Zeiss Metrotom 1500.....	45

Obrázek 32 – Druhá kontrola vzorku 1.1 na Matrixeye VI	47
Obrázek 33 – Kontrola vzorku 1.1 na RSWA F2	49
Obrázek 34 - Vyřezané vzorky ze sad pro CT	53
Obrázek 35 - CAD model držáku vzorků do CT	53
Obrázek 36 - Usazení vzorků ve vytisknutých držácích	54
Obrázek 37 - Založení vzorků v držáku do CT	55
Obrázek 38 - Zobrazení profiltrovaných dat ve VGSTUDIO MAX	55
Obrázek 39 - Měření průměru a tloušťky vzorku 1.1 funkcí Caliper	56
Obrázek 40 - CT vzorku 4.5: Studený spoj	57
Obrázek 41 - CT vzorku 3.1: Dutina	57
Obrázek 42 - CT vzorku 128: Dutina	57
Obrázek 43 - CT vzorku 135: Povrchová trhлина	58
Obrázek 44 - Pneumatické kladivo pro chisel test	58
Obrázek 45 – Snímek metalografického výbrusu vzorku 3.1: Dutina, převýšení svaru	59
Obrázek 46 - Snímek metalografického výbrusu vzorku 4.5: Studený spoj	60
Obrázek 47 - Snímek metalografického výbrusu vzorku 135: Trhлина a její detail	60
Obrázek 48 - Vzorek 1.4 (optimální parametry, optimální hroty) - UT, CT, metalografie	62
Obrázek 49 - Vzorek 2.11 (nízké parametry, optimální hroty) - UT, CT, metalografie.....	63
Obrázek 50 - Krabicový graf průměrů měřených z C-scanů zařízením Matrixeye: 1. zkoušení, Sady 1 (optimální parametry, optimální hroty), 2 (nízké parametry, optimální hroty), 3 (vysoké parametry, optimální hroty), 4 (optimální parametry, opotřebené hroty) a 5 (optimální parametry, nové hroty) a Reálný vzorek	64
Obrázek 51 - Krabicový graf průměrů měřených z C-scanů zařízením Matrixeye: 2. zkoušení, Sady 1 (optimální parametry, optimální hroty), 2 (nízké parametry, optimální hroty), 3 (vysoké parametry, optimální hroty), 4 (optimální parametry, opotřebené hroty) a 5 (optimální parametry, nové hroty) a Reálný vzorek	65
Obrázek 52 - Krabicový graf průměrů měřených z C-scanů zařízením RSWA, Sady 1 (optimální parametry, optimální hroty), 2 (nízké parametry, optimální hroty), 3 (vysoké parametry, optimální hroty), 4 (optimální parametry, opotřebené hroty) a 5 (optimální parametry, nové hroty) a Reálný vzorek	65

Obrázek 53 -Krabicový graf průměrů měřených z CT snímků, Sady 1 (optimální parametry, optimální hroty), 2 (nízké parametry, optimální hroty), 3 (vysoké parametry, optimální hroty), 4 (optimální parametry, opotřebené hroty) a 5 (optimální parametry, nové hroty) a Reálný vzorek66

Seznam příloh

Příloha 1: Naměřená data ultrazvukovou kontrolou zařízením Matrixeye VI

Příloha 2: Naměřená data ultrazvukovou kontrolou zařízením RSWA F2

Příloha 3: Naměřená data z CT

Příloha 4: Porovnání naměřených dat všemi metodami

Příloha 5: Snímky C-scan, CT, metalografická zkouška vzorků

Příloha 1

Vzorky v této příloze byly vyhodnoceny z hlediska naměřeného průměru svarové čocky a na základě provaření.

Legenda pro tabulky v Příloze 1: *d* – průměr svarové čocky, *t* – tloušťka svaru, GOOD – vyhovující svar, SMALL – nevhovující svar s malým průměrem svarové čocky, STICK – nevhovující svar pro nedostatečné provaření.

P1 Tabulka 1 - Naměřená data Matrixeye VI: Sada 1 (optimální parametry, optimální hroty)

Matrixeye VI Standardní nastavení - Sada 1						
Číslo vzorku	Zkoušení č.1			Zkoušení č.2		
	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
1.1	10,1	1,2	Good	8,5	1,1	Good
1.2	5,2	1,1	Good	6,8	1,1	Good
1.3	9,5	1,1	Good	7,7	1,1	Good
1.4	7,5	1,1	Good	6,6	1,1	Good
1.5	6,7	1,1	Good	6,6	1,1	Good
1.6	5,4	1,1	Good	8,3	1,1	Good
1.7	7,7	1,1	Good	7,3	1,1	Good
1.8	7,4	1,1	Good	8,4	1,1	Good
1.9	5,6	1,1	Good	10,3	1,2	Good
1.10	5,8	1,1	Good	6,2	1,1	Good
1.11	8,2	1,1	Good	7,8	1,1	Good

P1 Tabulka 2 - Naměřená data Matrixeye VI: Sada 2 (nízké parametry, optimální hroty)

Matrixeye VI Standardní nastavení - Sada 2						
Číslo vzorku	Zkoušení č.1			Zkoušení č.2		
	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
2.1	2,8	1,2	Small	5,2	1,2	Small
2.2	8,9	1,2	Stick	8,3	1,2	Stick
2.3	10,1	1,2	Stick	3,7	1,2	Small
2.4	9,1	1,2	Stick	10,1	1,2	Stick
2.5	5,7	1,2	Stick	8,9	1,2	Good
2.6	9,5	1,2	Stick	8,9	1,2	Stick
2.7	7,9	1,2	Stick	6,8	1,2	Stick
2.8	8,1	1,1	Good	6,7	1,2	Good
2.9	4,9	1,2	Good	6	1,2	Good
2.10	9	1,2	Good	7,7	1,2	Good
2.11	5,5	1,2	Good	6,9	1,2	Good

P1 Tabulka 3 - Naměřená data Matrixeye VI: Sada 3 (vysoké parametry, optimální hroty)

Matrixeye VI Standardní nastavení - Sada 3						
Číslo vzorku	Zkoušení č.1			Zkoušení č.2		
	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
3.1	7,3	1,2	Good	5,9	1,2	Good
3.2	3	1,2	Stick	5,9	1,2	Good
3.3	6,6	1,2	Good	7,9	1,2	Good
3.4	4,7	1,2	Stick	4,6	1,1	Good
3.5	5,5	1,2	Good	6,4	1,2	Good
3.6	6	1,2	Good	8,8	1,2	Good
3.7	5,1	1,2	Good	7	1,2	Good
3.8	5,9	1,2	Good	7,8	1,2	Good
3.9	5,9	1,2	Good	6	1,2	Good
3.10	10,2	1,2	Good	9,4	1,2	Good
3.11	9	1,2	Stick	8,7	1,2	Good

P1 Tabulka 4 - Naměřená data Matrixeye VI: Sada 4 (optimální parametry, opotřebené hroty)

Matrixeye VI Standardní nastavení - Sada 4						
Číslo vzorku	Zkoušení č.1			Zkoušení č.2		
	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
4.1	10,1	1,2	Good	8,6	1,2	Good
4.2	7,1	1,2	Good	6,8	1,2	Good
4.3	6,3	1,2	Good	7,2	1,2	Good
4.4	10,3	1,2	Good	7,1	1,2	Good
4.5	8,8	1,2	Good	5,1	1,2	Good
4.6	6,4	1,2	Good	7	1,2	Good
4.7	8,7	1,2	Good	6,7	1,2	Good
4.8	8,1	1,2	Good	5,3	1,2	Good
4.9	10	1,2	Good	8,7	1,2	Good
4.10	6	1,2	Good	9,2	1,2	Good
4.11	3,9	1,2	Stick	3,1	1,2	Small

P1 Tabulka 5 - Naměřená data Matrixeye VI: Sada 5 (optimální parametry, nové hroty)

Matrixeye VI Standardní nastavení - Sada 5						
Číslo vzorku	Zkoušení č.1			Zkoušení č.2		
	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
5.1	4,9	1,2	Good	9,4	1,2	Good
5.2	6,8	1,1	Good	5,2	1,2	Good
5.3	6,3	1,1	Good	8,4	1,1	Good
5.4	6,3	1,2	Good	9,1	1,1	Good
5.5	7,7	1,2	Good	8,6	1,1	Good
5.6	6,9	1,2	Good	7	1,1	Good
5.7	5,5	1,1	Good	5,1	1,1	Good
5.8	7,9	1,1	Good	8,2	1,1	Good
5.9	7,3	1,1	Good	5,8	1,1	Good
5.10	5,4	1,1	Good	7,5	1,1	Good
5.11	8	1,1	Good	5,7	1,1	Good

P1 Tabulka 6 - Naměřená data Matrixeye VI: Reálný svařenec (standardní nastavení)

Matrixeye VI Standardní nastavení - Reálný svařenec						
Číslo vzorku	Zkoušení č.1			Zkoušení č.2		
	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
101	4,2	1,5	Good	5,6	1,5	Good
103	5	3,2	Good	6,5	3,2	Good
104	4,6	2,8	Good	4,9	2,8	Good
105	6,4	3,1	Good	5	3,1	Good
106	6,5	2,1	Good	8	2	Good
107	5,2	3,2	Good	4,4	3,2	Good
110	6	3,2	Good	4,9	3,2	Good
111	6,5	2,3	Good	6,1	2,2	Good
112	5,3	2,1	Good	5	2,1	Good
113	4,6	2,1	Good	4,8	2,1	Good
116	6	4,2	Good	6,3	4,2	Good
117	7	4	Good	6,5	4	Good
118	9,5	3	Good	6,7	3	Good
120	6,9	3,3	Good	6,9	3,3	Good
121	7,1	3,2	Good	6,2	3,2	Good
123	6,4	3,5	Good	6,8	3,5	Good
125	5,9	3,5	Good	6,2	3,5	Good
127	6,8	2,9	Good	7,2	2,9	Good
128	5,2	4,1	Good	5,2	4,1	Good
129	5,4	4,1	Good	5,5	4,1	Good
130	6,6	2,1	Good	6	2,2	Good
135	6,8	3,8	Good	6,6	3,8	Good
136	6,5	4	Good	5,9	4	Good
L	7,1	3	Good	6,3	3	Good

P1 Tabulka 7 - Naměřená data Matrixeye VI: Reálný svařenec (nastavení pro vysokopevnostní oceli)

Matrixeye VI Nastavení pro vysokopevnostní oceli - Reálný svařenec						
	Zkoušení č.1			Zkoušení č.2		
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
101	5,9	2	Good	5,6	2	Good
103	6,3	3,2	Good	6	3,2	Good
104	4,9	2,8	Good	5,1	2,8	Good
105	6,6	3,2	Good	6	3,2	Good
106	5,5	2,1	Good	6	2,1	Good
107	5,8	3,2	Good	6	3,2	Good
110	6,5	3,2	Good	6,2	3,2	Good
111	6,4	2,3	Good	6,8	2,3	Good
112	5,5	2,1	Good	5,4	2,1	Good
113	5,1	2,1	Good	5,6	2,2	Good
116	6,5	4,2	Good	6,5	4,2	Good
117	6,8	4	Good	6,8	4	Good
118	6,4	3	Good	6,3	3	Good
120	6,6	3,3	Good	7,3	3,3	Good
121	5,8	3,2	Good	6,4	3,2	Good
122	7	3,2	Good	7,3	3,3	Good
123	5,9	3,5	Good	6,6	3,5	Good
125	6,3	3,5	Good	6,2	3,5	Good
127	7,1	2,9	Good	6,9	2,9	Good
128	5,2	4,2	Good	6,5	4,1	Good
129	6,2	4,1	Good	6,3	4,1	Good
130	7,3	2,2	Good	6,7	2,2	Good
135	7	3,8	Good	6,8	3,8	Good
136	5,1	4,1	Good	6,8	4	Good

Příloha 2

Vzorky v této příloze byly vyhodnoceny pouze z hlediska naměřeného průměru svarové čočky.

Legenda pro tabulky v Příloze 2: d – průměr svarové čočky, t – tloušťka svaru, OK – vyhovující svar, NOK – nevyhovující svar

P2 Tabulka 1 - Naměřená data RSWA F2: Sada 1 (optimální parametry, optimální hroty)

RSWA F2 - Sada 1			
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
1.1	4,40	1,07	OK
1.2	3,39	1,11	OK
1.3	3,74	1,07	OK
1.4	3,95	1,10	OK
1.5	3,65	1,09	OK
1.6	3,01	1,10	OK
1.7	3,65	1,11	OK
1.8	3,09	1,11	OK
1.9	5,18	1,11	OK
1.10	4,56	1,13	OK
1.11	4,49	1,11	OK

P2 Tabulka 2 - Naměřená data RSWA F2: Sada 2 (nízké parametry, optimální hroty)

RSWA F2 - Sada 2			
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
2.8	1,68	1,20	NOK
2.9	2,06	1,17	NOK
2.10	2,18	1,13	NOK
2.11	1,73	1,17	NOK

P2 Tabulka 3 - Naměřená data RSWA F2: Sada 3 (vysoké parametry, optimální hroty)

RSWA F2 - Sada 3			
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
3.1	4,04	1,21	OK
3.2	2,18	1,30	NOK
3.3	3,01	1,19	OK
3.4	2,29	1,20	NOK
3.5	2,85	1,20	NOK
3.6	2,93	1,17	NOK
3.7	2,85	1,15	NOK
3.8	2,30	1,20	NOK
3.9	4,05	1,09	OK
3.10	3,08	1,15	OK
3.11	2,85	1,19	NOK

P2 Tabulka 4 - Naměřená data RSWA F2: Sada 4 (Optimální parametry, opotřebené hroty)

RSWA F2 - Sada 4			
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
4.1	1,70	1,21	NOK
4.2	1,65	1,21	NOK
4.3	2,14	1,21	NOK
4.4	1,88	1,22	NOK
4.5	1,88	1,22	NOK
4.6	1,70	1,27	NOK
4.7	1,68	1,19	NOK
4.8	2,18	1,17	NOK
4.9	1,68	1,16	NOK
4.10	1,68	1,24	NOK
4.11	1,68	1,16	NOK

P2 Tabulka 5 - Naměřená data RSWA F2: Sada 5 (Optimální parametry, nové hroty)

RSWA F2 - Sada 5			
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
5.1	4,26	1,08	OK
5.2	3,95	1,09	OK
5.3	4,37	1,11	OK
5.4	4,49	1,12	OK
5.5	4,04	1,10	OK
5.6	4,05	1,11	OK
5.7	3,79	1,12	OK
5.8	3,49	1,13	OK
5.9	3,84	1,10	OK
5.10	2,93	1,13	NOK
5.11	4,74	1,16	OK

P2 Tabulka 6 - Naměřená data RSWA F2: Reálný svařenec

RSWA F2 - Reálný svařenec			
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]	Vyhodnocení
101	4,91	3,05	OK
103	5,63	3,12	OK
104	4,45	2,74	OK
105	6,04	3,03	OK
106	3,89	1,98	OK
107	4,96	3,11	OK
110	5,79	3,11	OK
111	5,04	2,18	OK
112	4,15	2,10	OK
113	4,45	2,08	OK
116	6,09	-	OK
117	6,34	-	OK
118	4,80	2,88	OK
120	5,63	3,34	OK
121	5,13	3,09	OK
122	5,35	3,11	OK
123	4,64	3,41	NOK
125	4,45	3,35	NOK
127	4,42	2,90	NOK
128	5,09	2,00	OK
129	4,44	1,48	OK
130	4,71	2,07	OK
135	5,35	1,21	OK
136	4,96	-	OK
L	6,68	2,87	OK

Příloha 3

Legenda pro tabulky v Příloze 3: d – průměr svarové čočky, t – tloušťka svaru.

*P3 Tabulka 1 – Naměřená data
Metrotom 1500: Sada 1 (optimální
parametry, optimální hroty)*

Metrotom 1500 - Sada 1		
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]
1.1	5,83	1,15
1.2	5,98	1,15
1.3	5,77	1,13
1.4	5,73	1,11
1.5	5,84	1,14
1.6	5,74	1,12
1.7	5,82	1,12

*P3 Tabulka 2 – Naměřená data
Metrotom 1500: Sada 2 (nízké
parametry, optimální hroty)*

Metrotom 1500 - Sada 2		
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]
2.11	5,26	1,18

*P3 Tabulka 3 – Naměřená data
Metrotom 1500: Sada 3 (vysoké
parametry, optimální hroty)*

Metrotom 1500 - Sada 3		
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]
3.1	8,31	1,36
3.2	8,91	1,22
3.3	7,78	1,28
3.4	7,01	1,23
3.5	6,37	1,20
3.6	8,14	1,30
3.7	6,80	1,22

*P3 Tabulka 4 – Naměřená data
Metrotom 1500: Sada 4 (optimální
parametry, opotřebené hroty)*

Metrotom 1500 - Sada 4		
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]
4.1	7,37	1,20
4.2	7,28	1,20
4.3	7,45	1,24
4.4	7,53	1,19
4.5	7,55	1,21
4.6	7,15	1,18
4.7	7,20	1,22

*P3 Tabulka 5 – Naměřená data
Metrotom 1500: Sada 5 (optimální
parametry, nové hroty)*

Metrotom 1500 - Sada 5		
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]
5.1	5,71	1,11
5.2	5,76	1,15
5.3	5,87	1,16
5.4	5,93	1,11
5.5	5,68	1,13
5.6	5,95	1,14
5.7	6,01	1,12

*P3 Tabulka 6 – Naměřená data
Metrotom 1500: Reálný svařenec*

Metrotom 1500 – Reálný svařenec		
Číslo vzorku	d [mm]	t [mm]
104	6,29	2,79
107	6,97	3,20
110	7,59	3,12
111	6,82	2,19
112	5,97	2,11
113	5,91	2,13
116	7,44	4,02
117	8,60	3,83
118	6,75	2,90
120	7,91	3,14
121	8,56	3,04
122	8,47	3,10
123	7,02	3,31
127	-	2,71
128	9,22	3,99
129	9,33	3,99
130	-	2,12
135	-	3,52
L	8,80	2,85

Příloha 4

Legenda pro tabulky v Příloze 4: OK – vyhovující svar, NOK – nevyhovující svar, MP – nevyhovující svar pro příliš malý průměr svarové čočky, MČ – malá svarová čočka, Dut – Svar obsahuje dutinu, Zn – v rozhraní svaru natavená vrstva zinku.

Zkratka UT1 – první zkoušení zařízením Matrixeye VI standardním nastavením, UT2 – druhé zkoušení zařízením Matrixeye VI standardním nastavením.

P4 Tabulka 1- Naměřené průměry pro sadu 1 (optimální parametry, optimální hroty)

Číslo vzorku	UT1 Matrixeye C-scan	UT2 Matrixeye C-scan	UT RSWA C-scan	UT EPOCH A-scan	CT	Ruční měření	Metalografie
1.1	10,1	8,5	4,4	OK	5,83	-	-
1.2	5,2	6,8	3,39	OK	5,98	-	-
1.3	9,5	7,7	3,74	Pór	5,77	-	-
1.4	7,5	6,6	3,95	MČ	5,73	-	-
1.5	6,7	6,6	3,65	OK	5,84	-	5,69
1.6	5,4	8,3	3,01	Pór	5,74	-	-
1.7	7,7	7,3	3,65	OK	5,82	-	-
1.8	7,4	8,4	3,09	OK	-	5,65	-
1.9	5,6	10,3	5,18	OK	-	5,6	-
1.10	5,8	6,2	4,56	OK	-	5,7	-
1.11	8,2	7,8	4,49	OK	-	5,6	-

P4 Tabulka 2 - Naměřené průměry pro sadu 2 (nízké parametry, optimální hroty)

Číslo vzorku	UT1 Matrixeye C-scan	UT2 Matrixeye C-scan	UT RSWA C-scan	UT EPOCH A-scan	CT	Ruční měření	Metalografie
2.1	2,8	5,2	-	NOK	-	-	-
2.2	8,9	8,3	-	NOK	-	-	-
2.3	10,1	3,7	-	NOK	-	-	-
2.4	9,1	10,1	-	NOK	-	-	-
2.5	5,7	8,9	-	NOK	-	-	-
2.6	9,5	8,9	-	NOK	-	-	-
2.7	7,9	6,8	-	NOK	-	-	-
2.8	8,1	6,7	1,68	NOK	-	-	-
2.9	4,9	6	2,06	MP	-	-	-
2.10	9	7,7	2,18	MP	-	-	-
2.11	5,5	6,9	1,73	MP	5,26	-	4,78

P4 Tabulka 3 - Naměřené průměry pro sadu 3 (vysoké parametry, optimální hroty)

Číslo vzorku	UT1 Matrixeye C-scan	UT2 Matrixeye C-scan	UT RSWA C-scan	UT EPOCH A-scan	CT	Ruční měření	Metalografie
3.1	7,3	5,9	4,04	OK	8,31	-	6,36
3.2	3	5,9	2,18	NOK	8,91	-	6,09
3.3	6,6	7,9	3,01	NOK	7,78	-	-
3.4	4,7	4,6	2,29	NOK	7,01	-	4,58
3.5	5,5	6,4	2,85	OK	6,37	-	-
3.6	6	8,8	2,93	OK	8,14	-	-
3.7	5,1	7	2,85	Pór	6,80	-	-
3.8	5,9	7,8	2,3	OK	-	6,7	-
3.9	5,9	6	4,05	OK	-	6,4	-
3.10	10,2	9,4	3,08	OK	-	6,4	-
3.11	9	8,7	2,85	OK	-	6,2	-

P4 Tabulka 4 - Naměřené průměry pro sadu 4 (optimální parametry, opotřebené hroty)

Číslo vzorku	UT1 Matrixeye C-scan	UT2 Matrixeye C-scan	UT RSWA C-scan	UT EPOCH A-scan	CT	Ruční měření	Metalografie
4.1	10,1	8,6	1,7	NOK	7,37	-	-
4.2	7,1	6,8	1,65	NOK	7,28	-	-
4.3	6,3	7,2	2,14	NOK	7,45	-	6,69
4.4	10,3	7,1	1,88	NOK	7,53	-	-
4.5	8,8	5,1	1,88	NOK	7,55	-	6,88
4.6	6,4	7	1,7	NOK	7,15	-	-
4.7	8,7	6,7	1,68	NOK	7,20	-	-
4.8	8,1	5,3	2,18	Dut	-	-	-
4.9	10	8,7	1,68	NOK	-	-	-
4.10	6	9,2	1,68	NOK	-	-	-
4.11	3,9	3,1	1,68	NOK	-	-	-

P4 Tabulka 5- Naměřené průměry pro sadu 5 (optimální parametry, nové hroty)

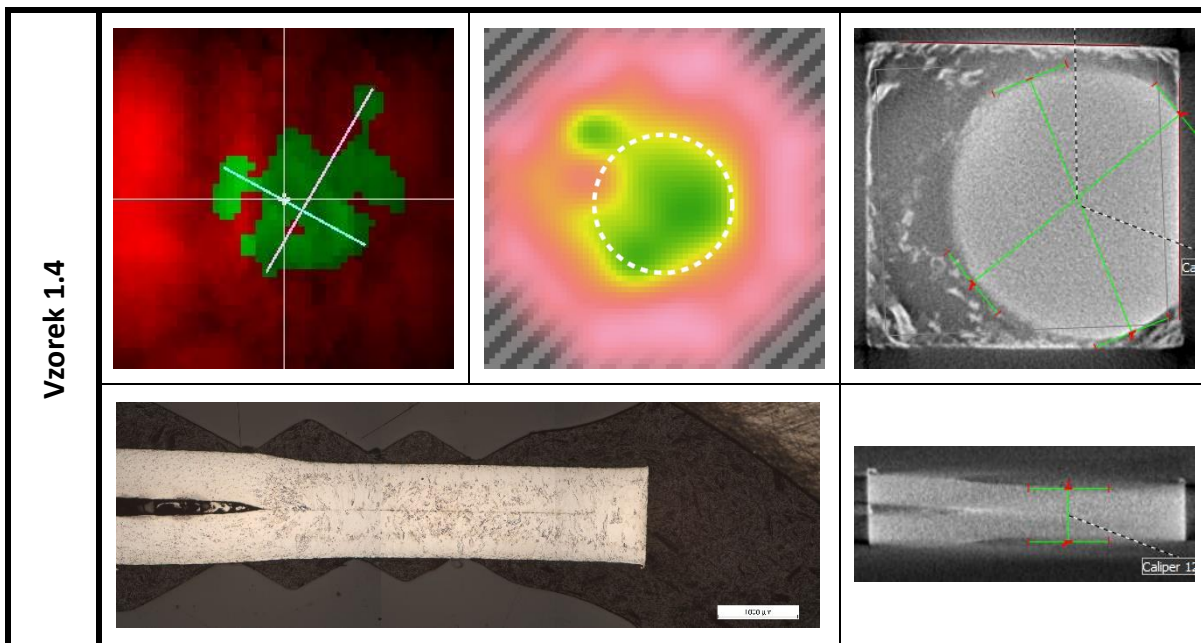
Číslo vzorku	UT1 Matrixeye C-scan	UT2 Matrixeye C-scan	UT RSWA C-scan	UT EPOCH A-scan	CT	Ruční měření	Metalografie
5.1	4,9	9,4	4,26	OK	5,71	-	-
5.2	6,8	5,2	3,95	OK	5,76	-	-
5.3	6,3	8,4	4,37	OK	5,87	-	-
5.4	6,3	9,1	4,49	OK	5,93	-	5,27
5.5	7,7	8,6	4,04	OK	5,68	-	-
5.6	6,9	7	4,05	OK	5,95	-	-
5.7	5,5	5,1	3,79	OK	6,01	-	-
5.8	7,9	8,2	3,49	OK	-	4,9	-
5.9	7,3	5,8	3,84	OK	-	5,2	-
5.10	5,4	7,5	2,93	MP	-	5,0	-
5.11	8	5,7	4,74	OK	-	4,2	-

P4 Tabulka 6- Naměřené průměry pro reálný svařenec

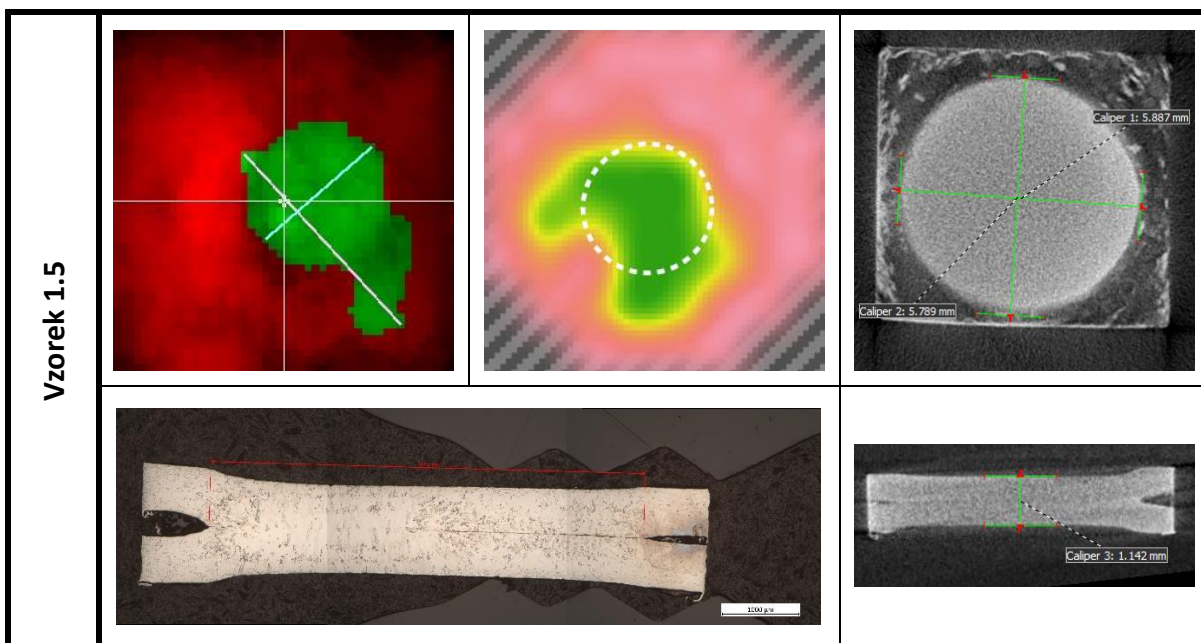
Číslo vzorku	UT1 Matrixeye C-scan	UT2 Matrixeye C-scan	UT RSWA C-scan	UT EPOCH A-scan	CT	Ruční měření	Metalografie
101	4,2	5,6	4,91	OK	-	5,85	-
103	5	6,5	5,63	OK	-	5,35	-
104	4,6	4,9	4,45	OK	6,27	-	5,64
105	6,4	5	6,04	OK	-	5,35	-
106	6,5	8	3,89	OK	-	-	-
107	5,2	4,4	4,96	OK	6,97	-	-
110	6	4,9	5,79	OK	7,59	-	-
111	6,5	6,1	5,04	Zn	6,82	-	-
112	5,3	5	4,15	OK	5,97	-	5,58
113	4,6	4,8	4,45	OK	5,91	-	6,8
116	6	6,3	6,09	OK	7,44	-	-
117	7	6,5	6,34	OK	8,60	-	7,02
118	9,5	6,7	4,8	OK	6,75	-	6,29
120	6,9	6,9	5,63	Zn	7,91	-	-
121	7,1	6,2	5,13	OK	8,56	-	-
123	6,4	6,8	4,64	Zn	7,02	-	-
125	5,9	6,2	4,45	Zn	-	-	-
127	6,8	7,2	4,42	OK	-	-	-
128	5,2	5,2	5,09	OK	9,22	-	5,29
129	5,4	5,5	4,44	OK	9,33	-	-
130	6,6	6	4,71	OK	-	-	5,94
135	6,8	6,6	5,35	OK	-	-	-
136	6,5	5,9	4,96	OK	-	-	-
L	7,1	6,3	6,68	OK	8,80	-	7,88

Příloha 5

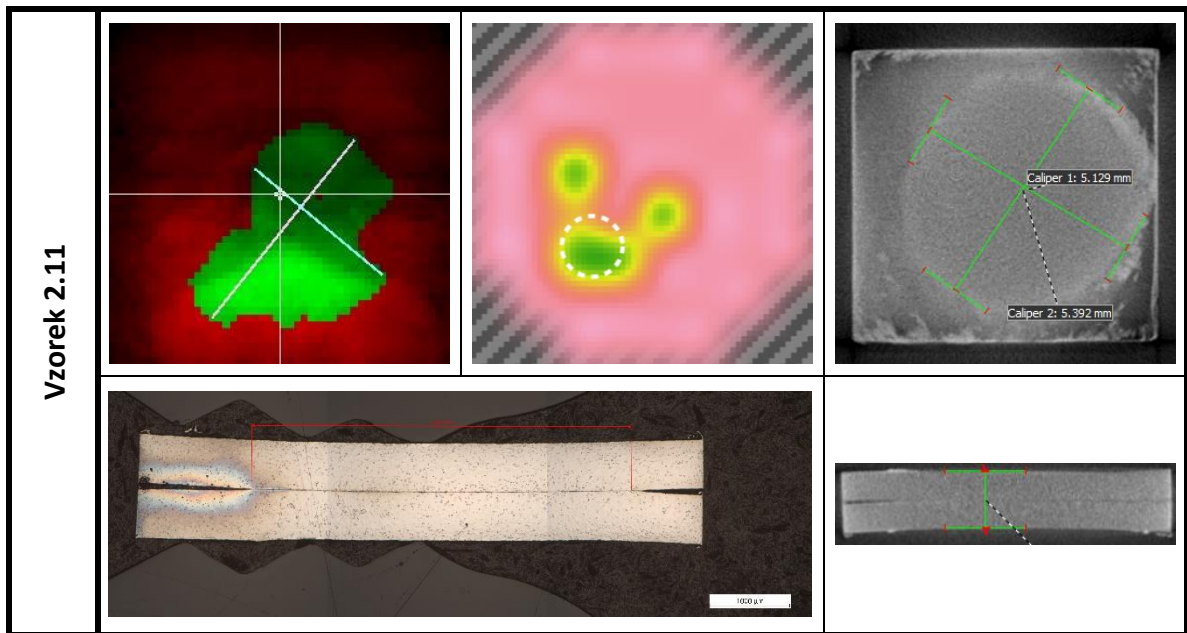
Legenda: obrázek nahoře vlevo – C-scan Matrixeye VI, obrázek nahoře uprostřed – C-scan RSWA F2, obrázek nahoře vpravo – CT snímek průřezu čočky, obrázek dole vlevo – snímek metalografického výbrusu, obrázek dole vpravo – CT snímek bočního průřezu svaru.



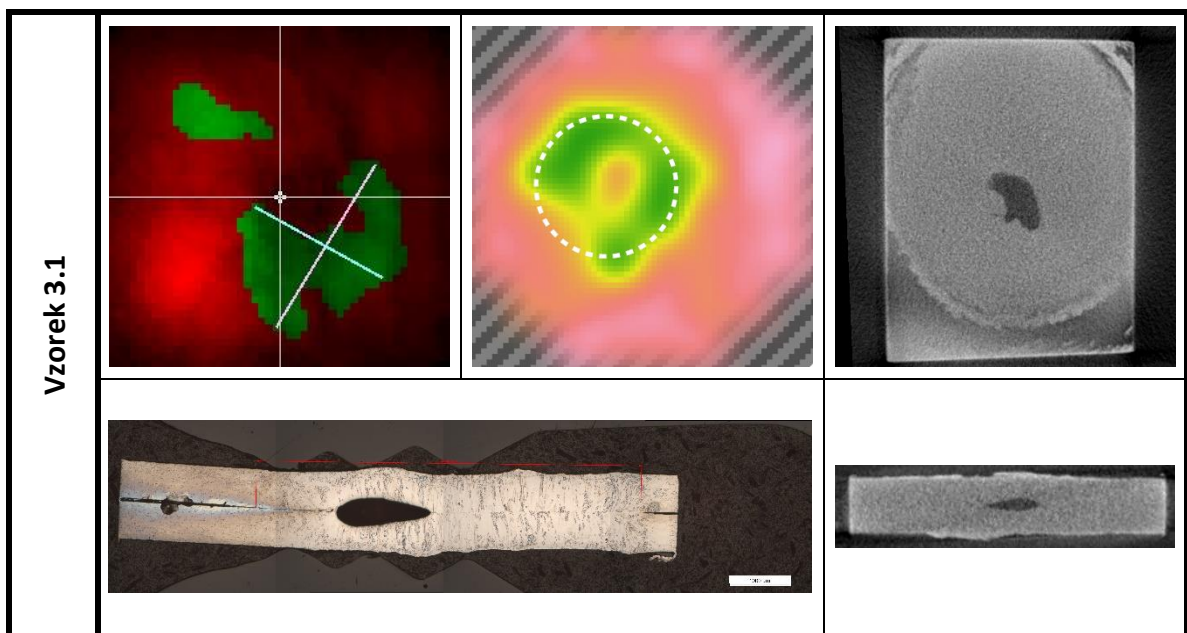
P5 Obrázek 1 - Vzorek 1.4 (optimální parametry, optimální hroty) - UT, CT, metalografie



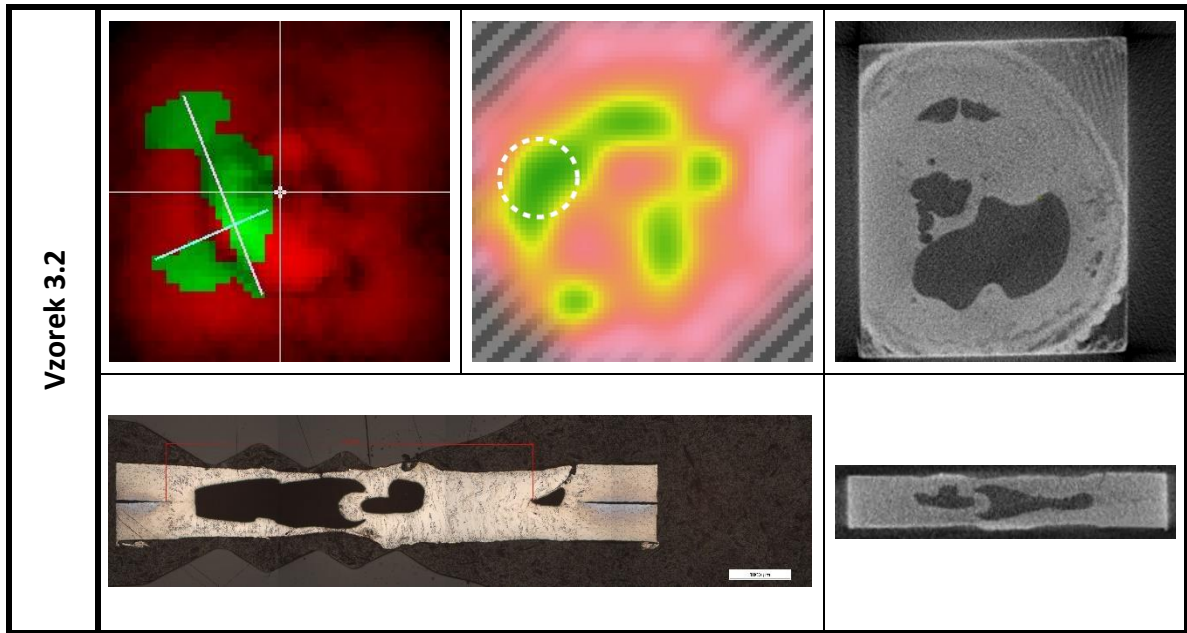
P5 Obrázek 2 - Vzorek 1.5 (optimální parametry, optimální hroty) - UT, CT, metalografie



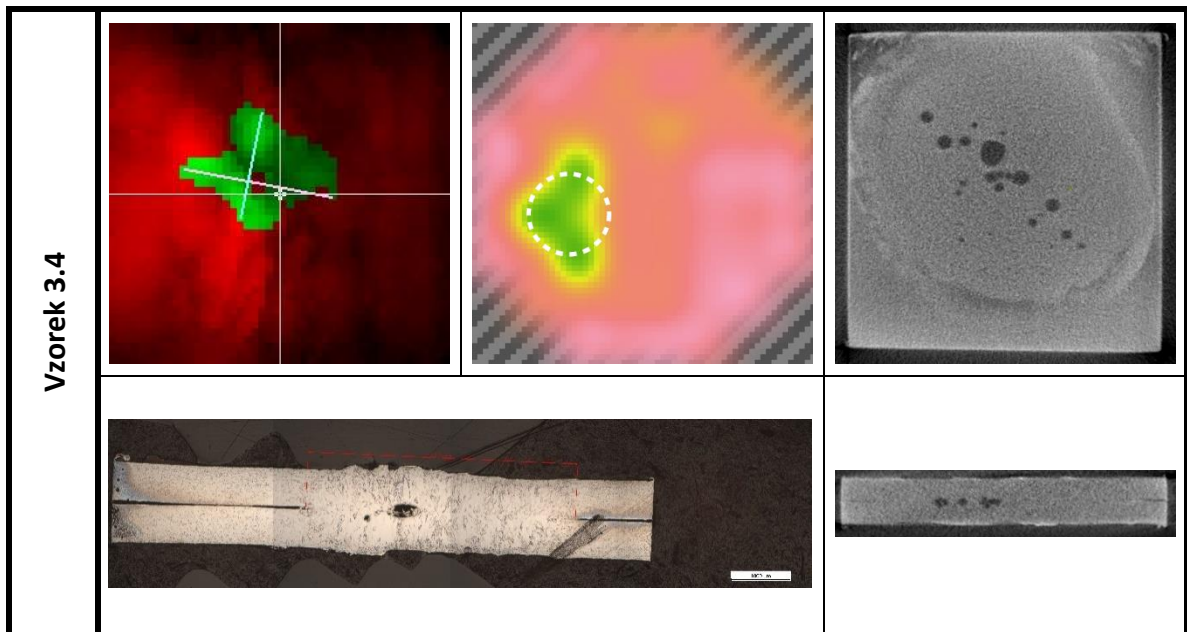
P5 Obrázek 3 - Vzorek 2.11 (nízké parametry, optimální hroty) - UT, CT, metalografie



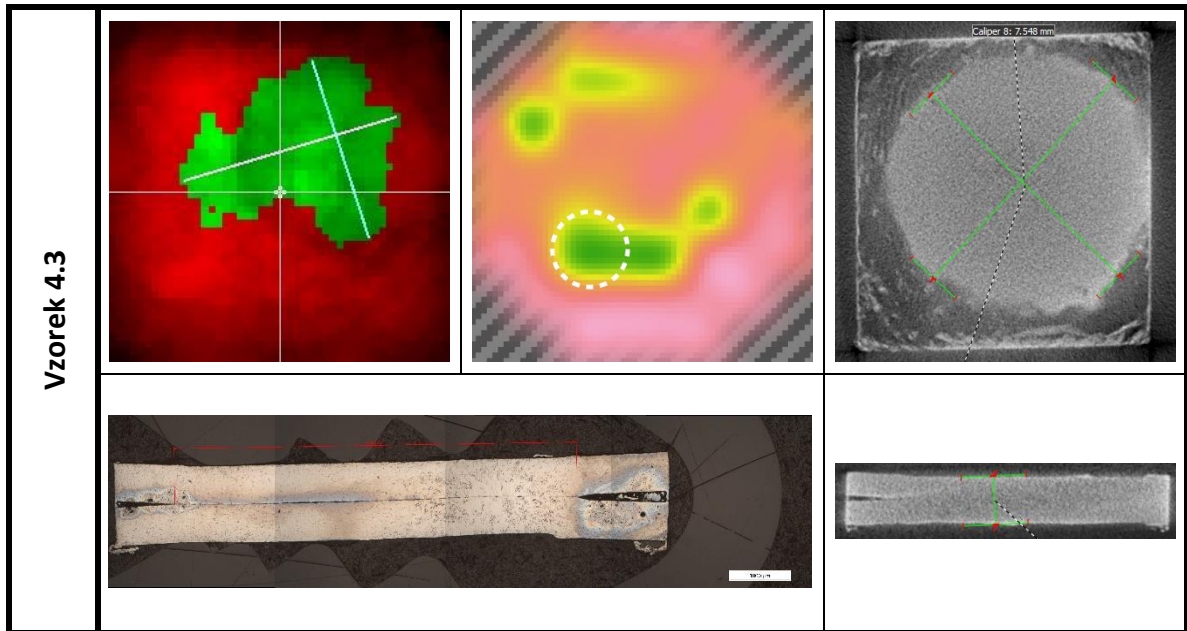
P5 Obrázek 4 - Vzorek 3.1(vysoké parametry, optimální hroty) - UT, CT, metalografie



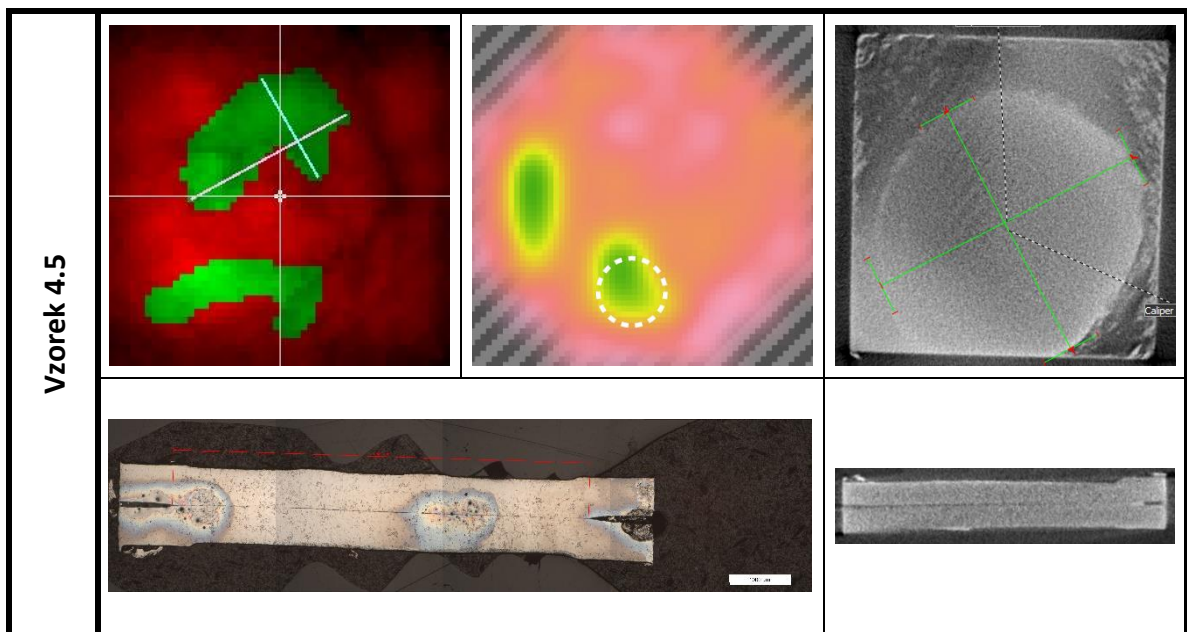
P5 Obrázek 5 - Vzorek 3.2 (vysoké parametry, optimální hroty) - UT, CT, metalografie



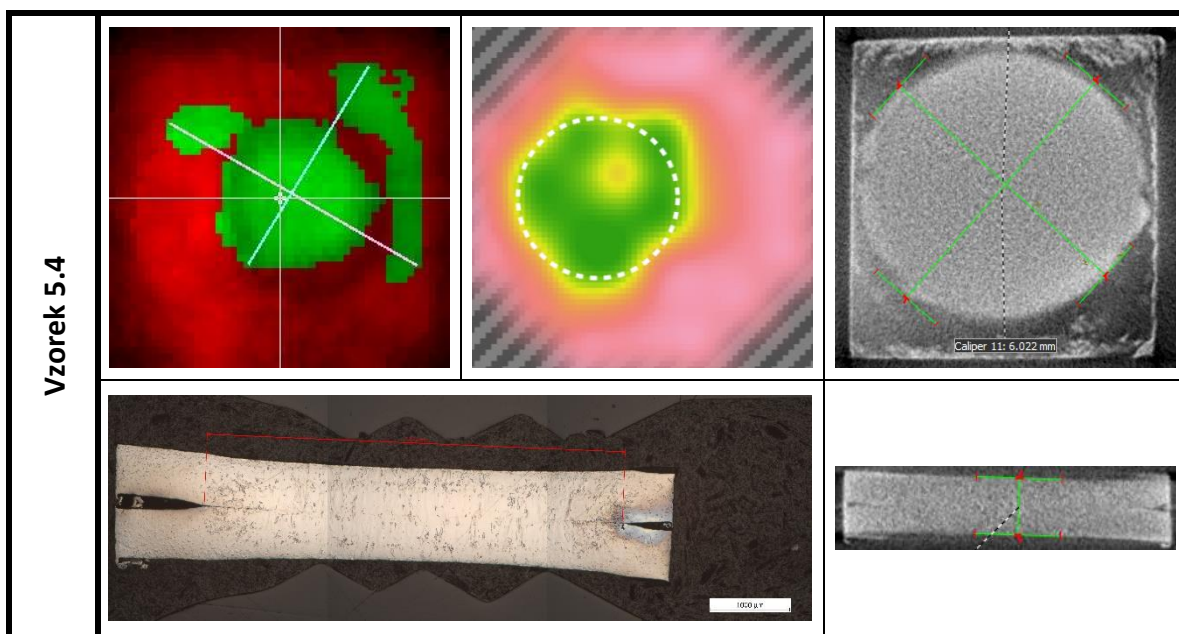
P5 Obrázek 6 - Vzorek 3.4 (vysoké parametry, optimální hroty) - UT, CT, metalografie



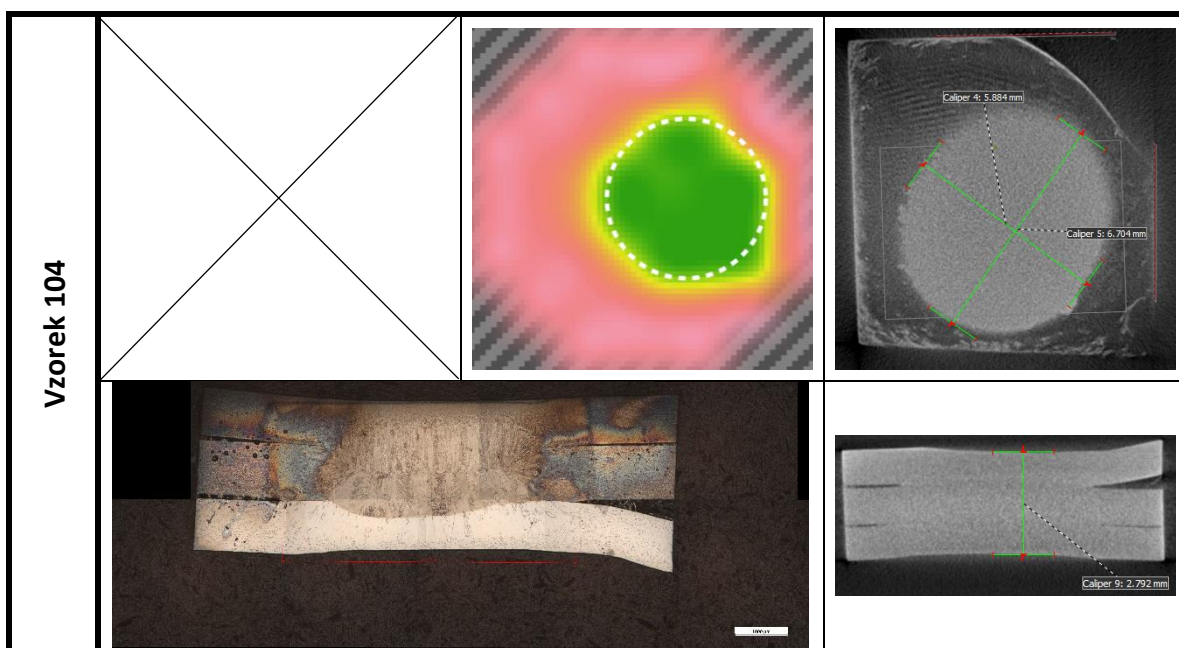
P5 Obrázek 7 - Vzorek 4.3 (optimální parametry, opotřebené hroty) - UT, CT, metalografie



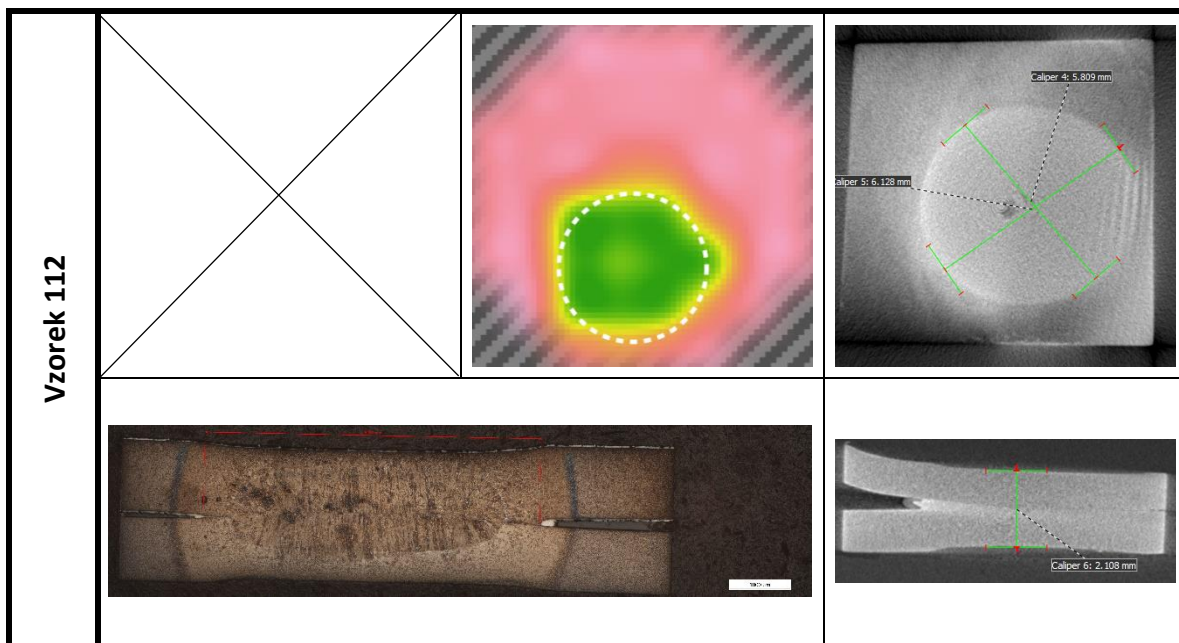
P5 Obrázek 8 - Vzorek 4.5 (optimální parametry, opotřebené hroty) - UT, CT, metalografie



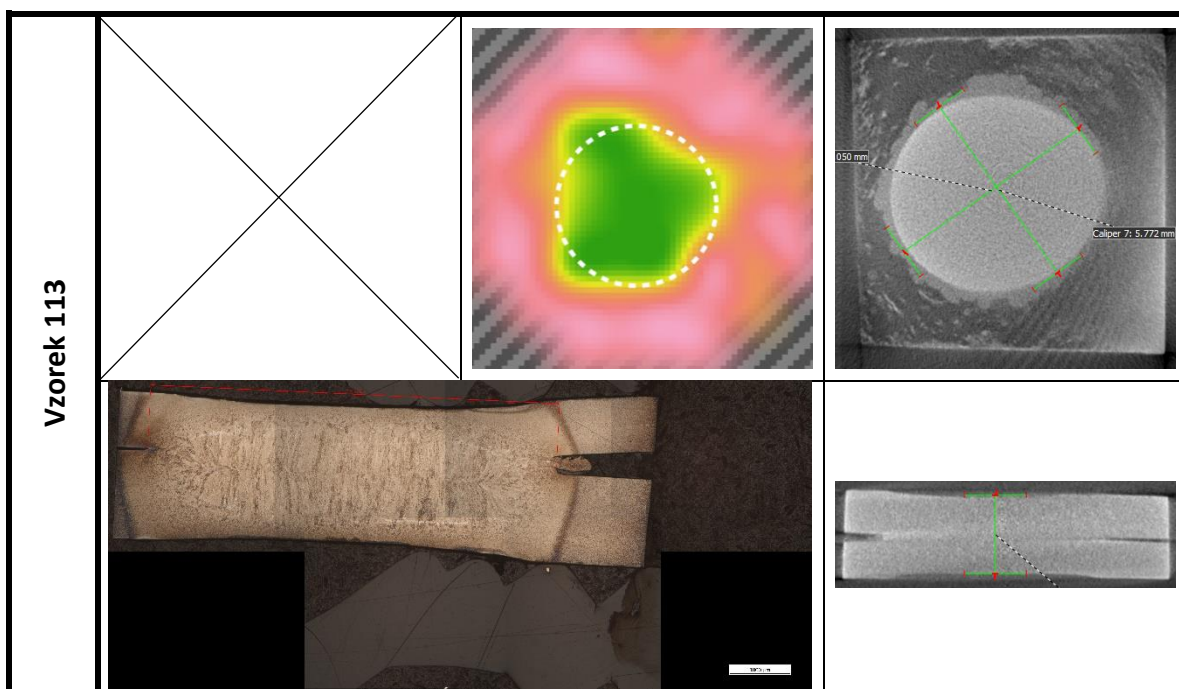
P5 Obrázek 9 - Vzorek 5.4 (optimální parametry, nové hroty) - UT, CT, metalografie



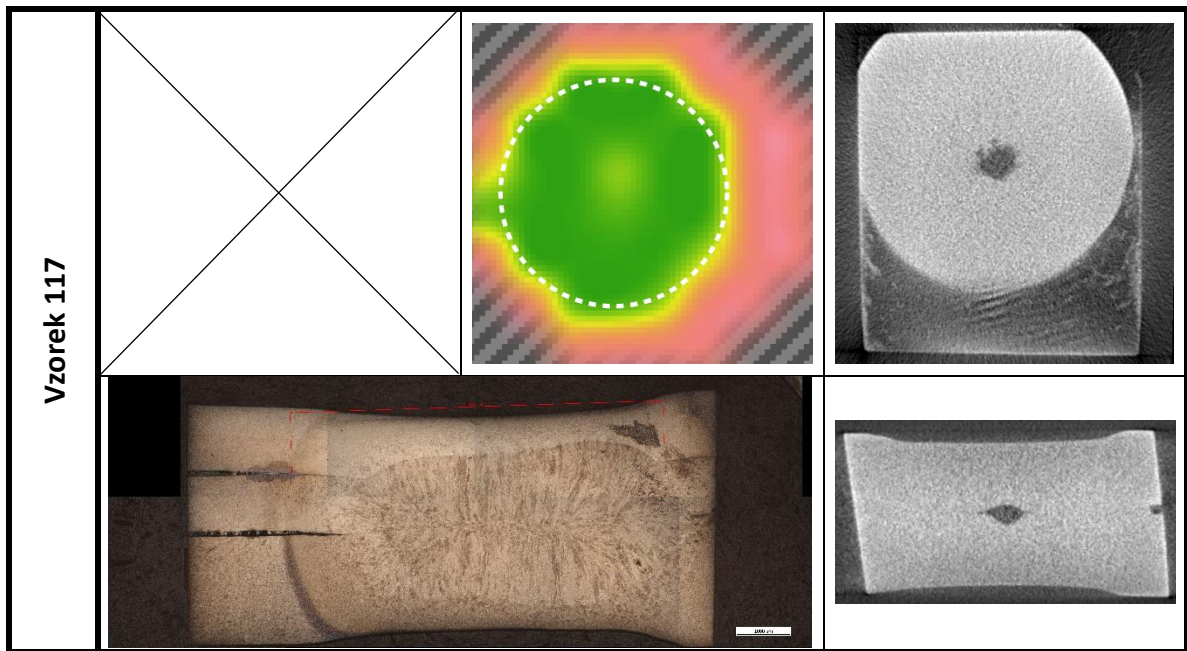
P5 Obrázek 10 - Vzorek 104 - UT, CT, metalografie



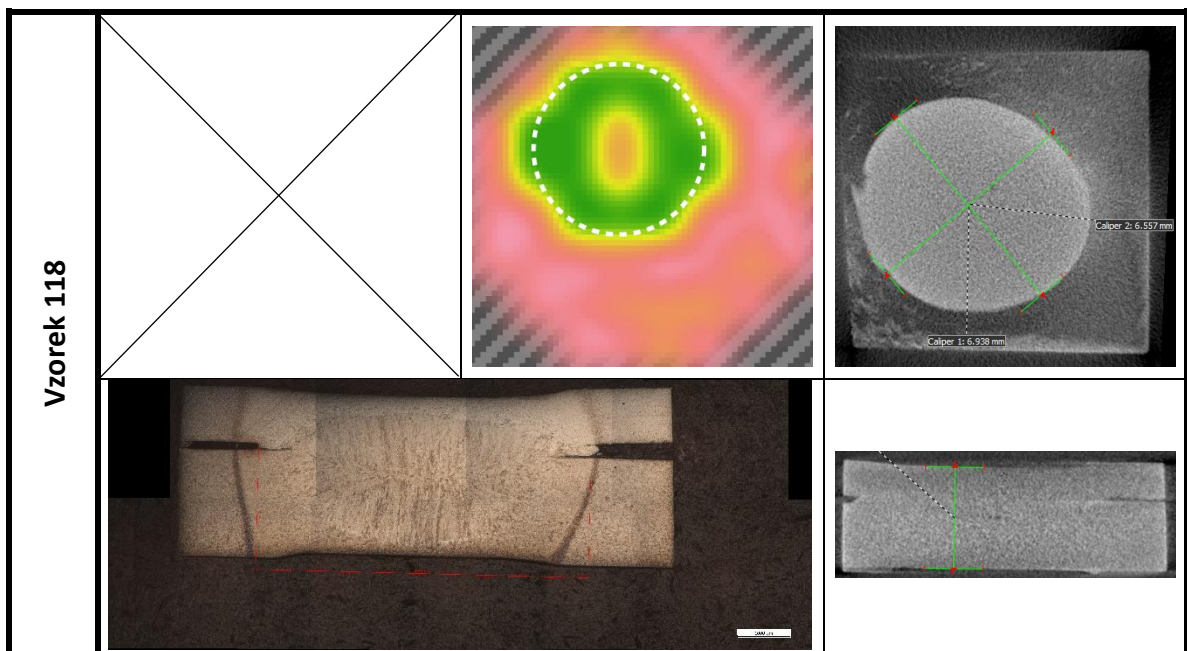
P5 Obrázek 11 - Vzorek 112 - UT, CT, metalografie



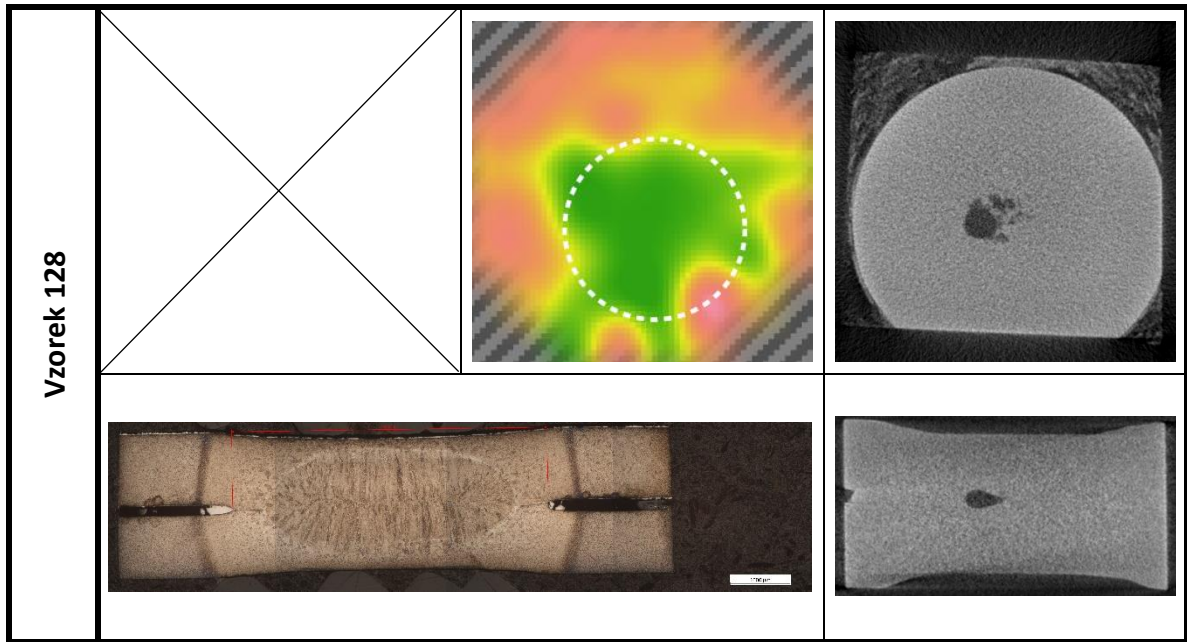
P5 Obrázek 12 - Vzorek 113 - UT, CT, metalografie



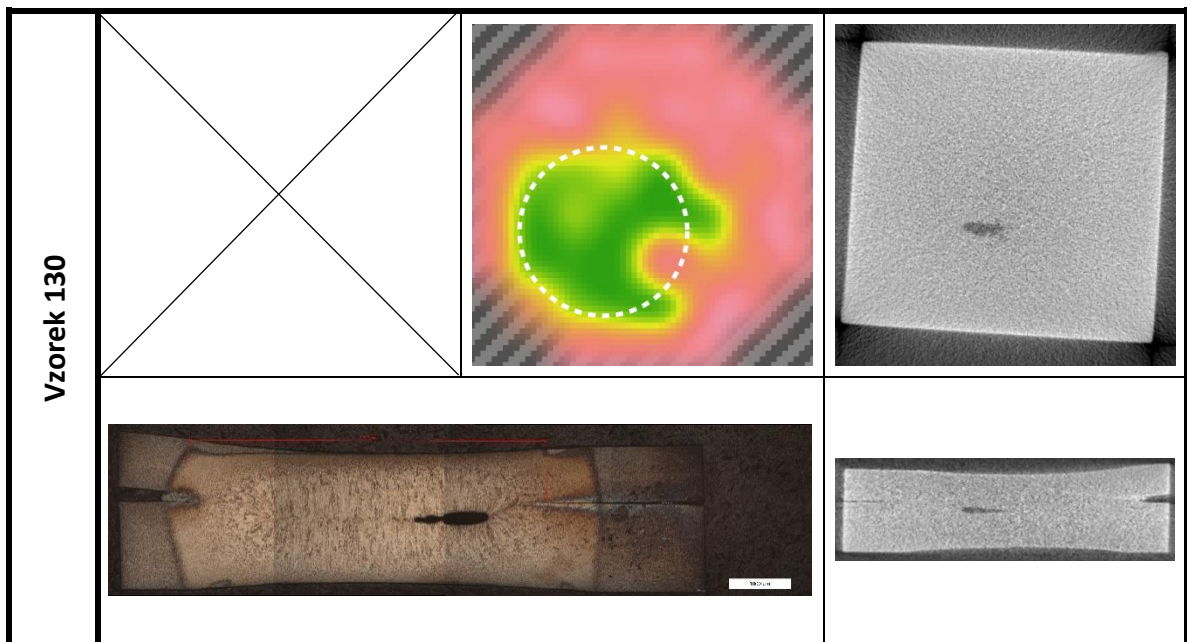
P5 Obrázek 13 - Vzorek 117 - UT, CT, metalografie



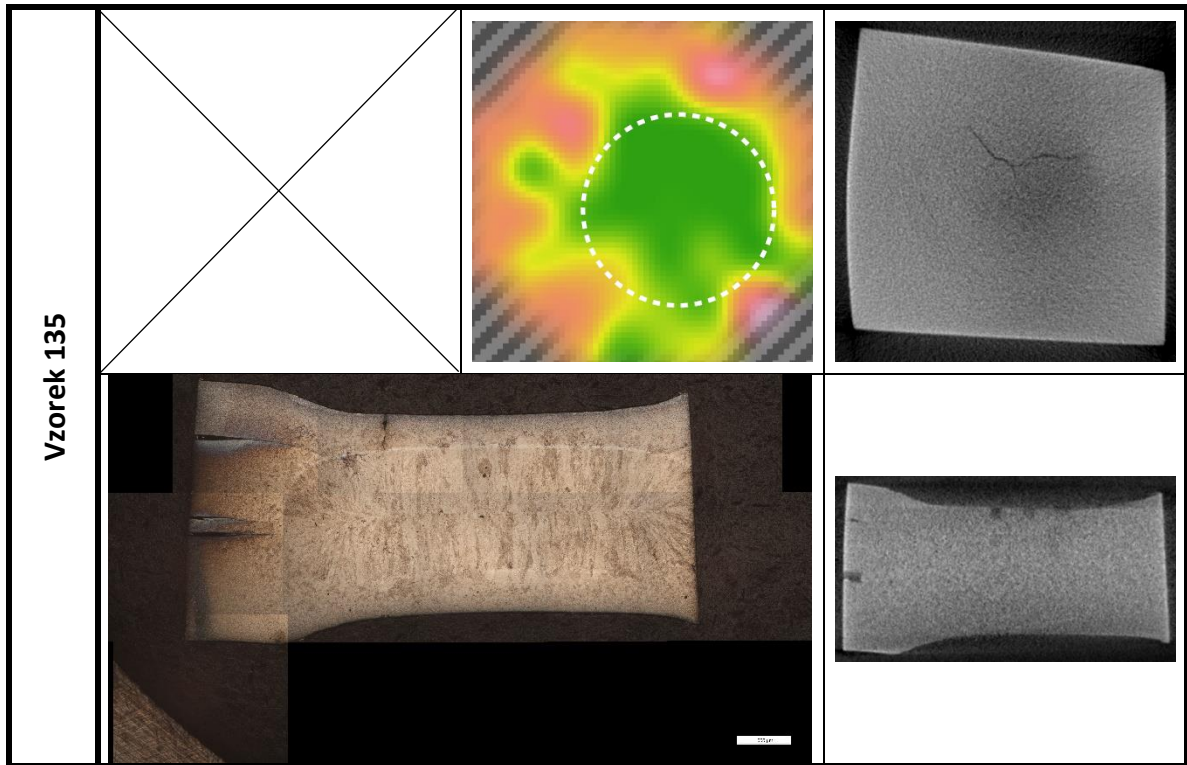
P5 Obrázek 14 - Vzorek 118 - UT, CT, metalografie



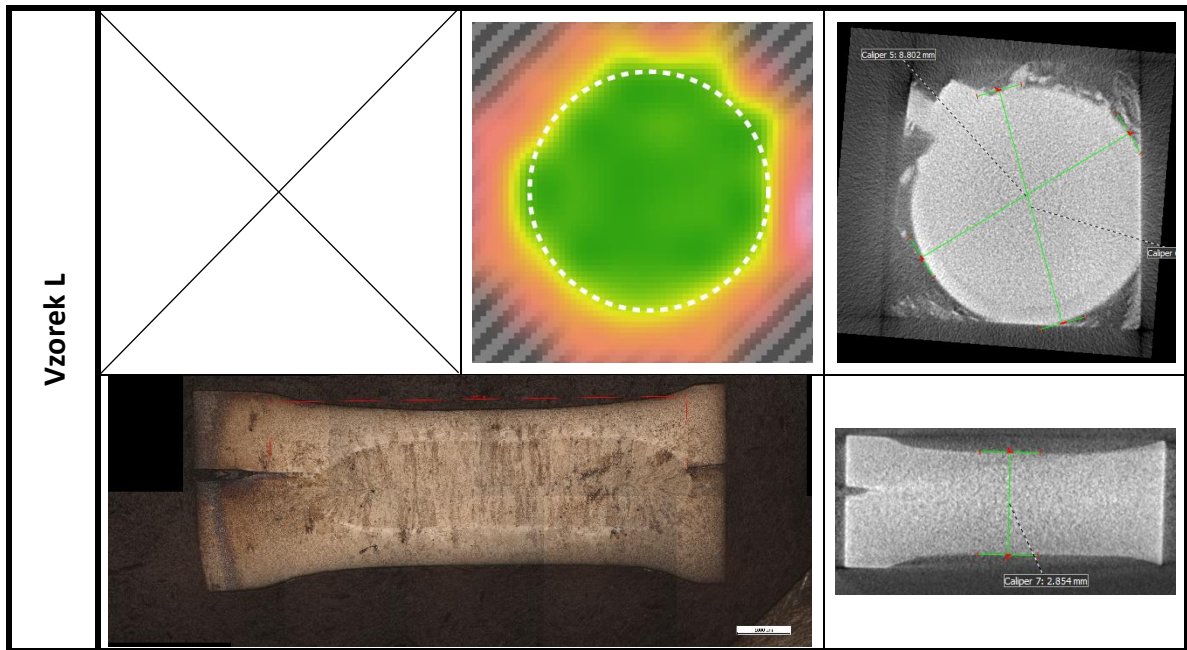
P5 Obrázek 15 - Vzorek 128 - UT, CT, metalografie



P5 Obrázek 16 - Vzorek 130 - UT, CT, metalografie



P5 Obrázek 17 - Vzorek 135 - UT, CT, metalografie



P5 Obrázek 18 - Vzorek L - UT, CT, metalografie