

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie



**Vyhodnocení přípustnosti vad odporových
bodových svarů pomocí termografického měření**

Evaluation of defects admissibility of resistance spot welds
using thermographic measurements

Diplomová práce

Vypracoval: Bc. Mach Pavel

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Studijní program: Strojní inženýrství

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

© 2019 ČVUT v Praze

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Mach	Jméno: Pavel	Osobní číslo: 438596
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávací katedra/ústav:	Ústav strojírenské technologie		
Studijní program:	Strojní inženýrství		
Studijní obor:	Výrobní a materiálové inženýrství		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vyhodnocení přípustnosti vad odporových bodových svarů pomocí termografického měření

Název diplomové práce anglicky:

Evaluation of defects admissibility of resistance spot welds using thermographic measurements

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popsat problematiku bezdotykového měření teploty, rovnice termografie, parametry termokamer.
- 2) Analyzovat nejčastější typy vad odporových svarů a příčiny jejich vzniku. Navrhnout technický postup pro možné opakované dosažení jednotlivých typů vad během bodového odporového svařování.
- 3) Pro zvolené typy vad bodových odporových svarů realizovat vždy dvě nezávislé množiny (trénovací a testovací data) teplotních (radiometrických) záznamů z termokamery.
- 4) Navrhnout vhodné příznaky pro klasifikaci: defektní/nedefektní spoj.
- 5) Diskuze dosažených výsledků. Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN ISO 18434-1. Monitorování stavu a diagnostika strojů - Termografie - Část 1: Všeobecné postupy, UNMZ, 2009
- [2] Kolaříková, M., etc.. Effect of resistance spot welding parameters on DC06 steel weld spot quality, METAL 2018
- [3] Forejtová, L., etc. Defect detection of resistance spot welds used in automotive industry by NDT, METAL 2018
- [4] Kadlec K. a kolektiv: Měření a řízení chemických, potravinářských a biotechnologických procesů, KEY Publishing
- [5] Sova, J., Kadlec, K. Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití, All For Power č. 01/2014
- [6] Vollmer M., Möllmann K. P.: Infrared Thermal Imaging. Wiley-VCH 2010, ISBN 978-3-527-40717-0
- [7] Hlaváč V., Sedláček M.: Zpracování signálů a obrazů, skriptum FEL ČVUT, Vydavatelství ČVUT, Praha 2009.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

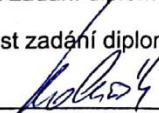
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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

Ing. Jan Sova, Workswell s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019** Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2019**

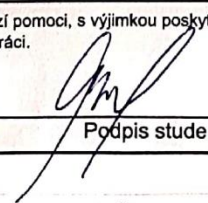
Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**

 doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	 doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	 prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „vyhodnocení přípustnosti odporových bodových svarů pomocí radiometrického měření“ vypracoval pod vedením doc. Ing. Ladislava Kolaříka Ph.D., IWE samostatně a použil jsem pouze podklady v přiloženém seznamu.

V Praze dne:.....

Podpis:.....

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi PH.D., IWE a kolektivu z ústavu strojírenské technologie fakulty strojní ČVUT v Praze, za odborné vedení při psaní mé diplomové práce, za poskytnutí odborných a cenných rad, také za trpělivost, ochotný a vstřícný přístup. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům společnosti Workswell s.r.o. za zapůjčení pracovních pomůcek a za poskytnutí instrukcí k jejich správnému užívání. V poslední řadě bych rád poděkoval mé nejbližší rodině za podporu po celou dobu mého studia.

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ustav strojírenské technologie

Název diplomové práce: Vyhodnocení přípustnosti vad odporových bodových svarů pomocí termografického měření

Autor diplomové práce: Bc. Mach Pavel

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

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D., IWE

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vyhodnocením přípustnosti vad odporových bodových svarů pomocí radiometrického měření pro ověření možnosti, je-li vyhodnocování tohoto svařovacího procesu pomocí tzv. online termografie proveditelné.

Práce je rozdělena do dvou částí. První část (teoretická) obsahuje stručný úvod do problematiky bezdotykového měření teploty, od fyzikálních principů po teoretické základy a využití této metody v praxi, dále teoretická část práce obsahuje stručný popis principu metody odporového bodového svařování. Druhá část (praktická) se zabývá samotným experimentem, obsahuje popis použitých zařízení, technologických metod a celkový rozbor postupného provedení experimentu. Závěr práce tvoří diskuze získaných výsledků a zjištěných doporučení.

Klíčová slova: bodové svary, termografie, DC05+ZE, kontrola kvality, vady

Rozsah diplomové práce: Počet stran: 108

Počet obrázků: 72

Počet tabulek: 41

Počet příloh: 1

Czech Technical University in Prague

Faculty of Mechanical Engineering

Institute of Manufacturing Technology

Name of diploma thesis: Evaluation of defects admissibility of resistance spot welds
using thermographic measurements

Autor of diploma thesis: Bc. Mach Pavel

Director of Institute: doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D., IWE

Supervisor: doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D., IWE

Abstract

The diploma thesis deals with the evaluation of the tolerance of resistance spot welds using radiometric measurements to verify the possibility of evaluating this welding process using online thermography feasible.

The thesis is divided into two parts. The first part (theoretical) contains a brief introduction to the issue of non-contact temperature measurement, from physical principles to theoretical foundations and the use of this method in practice. The theoretical part also contains a brief description of the principle of resistance spot welding. The second part (practical) deals with the experiment itself, contains a description of the equipment used, technological methods and an overall analysis of the progressive implementation of the experiment. The conclusion of the thesis consists of a discussion of the results and the recommendations.

Keywords: spot welds, thermography, DC05 + ZE, quality control, defects

Extent of bachelor thesis: Number of pages: 108

Number of pictures: 72

Number of tables: 41

Number of appendices: 1

Obsah

1	Úvod	10
2	Cíl práce	11
3	Problematika bezdotykového měření teploty	12
4	Fyzikální základy bezdotykového měření	13
4.1	Planckův vyzařovací zákon	14
4.2	Wienův posunovací zákon	15
4.3	Stefanův-Boltzmannův zákon	16
4.4	Kirchhoffovy zákony	18
5	Teoretické základy bezdotykového měření	20
5.1	Emisivita	20
5.1.1	Metody stanovení emisivity	23
5.2	odražená zdánlivá teplota	24
5.3	Parametry a vliv atmosféry	26
5.4	Postup měření	27
5.4.1	Rovnice termografie	28
6	Parametry termokamer	30
6.1	Teplotní rozsah	30
6.2	Spektrální rozsah	31
6.3	Přesnost stanovení teploty	32
6.4	Teplotní citlivost-NETD	33
6.5	Optické rozlišení a možnosti ostření	34
6.6	Měřicí a další funkce	36
6.6.1	Funkce bod (spot)	36
6.6.2	Funkce oblast	37
6.6.3	Funkce teplotní profil	38
6.6.4	Funkce izoterma	38

6.6.5	funkce delta.....	39
6.7	Další funkce	39
6.7.1	funkce teplotní prolnutí.....	40
6.7.2	Funkce obraz v obraze	41
6.7.3	Funkce MSX	41
6.7.4	Funkce blending.....	42
6.7.5	Funkce radiometrické video.....	42
7	Princip odporového bodového svařování	44
8	Analýza vad odporových bodových svarů.....	45
8.1	Příčiny vzniku	45
8.1.1	Odbočování svařovacího proudu	45
8.1.2	Kvalita povrchu plechů.....	46
8.1.3	Kvalita elektrických kontaktů.....	46
8.1.4	Nastavení parametrů svařování.....	47
8.2	Klasifikace vad.....	48
8.2.1	P1 – Trhliny	48
8.2.2	P2 – Dutiny	49
8.2.3	P3 – Pevné vměstky.....	50
8.2.4	P4 – Studené spoje.....	51
8.2.5	P5 – Vady tvaru a rozměru	52
8.2.6	P6 – Ostatní vady.....	54
9	Úvod do experimentu	55
9.1	Použitý materiál	55
9.2	Zkušební vzorek	56
9.3	Svařovací zařízení	56
9.4	Svařovací elektrody.....	58
9.5	Termokamera	59

9.6	Software	60
10	Provedení experimentu.....	62
10.1	Ultrazvuková zkouška.....	63
10.2	Mechanizovaná odlupovací zkouška.....	64
10.3	Technický postup pro opakované dosažení vad.....	65
10.4	Realizace záznamů z termokamery	74
10.5	Primární množina	74
10.6	Sekundární množina.....	82
10.7	Vyhodnocení	91
11	Závěr	94
12	Použité literární zdroje.....	98
13	Seznam obrázků.....	101
14	Seznam tabulek	104
15	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	106
16	Přílohy.....	107

1 Úvod

V posledních letech se díky pokročilému rozvoji v optice a elektronice značně rozšířilo používání termokamer pro bezdotykové měření teploty, termodiagnostiku, a termografii. Termokamery patří k nejmodernější termodiagnostické technice, jejich uplatnění je v současném průmyslu velmi široké, od diagnostiky strojního zařízení, kontroly elektrických instalací, monitorování žáruvzdorného obložení tavicích pecí, kontroly stavu tepelné instalace až po kontrolu výrobních procesů. [3]

Právě kontrola výrobního procesu metody odporového bodového svařování, které se tato diplomová práce věnuje se jeví jako vhodnou aplikací pro využití možností, které termografie přináší. Tato práce navazuje na několikaletý výzkum, který vznikl ve spolupráci ČVUT v Praze a společností Workswell s.r.o., která se zabývá oblastí strojového vidění a bezdotykového měření teploty. Z experimentálních výsledků minulých let se již prokázalo, že termografie je pro hodnocení kvality bodových odporových svarových spojů použitelná.

V současné době je pozornost věnována obecným algoritmům pro vyhodnocení svařovacích procesů, tyto algoritmy vycházejí ze stanovení trénovací množiny vytvořené na základě databáze nasnímaných termografických údajů. Snahou je tedy vytvořit software pro tzv. on-line nedestruktivní kontrolu svarových spojů díky kterému by bylo možné vyhodnotit způsobilost u všech svarových spojů přímo během výrobního procesu a získat tak okamžitou zpětnou vazbu pro případnou korekci procesních parametrů a faktorů souvisejících s výrobní technologií.

2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je pokusit se analyzovat nejčastější typy vad bodových odporových svarových spojů včetně příčin jejich vzniku. Dále pro vybrané analyzované typy vad realizovat dvě nezávislé množiny teplotních (radiometrických) záznamů z termokamery a pomocí těchto množin navrhnout vhodné příznaky pro klasifikaci stavu příslušného svarového spoje (defektní/nedefektní svarový spoj). Získaná termografická data se následně porovnají s výsledky provedených konvenčních technologických zkoušek pro kontrolu kvality. To vše pro ověření možnosti vyhodnocovat online termografií proces odporového bodového svařování.

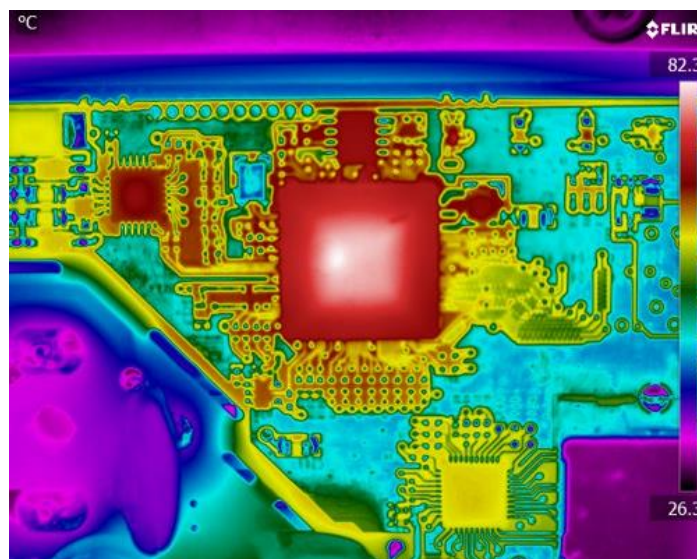
3 Problematika bezdotykového měření teploty

Problematikou bezdotykového měření teploty a případně následného využití získaných údajů (například pro účely vyhodnocování a testování) se zabývá technický obor zvaný termografie. [15],[16]

Tato práce je zaměřena na představení problematiky bezdotykového měření teploty za pomoci specializovaných měřicích přístrojů (tzv. termokamer).

Díky značnému rozvoji v elektronice a optice v posledních letech, se dnes termokamery běžně používají k bezdotykovému měření teploty prakticky ve všech odvětvích vědecko-technického výzkumu a průmyslu. Termokamera zaznamenává intenzitu tepelného záření vyzařovaného z povrchu měřených objektů. Na základě naměřené hodnoty intenzity vyzařování (a uživatelem zadaných parametrů) je termokamera schopna stanovit rozložení povrchové teploty zkoumaného objektu. [15],[16]

Výsledkem měření je tak obraz (2D signál), v němž jednotlivé pixely odpovídají povrchové teplotě. Tento obraz se nazývá termogram. Termogram si můžeme představit jako obdobu dnešních digitálních snímků, kdy ale jednotlivé pixely nenesou informaci o naměřeném jasu, ale o povrchové teplotě snímaného objektu. [15],[16]



Obrázek 1 - ukázka termogramu, kde jednotlivé pixely odpovídají povrchové teplotě objektu [16]

4 Fyzikální základy bezdotykového měření

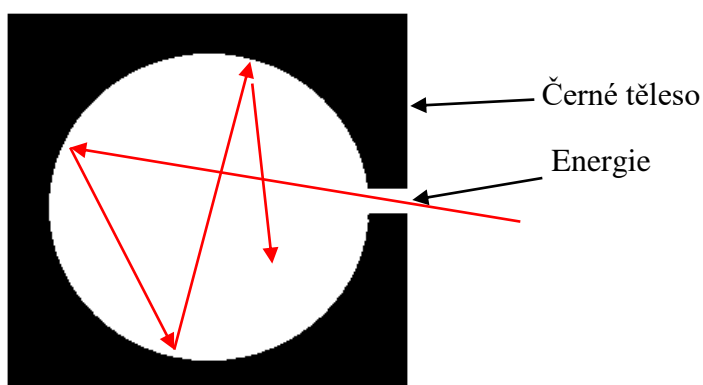
Pro podrobnější vysvětlení problematiky, pochopení principu a správné využití měřicí techniky při určování teploty pomocí bezdotykového měření, je důležitá znalost měřících metod a jejich teoretických základů. Samotný základ bezdotykového měření vychází ze schopnosti těles vyzařovat energii v podobě infračerveného záření. [1],[3]

Při bezdotykovém měření pomocí termokamery se tedy teplota vyhodnocuje z intenzity infračerveného záření vyzařovaného měřeným objektem, toto záření je optickým systémem soustředěno na vhodný detektor¹, jehož elektrický signál je dále zpracováván. [1],[3]

Pro teoretický popis dějů, které probíhají při tomto vyzařování se používá idealizovaný objekt tzv. černé těleso. Toto těleso si lze představit jako objekt, který při dané teplotě vyžáří maximální množství energie, je schopné vyzařovat na všech vlnových délkách a veškerou na něj dopadající energii naopak pohltí. [1],[5]

Černé těleso lze realizovat jako velký prostor s malým otvorem, přes tento otvor vstupuje energie do vnitřku tělesa, zde se mnohokrát odrazí, každý odraz pohltí část energie, což vede k jejímu postupnému pohlcení. [5]

Grafické zobrazení principu černého tělesa je na obrázku č. 2.



Obrázek 2 - model černého tělesa

¹ Detektor – plošný termokamerový senzor, který převádí infračervené záření na elektrický signál.

Intenzita tohoto emitovaného záření je však závislá na teplotě a její vlnová délka se liší. Pro určení vzájemného vztahu mezi těmito a dalšími veličinami slouží fyzikální zákony týkající se záření těles. [3],[4]

1. Planckův vyzařovací zákon
2. Wienův zákon
3. Stefanův-Boltzmannův zákon
4. Kirchhoffovy zákony

4.1 Planckův vyzařovací zákon

Planckův zákon vyzařování popisuje spektrální hustotu intenzity vyzařování černého tělesa jako funkci teploty a vlnové délky.

Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování M_{λ_0} na vlnové délce λ a na teplotě černého tělesa T , se počítá ze vztahu č. 1. [1],[4],[8]

$$M_{\lambda_0} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp \frac{hc}{k\lambda T} - 1 \right)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)} \quad [W \cdot m^{-3}] \quad (1)$$

Kde:

M_{λ_0} [$W \cdot m^{-3}$] ... *spektrální hustota zářivého toku*

T [K] ... *termodynamická teplota objektu*

λ [m]... *vlnová délka záření*

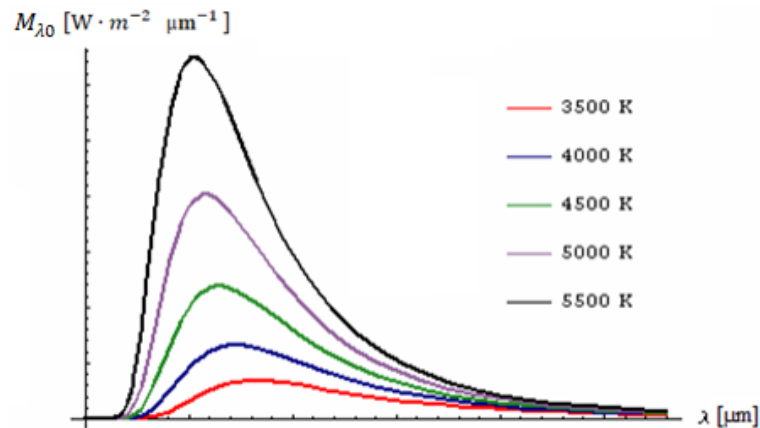
$h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ [J·s] ... *Planckova konstanta*

$k = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ [J·K⁻¹] ... *Boltzmannova konstanta*

$C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ [$W \cdot m^{-2}$] ... *první Planckova vyzařovací konstanta*

$C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ [K·m] ... *druhá Planckova vyzařovací konstanta*

Tento zákon lze vyjádřit také graficky (obr. č. 3). Z této závislosti je zřejmé, že při vzrůstající teplotě absolutně černého tělesa se zvětšuje spektrální hustota a vrcholová hodnota se posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. Když je teplota tělesa vyšší, křivka dosahuje svého maxima u menších vlnových délek. [1],[4],[8]



Obrázek 3 - závislost vyzařování černého tělesa podle Planckova zákona [7]

Pozn.: Planckův vyzařovací zákon je zákon, ze kterého plynou následující dva zmiňované zákony, (Wienův posunovací zákon a Stefanův-Boltzmannův zákon).

4.2 Wienův posunovací zákon

Konstatuje, že s rostoucí teplotou se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám. Wienův posunovací zákon udává vlnovou délku, při které je záření maximální a je definován vztahem č. 2. [1],[4],[8]

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}] \quad (2)$$

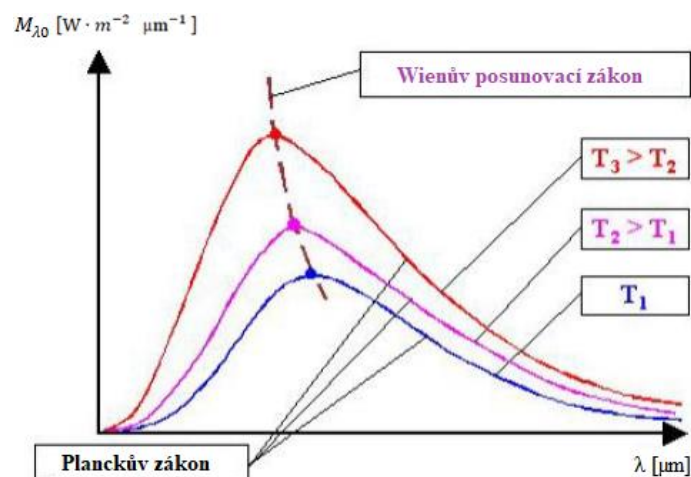
Kde:

$\lambda_{max} [\mu\text{m}]$... vlnová délka při maximálním vyzařování

$b = 2,898 [\text{mmK}]$... Wienova konstanta

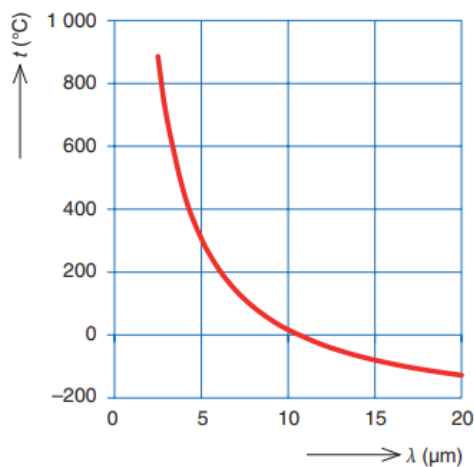
$T [\text{K}]$... termodynamická teplota

Z daných skutečností tedy vyplývá, že čím teplejší těleso, tím vyzařuje na kratších vlnových délkách a vyšších frekvencích viz obrázek č. 4.[9]



Obrázek 4 - zobrazení Wienova zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce záření pro černé těleso [4]

Grafická závislost (vytvořená pomocí Wiensova posunovacího zákona) vypočítaných teplot odpovídajících maximům vlnových délek pro rozsah od 2,5 do 20 μm , je zobrazen na obrázku č. 5.



Obrázek 5 - teplota odpovídající maximální vlnové délce dle Wienova zákona [1]

4.3 Stefanův-Boltzmannův zákon

Říká, že celková intenzita zářivého toku každého tělesa, které má nenulovou absolutní teplotu záření, je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty. Tedy vyjadřuje intenzitu vyzařování tělesa na všech vlnových délkách jako funkci absolutní teploty. [1],[4],[8]

Vztah pro dokonale černé těleso:

$$M_0 = \sigma T^4 [W \cdot m^{-2}] \quad (3)$$

Vztah pro šedé těleso:

$$M_0 = \varepsilon \sigma T^4 [W \cdot m^{-2}] \quad (4)$$

Kde:

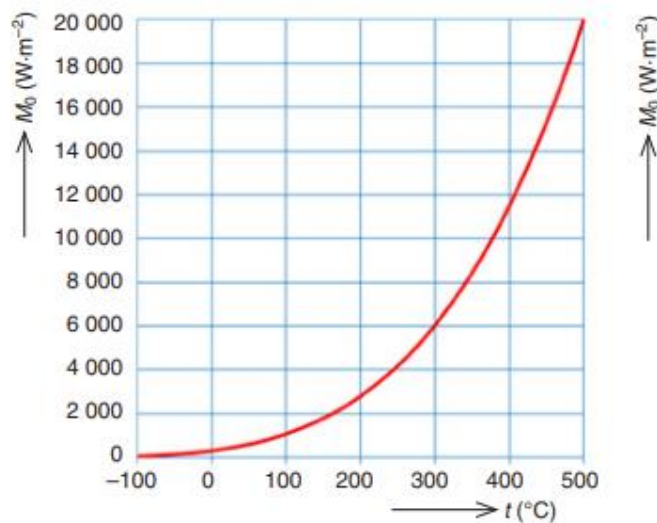
$M_0 [W \cdot m^{-2}]$... celková intenzita zzařivého toku

ε ... emisivita povrchu tělesa

$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$... Stefan – Boltzmannova konstanta

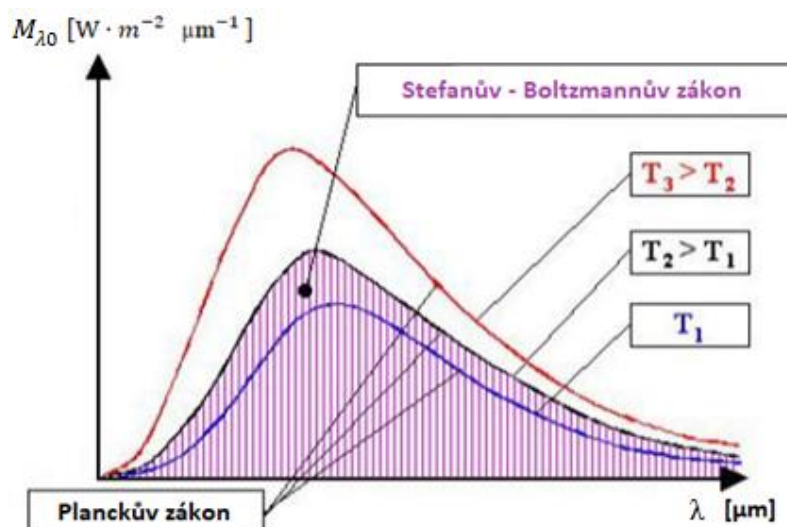
$T [K]$... termodynamická teplota

Grafickou závislost celkové intenzity zářivého toku M_0 na teplotě t , lze vypočítat dle vztahu č. 3, viz obrázek č. 6. [1]



Obrázek 6 – závislost intenzity vyzařování černého tělesa [1]

Celková intenzita zářivého toku lze také vyjádřit graficky, a to plochou pod křivkou vytvořenou podle Planckova zákona odpovídající dané teplotě. Viz obrázek č. 7. [1],[9]



Obrázek 7 - zobrazení Stefanova - Boltzmannova zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce záření pro černé těleso [4]

4.4 Kirchhoffovy zákony

Předchozí fyzikální zákony jsou odvozeny a pracují na principu černého tělesa, tzv. idealizovaného objektu. Skutečná tělesa ovšem vyzařují i pohlcují méně tepelného záření než černé těleso.

První zákon termodynamiky říká, dopadá-li na povrch takového tělesa záření s intenzitou E , část záření se od povrchu odrazí (E_r), část záření je absorbována (E_a) a část je propuštěna (E_p). Potom můžeme určit rovnici zachování energie: [1],[2],[10]

$$E = E_r + E_p + E_a \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (5)$$

Kde: E ... dopadající záření $[W \cdot m^{-2}]$

E_r ... odražené záření $[W \cdot m^{-2}]$

E_p ... propuštěné záření $[W \cdot m^{-2}]$

E_a ... pohlcené záření $[W \cdot m^{-2}]$

Vydělíme-li tuto rovnici intenzitou dopadajícího záření E , dostaneme tři poměry intenzit záření, které se nazývají:

$$\text{Reflektance}^2 \quad \rho = \frac{E_r}{E}$$

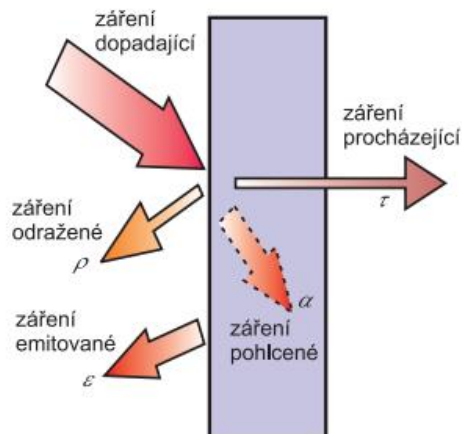
$$\text{Absorbance}^3 \quad a = \frac{E_a}{E}$$

$$\text{Transmitance}^4 \quad \tau = \frac{E_p}{E}$$

Rovnici zachování energie (5) pak lze přepsat do tvaru který prezentuje první Kirchhoffův zákon:

$$\rho + a + \tau = 1 \quad (6)$$

První Kirchhoffův zákon tedy říká, že součet reflektance, absorbance a transmitance je roven jedné.



Obrázek 8 - interakce záření a tělesa [1]

Druhý Kirchhoffův zákon říká, že objekt je tak dokonalým zářičem, jak dovede záření pohlcovat.

$$\varepsilon = a \quad (7)$$

Kde:

ε *emisivita* [-]

a *absorbance (pohltivost)*

² Reflektance = odrazivost, (poměr odraženého zářivého toku k dopadajícímu).

³ Absorbance = pohltivost, (poměr pohlceného zářivého toku k dopadajícímu).

⁴ Transmitance = propustnost, (poměr prostupujícího zářivého toku k dopadajícímu).

5 Teoretické základy bezdotykového měření

Znalost teoretického základu a fyzikálních zákonů termografie je pro správné a přesné stanovení měřené veličiny velmi důležité, Problematika bezdotykového měření se však netýká jen znalosti fyzikálních dějů, pro dosažení správných hodnot, co nejvyšší přesnosti a pro využití všech předností, které tato technika nabízí, je důležité znalost faktorů, které do měření vstupují a ovlivňují konečný výsledek.

Při práci s termokamerou je nejdůležitější si uvědomit, že termokamera neměří teplotu přímo, ale dle tzv. rovnice termografie, (či dle jejího zjednodušeného vztahu). Naměřenou teplotu stanoví výpočtem na základě naměřené intenzity tepelného záření a zadaných parametrů měření (které se stanoví doplňkovými měřeními nebo jsou kvalifikovaně odhadnuty). Pro správné určení povrchové teploty měřeného objektu je tedy nezbytně důležité správné nastavení parametrů měření, které vyplývají z rovnice termografie, prakticky jde o následující parametry: [15]

1. Emisivitu [-]
2. Odraženou zdánlivou teplotu [°C]
3. Atmosférickou teplotu [°C] a relativní atmosférickou vlhkost [%]
4. Vzdálenost mezi měřícím přístrojem (termokamerou) a povrchem měřeného objektu [m]

5.1 Emisivita

Emisivitu si lze představit jako efektivitu vyzařování daného tělesa, tedy definuje schopnost objektu vyzařovat teplo. [1],[11]

Emisivita je obecně definována jako poměr intenzity vyzařování daného tělesa ku intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa. [1],[3],[11]

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} \quad [-] \quad (8)$$

kde:

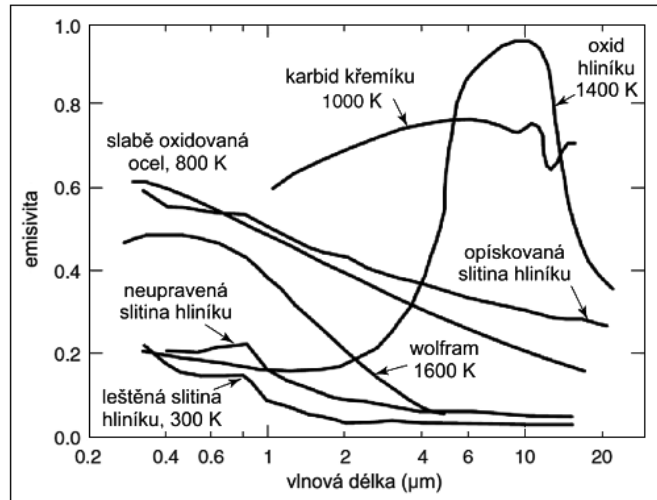
ε emisivita [-]

M ... intenzita vyzařování daného tělesa

M_0 ... intenzita vyzařování černého tělesa

Emisivita látek, nabývá hodnot (0-1), nejvyšší emisivita je u tzv. černého tělesa (viz obrázek č. 2) které má hodnotu emisivity 1. U reálného tělesa je vždy emisivita $\varepsilon < 1$.

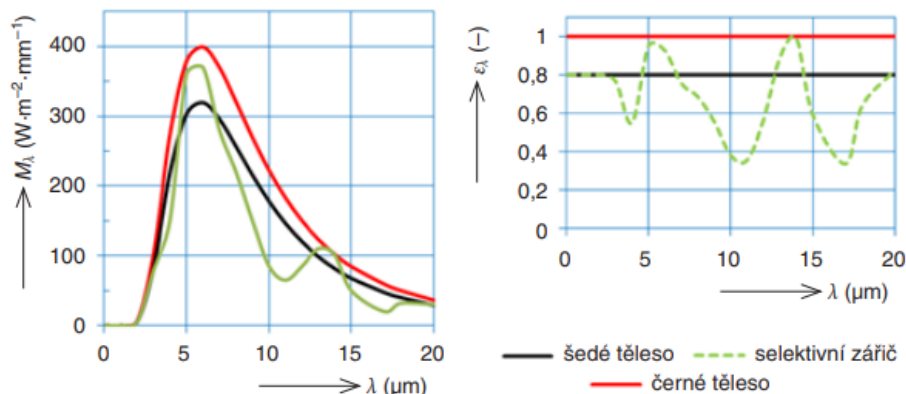
Emisivita závisí obecně na vlnové délce a na teplotě, v praxi je však emisivita ovlivněna také skutečným úhlem pozorování, materiál a kvalitou povrchu daného objektu. [1],[3],[11]



Obrázek 9 - graf závislosti emisivity na vlnové délce pro dané materiály [15]

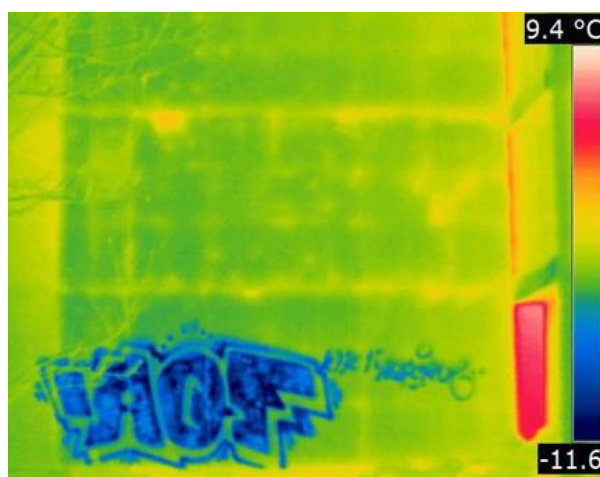
Tělesa, která mají pro různou vlnovou délku různou emisivitu jsou tzv. selektivní zářiče. Je však množství těles, jejichž emisivitu můžeme v značném rozsahu vlnových délek považovat za konstantní. Taková tělesa jsou označována jako šedá, tato těla jsou z hlediska bezdotykového měření nejvýhodnější. [1],[3],[11]

Rozdíly emisivit a vyzařování černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče jsou znázorněny graficky na obrázku č. 10.



Obrázek 10 - závislost vyzařování a emisivity na vlnové délce tří základních druhů těles (zářičů) [1]

Velikost emisivity daného měřeného povrchu výrazným způsobem ovlivňuje výsledky termografického měření, je-li nastavena nesprávně, naměřené hodnoty mohou být zavádějící, viz obrázek č. 11. Kde teplota povrchu domu je přibližně homogenní, na termogramu však nápis vykazuje až o 5°C chladnější teplotu. Tato chyba je způsobena odlišnou hodnotou emisivity nápisu a zdiva.



Obrázek 11 - vliv emisivity povrchu na naměřené hodnoty [3]

Informativní hodnoty pro emisivitu zkoumaného povrchu jsou dohledatelné, při měření se tedy vychází ze znalosti měřeného objektu, ke kterému se následně v tabulce dohledá příslušná hodnota emisivity. Správná tabulka by vždy měla obsahovat také údaje o teplotě a vlnové délce viz tabulka č. 1. [1],[3],[11]

Tabulka 1 - příklady informativní hodnoty emisivity pro vybrané materiály [1]

Pro vlnové délky v rozmezí: $\lambda = 7 - 14 \mu\text{m}$		
Charakteristika povrchu	Teplota - t [°C]	Emisivita - ε [-]
Voda	20	0,96
Papír	20	0,93
Dřevo	20	0,8-0,9
Měď (leštěná)	100	0,03
Lidská pokožka	32	0,98
Cihla	20	0,93

5.1.1 Metody stanovení emisivity

I když existuje celá řada metod, jak stanovit emisivitu určitého povrchu, jsou tyto metody často vhodné pouze pro měření v laboratoři se speciálním vybavením. Pro správné nastavení či ověření emisivity v terénu se však dají využít i přímé metody jakými jsou například: [3]

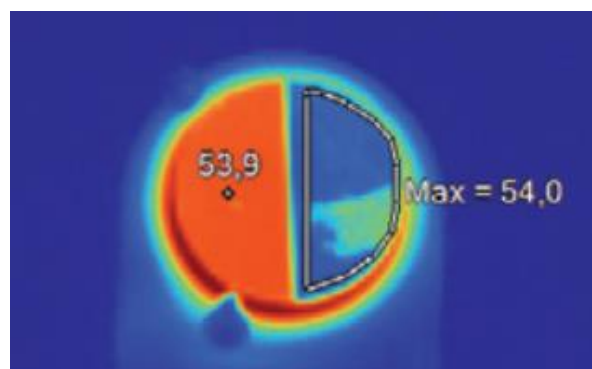
1. Využití termočlánku umístěného v blízkosti snímané plochy.
2. Využití porovnání emisivit.
3. Vytvoření otvoru ve vzorku.

5.1.1.1 Využití termočlánku umístěného v blízkosti snímané plochy

Při této metodě se materiál ohřeje na známou teplotu, kterou za pomoci termočlánku umístěného v blízkosti snímané plochy můžete velmi přesně určit. Potom se zkoumaný předmět zaměří termokamerou (s prozatím chybně nastavenou či přibližnou emisivitou) a vyhodnotí se naměřená teplota. Dále se na samotné termokameře či softwaru manuálně mění emisivita, dokud naměřená teplota neodpovídá teplotě změřené termočlánkem.[12],[13]

5.1.1.2 Využití porovnání emisivit.

Metoda spočívá v umístění (nalepení) na povrch měřeného objektu speciální plastovou samolepku se známou emisivitou. Termokamerou se následně změří teplota samolepky s touto emisivitou. Následně se samolepka z měřeného objektu odstraní (v některých případech nemusí) a opět se změří povrchová teplota. Následuje přenastavení emisivity tak, aby se naměřená teplota shodovala s teplotou prvotní. Hodnota emisivity, při které se dané teploty shodují, je hodnota emisivity měřeného povrchu. [12],[13]



Obrázek 12 - stanovení emisivity neznámého materiálu pomocí vyrovnání teplot [12]

Pozn.: jestliže je možné měřený povrch natřít, lze tuto metodu využít i za pomoci matné černé barvy se známou emisivitou.

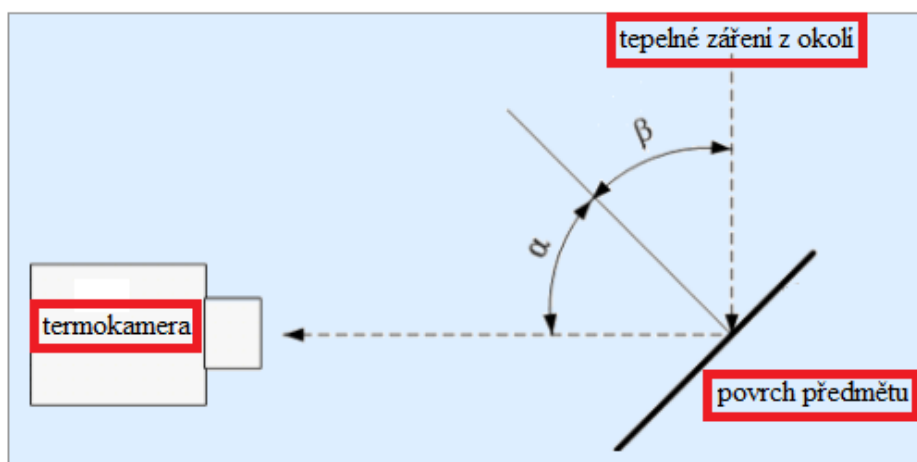
5.1.1.3 Vytvoření otvoru ve vzorku.

Pro využití této metody se do vzorku musí vyvrtat otvor, jehož délka bude asi pětinasobkem jeho průměru. Tím v podstatě došlo k vytvoření černého tělesa uvnitř otvoru a dno otvoru tak má emisivitu rovnu jedné. Teplota naměřená termokamerou na dně otvoru tak odpovídá skutečné teplotě (při nastavení $\varepsilon=1$). Následuje měření na povrchu tělesa a při postupném snižování emisivity na kameře dojde ke shodě naměřených teplot v otvoru a na povrchu. [12],[13]

Pozn.: tento způsob měření je vhodný pro materiály s vysokou tepelnou vodivostí, je zde nutný předpoklad, že vzorek bude mít stejnou (velice podobnou) teplotu v místě dna otvoru a na povrchu vzorku. Dále lze tuto metodu využít jen u vzorků, kde vytvořením zmiňovaného otvoru nedojde k jejich znehodnocení.

5.2 odražená zdánlivá teplota

Odraženou zdánlivou teplotu je možné charakterizovat jako okolní tepelné záření odrážející se od povrchu měřeného objektu, které termokamera není schopná rozlišit od vlastního tepelného záření objektu. Z toho důvodu je zapotřebí odražené tepelné záření stanovit a jeho hodnotu zadat do termokamery, která provede korekci. [3],[11],[15]



Obrázek 13 - princip působení odražené zdánlivé teploty na detektor termokamery [15]

Na obrázku č. 13, dopadá na povrch předmětu tepelné záření z okolí, odtud se odrazí do termokamery a v detektoru kamery je toto odražené záření přičteno k vlastnímu tepelnému záření objektu, což způsobí chybu měření. [3],[11],[15]

Praktická ukázka vlivu odražené zdánlivé teploty je na obrázku č. 14, povrch hladké skleněné tabule je značně odrazivý, zaměříme-li tento povrch termokamerou, na termogramu zřetelně vidíme odraz tepelného záření okolních objektů (člověka), toto záření společně s vlastním tepelným zářením skleněné tabule tak vytváří výsledný obraz (termogram) a zkresluje výsledky měření. [15]



Obrázek 14 - vliv odražené zdánlivé teploty na naměřené hodnoty [15]

Čím větší je odrazivost povrchu, tím větší je vliv odražené zdánlivé teploty a odrazivost povrchu je tím větší, čím menší je emisivita, viz rovnice č. 9.

$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (9)$$

kde:

ρ ... odrazivost

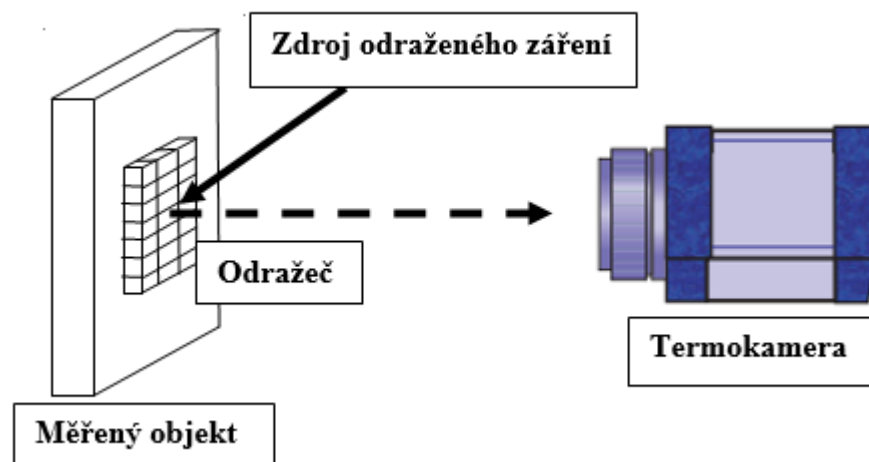
ε ... emisivita [-]

V praxi je tedy méně obtížné měřit povrchy objektů s vysokou emisivitou, z toho důvodu se volí spektrální rozsah termokamer tak, aby v něm byla hodnota emisivity co největší. Stanovení zdánlivé odražené teploty lze například metodou odrazu, která vychází z využití IR⁵ odražeče (reflektoru) což je např. „zmačkaná“ a opětovně narovnaná hliníková fólie, která se poté upevní (lesklou stranou nahoru) na rovnou desku. [3], [11], [15]

⁵ IR - Infrared (infračervené záření)

Takto připravený IR odražeč se poté umístí rovnoběžně před měřený povrch, viz obrázek č. 15. IR odražeč má vysokou odrazivost, a proto na něm lze pozorovat odraz tepelného záření, které by jinak dopadlo na povrch našeho měřeného předmětu. [3]

Emisivita v termokameře je při měření nastavena na hodnotu ($\epsilon = 1$) a vzdálenost měřeného objektu od termokamery na hodnotu 0. Zdánlivá teplota, která je při tomto měření naměřena na povrchu IR odražeče je hledanou, od objektu se odrážející zdánlivou teplotou. [3]



Obrázek 15 - schéma principu metody odrazu

Pozn.: při vysokých emisivitách ($\epsilon > 0,95$) lze v některých situacích určit odraženou zdánlivou teplotu odhadem a na základě zkušeností technika.

5.3 Parametry a vliv atmosféry

Atmosféra je jednak sama zdrojem tepelného záření, a navíc záření z měřeného povrchu objektu utlumuje viz rovnice č. 10. Samotný vliv atmosféry na přesnost měření není tak problematický, parametry jako jsou atmosférická teplota, relativní atmosférická vlhkost a vzdálenost mezi povrchem měřeného objektu a termokamerou se do termokamery (či programového vybavení) nastaví tak, aby vliv atmosféry korigovaly. Obecně lze říct, že čím vzdálenější objekty jsou měřeny tím vliv atmosféry narůstá. [3],[11],[15]

Stanovení atmosférické teploty, atmosférické vlhkosti a vzdálenosti mezi termokamerou a měřeným objektem není v současné době obtížné, pro tyto účely slouží a jsou běžně dostupné vhodné měřicí přístroje. [3]

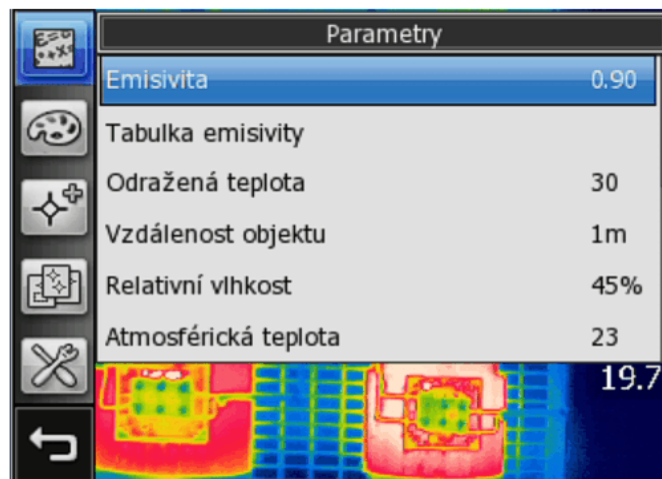
Při nastavování těchto parametrů je ve většině případů uvažována atmosféra za běžných podmínek, tj. při normálním atmosférickém tlaku s homogenní teplotou, s běžným chemickým složením bez přítomnosti dalších prvků apod. Tyto podmínky však nemusí být vždy splněny.[3]

Pozn.: intenzita tepelného záření atmosféry je závislá především na její teplotě a složení. Naopak tlumící účiny atmosféry jsou závislé na relativní vlhkosti a vzdálenosti.

5.4 Postup měření

Zcela zásadní pro získání správných výsledků a závěru je dodržování správného postupu měření. Jelikož je konečný výsledek měření závislý na znalosti měřeného objektu a velkého množství okolních faktorů, není možné sepsat jeden obecně platný postup pro veškerá měření. [11]

Vybavení termokamery vždy umožňuje nastavit emisivitu a odraženou zdánlivou teplotu. Lépe vybavené termokamery (pro vědecko-výzkumné aplikace) umožňují nastavit i parametry atmosféry, (atmosférickou teplotu, relativní atmosférickou vlhkost a vzdálenost měřeného objektu).[15]



Obrázek 16 - nastavení měřených parametrů (termokamera FLIR T440) [15]

Správné zjištění a nastavení příslušných parametrů nezbytných k tomu, aby se předešlo vzniku chyb a dosáhlo se důvěryhodných výsledků měření, je tedy na kvalifikované obsluze.

V praxi se tedy jedná o nutnost znalosti pojmů jako je: emisivita a odražená zdánlivá teplota, také si uvědomovat možné vlivy atmosféry, případně chyby vnesené samotnou termokamerou či zvoleným postupem měření.

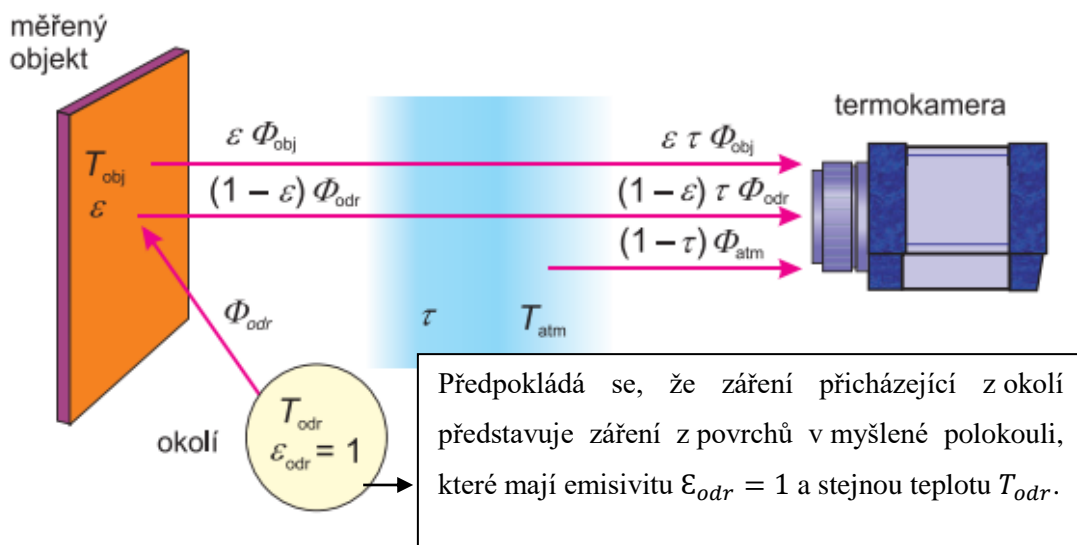
5.4.1 Rovnice termografie

Rovnice termografie se vyznačuje tím, že dává do souvislosti všechny výše zmíněné faktory. Udává tedy, že záření, které dopadá na detektor termokamery je součtem tepelného záření vyzářeného povrchem měřeného objektu, tepelného záření odraženého od povrchu měřeného objektu a tepelného záření atmosféry, která je v prostoru mezi měřeným objektem a termokamerou. [3],[8],[15]

Dále také zahrnuje vliv útlumu atmosféry, která utlumuje jak tepelné záření vyzářené povrchem měřeného objektu, tak tepelné záření okolních těles, které je od povrchu měřeného objektu do termokamery odraženo. Situaci ilustruje obrázek č. 17. [3],[15]

Při termografickém měření snímá tedy termokamera záření nejen samotného objektu, ale také záření z okolí, které se odráží z povrchu měřeného objektu do termokamery, navíc na obě tato záření do jisté míry působí atmosféra v úseku mezi termokamerou a měřeným objektem.[3],[8],[14],[15]

Schéma této situace je na obrázku č. 17.



Obrázek 17 - průběh termografického měření [3]

Kde:

T_{obj} ... teplota měřeného objektu [$^{\circ}\text{C}$]

Φ_{obj} ... zářivý tok z objektu [W m^{-1}]

$\varepsilon\tau\Phi_{obj}$...zářivý tok z objektu zeslabený průchodem atmosférou

Φ_{odr} ...odražený zářivý tok z okolních zdrojů

$(1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr}$... odražený zářivý tok z okolních zdrojů zeslabený atmosférou, kde $(1 - \varepsilon)$ vyjadřuje odrazivost objektu.

T_{atm} ...teplota atmosféry

$(1 - \tau)\Phi_{atm}$...zářivý tok emitovaný atmosférou, kde $(1 - \tau)$ vyjadřuje emisivitu atmosféry.

τ ... propustnost

Z daných údajů lze nyní sestavit rovnici (za předpokladu že uvažujeme plnou transparentnost optiky termokamery a zářivý tok optických komponentů je zanedbatelný) pro celkový zářivý tok (Φ_{celk}), který dopadá na detektor termokamery, tzv rovnici pro měření termokamerou. [3],[8],[14]

$$\Phi_{celk} = \varepsilon\tau\Phi_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr} + (1 - \tau)\Phi_{atm} \quad [\text{W}] \quad (10)$$

Rovnici lze zjednodušit tak že zanedbáme vyzařování atmosféry a detektoru termokamery.

$$\Phi_{celk} = \varepsilon\tau\Phi_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr} \quad [\text{W}] \quad (11)$$

Kde:

$\varepsilon\tau\Phi_{obj}$... zářivý tok z objektu jehož teplotu je třeba určit

$(1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr}$... parazitní zářivý tok dopadající na detektor jenž je třeba korigovat

Pro úplný a přesný výpočet je však potřeba do termokamery zadat parametry měření: emisivitu objektu (ε), zdánlivou odraženou teplotu (T_{odr}), teplotu atmosféry (T_{atm}) a propustnost atmosféry (τ), tyto hodnoty je nutné korigovat podle skutečné situace.[3],[8],[14]

6 Parametry termokamer

Stejně jako jiné měřicí přístroje, mají termokamery řadu určitých parametrů, které mají vliv jak na samotnou použitelnost (ne všechny termokamery jsou vhodné pro dané aplikace), tak na kvalitu a spolehlivost naměřených výsledků a v poslední řadě samozřejmě na cenu. [11]

Základní parametry, které ovlivňují výše zmiňované faktory a které by se měli vždy při výběru termokamery zvážit jsou:

1. Teplotní rozsah
2. Spektrální rozsah
3. Přesnost stanovení teploty
4. Teplotní citlivost
5. Optické rozlišení a možnosti ostření
6. Měřicí a další funkce

6.1 Teplotní rozsah

O tom, jakou nejnižší a jakou nejvyšší hodnotu teploty je daná termokamera schopná změřit vypovídá její teplotní rozsah. Obecně lze říct, že v současné době jsou přístroje pro bezdotykové měření teploty schopny měřit teplotu v rozmezí -40 až +3500°C. [2],[11]

Měřit v tomto celém rozmezí teplot pouze jedním přístrojem lze však zcela výjimečně a rozhodně ne v rámci jednoho měřicího rozsahu.

Jako příklad lze uvést termokameru Flir T640 která měří v teplotním rozmezí -40 až +2000°C a to ve třech měřicích rozsazích -40 až +150°C, 100 až +650°C a 300 až +2000°C. Přičemž po pořízení snímku (termogramu) již není zvolený rozsah možné změnit. [2],[11]



Obrázek 18 - termokamera Flir T640 [17]

6.2 Spektrální rozsah

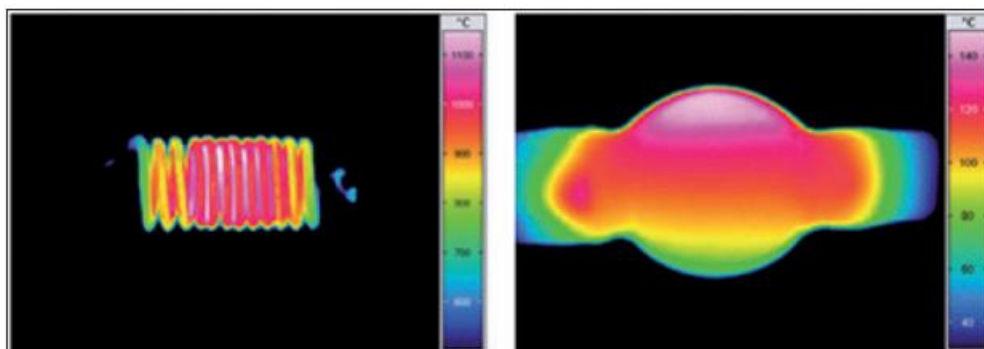
Rozsah vlnových délek, ve kterém je termokamera schopna zaznamenávat tepelné záření se nazývá spektrální rozsah. Největší vliv na spektrální rozsah mají jednak parametry optiky (mají funkci filtru, propouští záření v určitém rozsahu vlnových délek) a jednak detektor dané termokamery (konkrétně jeho citlivost). [2],[11]

Většina dostupných termokamer je v současné době vybavena tzv. tepelným detektorem. Spektrální rozsah těchto termokamer je v rozmezí vlnových délek 7 až 14 μm . [2],[11]

Existují však i termokamery s jinými spektrálními rozsahy (2 až 5,5 μm , 8 až 9,4 μm , apod.), tyto termokamery obsahují fotonové detektory, které jsou sice citlivější než tepelné, ale vyžadují chlazení což se projeví na ceně dané termokamery. [2],[9],[11]

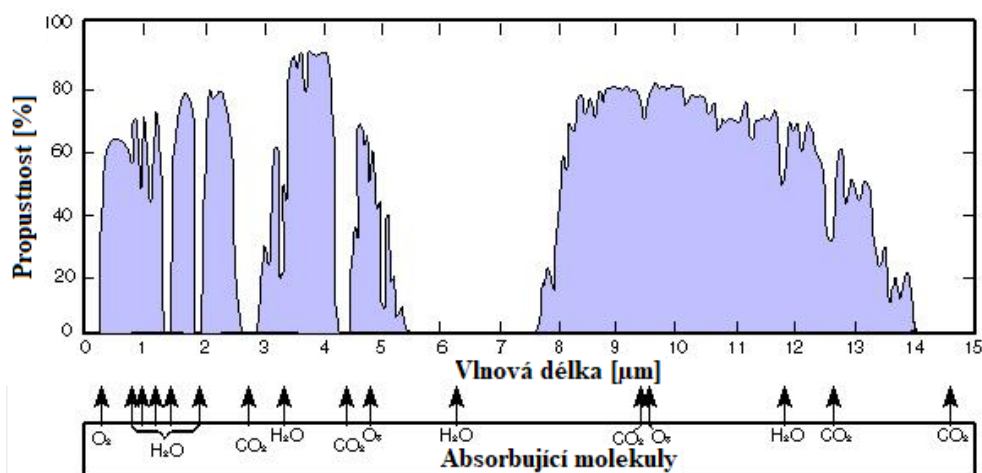
Při volbě spektrálního rozsahu termokamery vycházíme především z teploty a dalších vlastností měřeného objektu (propustnost, odrazivost a emisivita). V praxi je třeba zvolit spektrální rozsah takový, aby emisivita v tomto rozsahu nabývala co největší hodnoty. [2],[9],[11]

Obrázek č. 19, ilustruje praktickou ukázkou využití termokamer s možností změnit spektrální rozsah. Stejnou termokamerou byla změřena teplota vlákna žárovky (obr. vlevo), protože sklo je ve zvoleném rozsahu vlnových délek propustné. Naproti tomu po změně spektrálního rozsahu termokamery lze změřit teplotu na povrchu skla (baňky žárovky) protože ve spektrálním rozsahu použitým při tomto měření se sklo jeví jako nepropustné (obr. vpravo). [2],[9],[11]



Obrázek 19 - teplota na povrchu skla (vpravo) a teplota vlákna žárovky které je sklem obklopeno (vlevo) [2]

Při měření termokamerou na větší vzdálenost jsou jednotlivé spektrální rozsahy omezeny útlumem atmosféry, zdrojem tohoto útlumu jsou především molekuly vody, kyslíku a oxidu uhličitého. [11]



Obrázek 20 - vliv útlumu atmosféry na spektrální rozsah [11]

6.3 Přesnost stanovení teploty

V současné době je u termokamer přesnost $\pm 2^\circ\text{C}$ nebo $\pm 2\%$ z naměřené hodnoty považována za standartní, přičemž se orientujeme podle větší z obou hodnot. V praxi to znamená že pokud při měření teploty naměříme 20°C (s termokamerou s přesností $\pm 2^\circ\text{C}$ nebo $\pm 2\%$) je výsledná hodnota $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Ovšem pokud stejnou termokamerou naměříme teplotu 200°C , je výsledná hodnota měření $200^\circ\text{C} \pm 4^\circ\text{C}$ (2% z 200°C). [2],[11]

Nejpřesnější a také nejdražší termokamery jsou schopné měřit s přesností $\pm 1^\circ\text{C}$ nebo $\pm 1\%$, lze se také setkat s termokamerami s větší chybou měření, hodnota přesnosti

stanovení teplot u těchto termokamer může být např. $\pm 5^\circ\text{C}$ nebo $\pm 5\%$ v běžné praxi se s nimi však setkáme jen velmi výjimečně. [2],[11]

Uvedené hodnoty přesnosti platí pouze pro kalibrované přístroje, chyba měření může být i podstatně větší je-li přístroj již delší dobu využíván (je delší dobu po kalibraci). Kalibrace přístrojů by měla být provedena jedenkrát za jeden až dva roky. [2],[11]

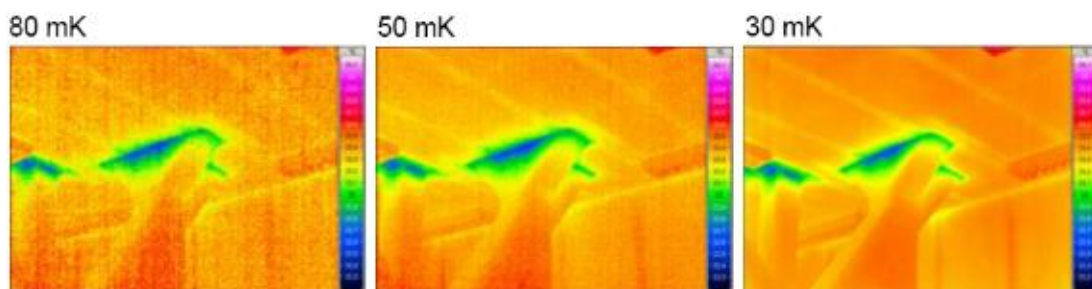
6.4 Teplotní citlivost-NETD

Teplotní citlivost dané termokamery se vyjadřuje pomocí tzv parametru NETD⁶. Tento parametr vypovídá o vlastním šumu měřícího systému (termokamery). V praxi to znamená že rozdíl teplot na povrchu objektu musí být takový, aby vytvořil rozdílový signál, jehož hodnota je větší, než vlastní šum termokamery. [2],[11]

Údaj NETD se uvádí ve stupních Celsia ($^\circ\text{C}$) nebo v milikelvinech (mK) a vyjadřuje jaké nejmenší teplotní rozdíly na povrchu černého tělesa je termokamera schopná zaznamenat, a to většinou při teplotě 30°C . [2],[11]

V současné době se hodnota teplotní citlivosti termokamer pohybuje okolo 100 až 15 mk (100mK u základních modelů u nejcitlivějších, a tedy nejdražších až 15mK). [2],[11]

Na obrázku č. 21, jsou zachycené tři snímky (termogramy) pořízené termokamerami s různou tepelnou citlivostí. Je patrné že, teplotní citlivost podstatně ovlivňuje výslednou kvalitu termogramu (čím větší je hodnota NETD, tím je termogram více „zašumnělý“) [2],[11]



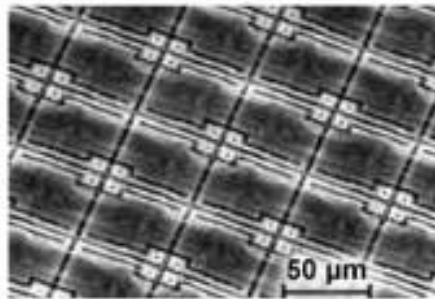
Obrázek 21 - termogramy pořízené s různou hodnotou NETD [2]

⁶ NETD - noise equivalent temperature difference (nejmenší rozdíl teplot, který vyvolá signál větší, než je vlastní šum systému)

6.5 Optické rozlišení a možnosti ostření

Pomocí optiky dané termokamery (konkrétně čočky) je infračervené záření promítnuto na detektor. Ten obsahuje mnoho tzv. pixelů, což jsou prakticky samostatné detektory, jejichž funkcí je převádět dopadající infračervené záření na elektrický signál (z tohoto signálu se následně určí hodnota teploty zkoumaného objektu). Počet pixelů výsledného obrazu je tedy roven počtu pixelů použitého detektoru.[2],[11]

Na obrázku č. 22, je zachycen snímek, který obsahuje část povrchu skutečného detektoru termokamery.



Obrázek 22 - povrch detektoru [11]

Na trhu jsou v současné době termokamery s rozlišením detektorů od 60 x 60 do 1 240 x 768 pixelů, (výjimečně se můžeme setkat i s větším rozlišením). [2],[11]

Na výslednou kvalitu detailů pořízených termogramů však nemá vliv pouze rozlišení použitého detektoru, důležitým aspektem je také samotné zorné pole termokamery. Zjednodušeně lze říct, že toto pole ovlivňuje, jak velká část prostoru bude na detektor promítnuta, má tedy zásadní vliv na množství měřeného tepelného záření, které z tohoto prostoru přichází. [2],[11]

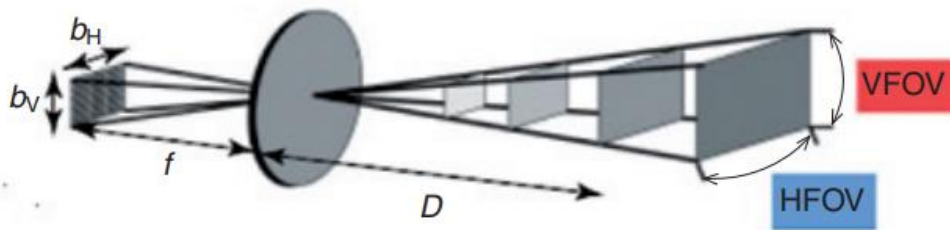
U termokamer je zorné pole definováno tzv. zorným úhlem (parametrem FOV⁷). Tento parametr udává zorný úhel v uhlových stupních, a to buď v horizontální (HFOV⁸) nebo vertikální (VFOV⁹) rovině. [2],[11]

⁷ FOV – Field of View

⁸ HFOV – horizontal Field of View

⁹ VFOV – vertical Field of View

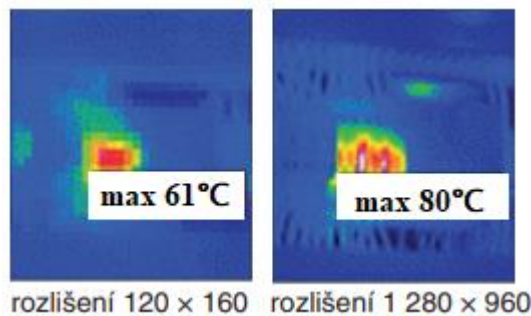
Princip definice těchto parametrů je zobrazen na obrázku č. 23.



Obrázek 23 - schéma definující parametry VFOV a HFOV [2]

Pozn.: (D – vzdálenost měřeného objektu, f – ohnisková vzdálenost objektivu dané termokamery a b_V , b_H – rozměry detektoru).

Čím větší je úhel zorného pole tím větší je také část prostoru, která je promítnuta na detektor a tím menší detaily jsou detektorem zachyceny. Volbou příliš velkého zorného pole při nedostatečném rozlišení detektoru lze tedy způsobit chybu měření, viz obrázek č. 24, kde termokamera s rozlišením 120 x 160 pixelů naměřila ve zvolé oblasti maximální teplotu 61°C, správná hodnota maximální teploty je však o 19°C vyšší a byla naměřena termokamerou s kvalitnějším rozlišením. [2],[11]



Obrázek 24 - vnesená chyba měření způsobena nedostatečným rozlišením termokamery [2]

Pro správné výsledky měření je ve většině případů třeba termokameru zaostřit. Zaostření u termokamer probíhá buď manuálně nebo motoricky. Některé termokamery s motorickým zaostřováním dokonce nabízejí i funkci autofocus (automatické zaostření). Termokamery s jednodušší optikou zaostřování nevyžadují, jsou totiž zaostřeny na nekonečno s velkou hloubkou ostroty. [2]

6.6 Měřicí a další funkce

Využití termokamery ať už v terénu (přímo na místě) nebo v laboratoři (v softwaru při vyhodnocování dat a tvorbě reportů) neovlivňují jen její výše zmiňované základní parametry, ale také měřicí a další vyhodnocovací funkce. [2],[11]

Funkce, které umožňují získat výsledky (částečné či úplné) měření již během jeho průběhu (i přímo v terénu), jsou označovány jako funkce měřicí. Uživatel termokamery tak není závislý na přenosu pořízených dat do počítače. [2],[11]

Hlavní význam těchto měřicích funkcí ale spočívá v tom, že umožňují vybrat ty správné detaily a parametry záznamu přímo během měření. Díky tomu se zmenšuje riziko nebezpečí, že případná místa se závadou budou přehlédnuta či nedostatečně zaznamenána. [2],[11]

Při výběru termokamery je pro uživatele nezbytné, aby dobře zvážil, které měřicí funkce jsou pro danou oblast výzkumu či vyhodnocování klíčové, protože ne všechny termokamery jsou vybaveny níže zmiňovanými funkcemi, ale také počet měřicích funkcí, které mohou být aktivovány současně může být omezen. [2],[11]

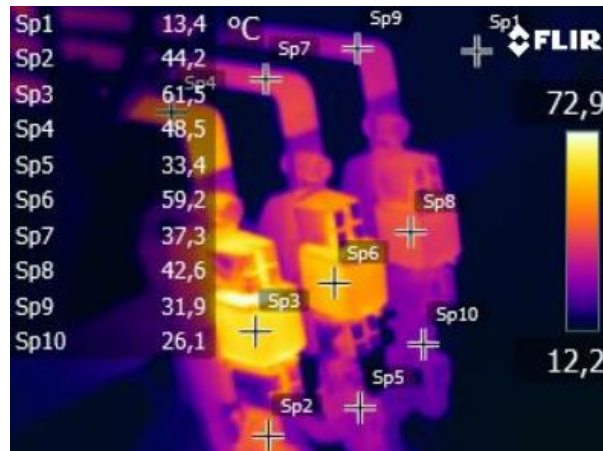
V současné době se lze u termokamer nejčastěji setkat s následujícími měřicími funkcemi:

1. funkce bod
2. funkce oblast
3. funkce teplotní profil
4. funkce izoterma
5. funkce delta

6.6.1 Funkce bod (spot)

Funkci měření teploty v bodě lze považovat za základní měřicí funkci každé termokamery. Umožňuje změřit současnou teplotu v jednom bodě (přesněji malé kruhové oblasti). Základní modely termokamer umožňují měřit teplotu v jednom bodě (většinou ve středu obrazovky), u pokročilejších modelů je možné použít více těchto měřicích funkcí najednou (měřit teplotu současně ve více bodech) a v libovolné námi zvolené oblasti obrazovky. [2],[11]

Praktická ukázka využití této funkce je na obrázku č. 25, kde bylo pomocí funkce bod (monitorováno v deseti bodech) odhaleno nerovnoměrné zatížení zařízení.

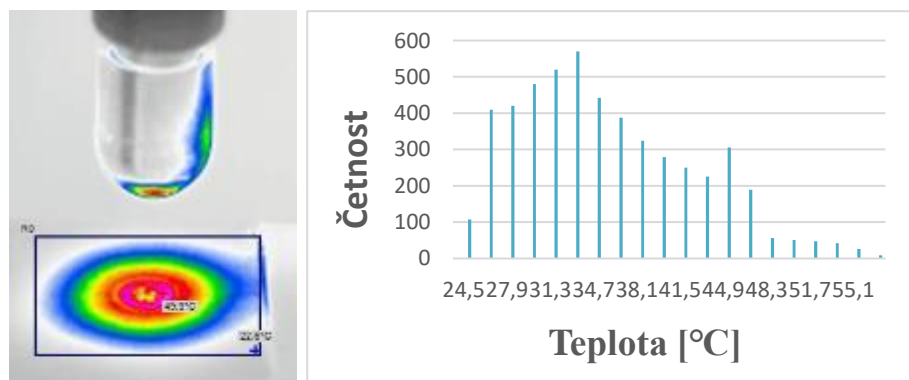


Obrázek 25 - termogram obsahující funkci bod [11]

6.6.2 Funkce oblast

Měřící funkce oblast umožňuje stanovit maximální, minimální a průměrnou teplotu v určité oblasti obrazovky. Podobně jako u teploty v bodě lze měřit teploty oblasti buď uprostřed nebo libovolně na obrazovce, a to i pro několik oblastí současně (záleží na konkrétním typu termokamery). Tato funkce se většinou používá pro určení nejteplejších a nejstudenějších bodů vybrané měřené oblasti (povrchu). [2],[11]

Na obrázku č. 26. je praktická ukázka využití této funkce, kde jako oblast byla vybrána plocha bodového svaru, pomocí softwaru byl následně zhotoven histogram, který uvádí velikost naměřených teplot, jejich četnost a rozložení.

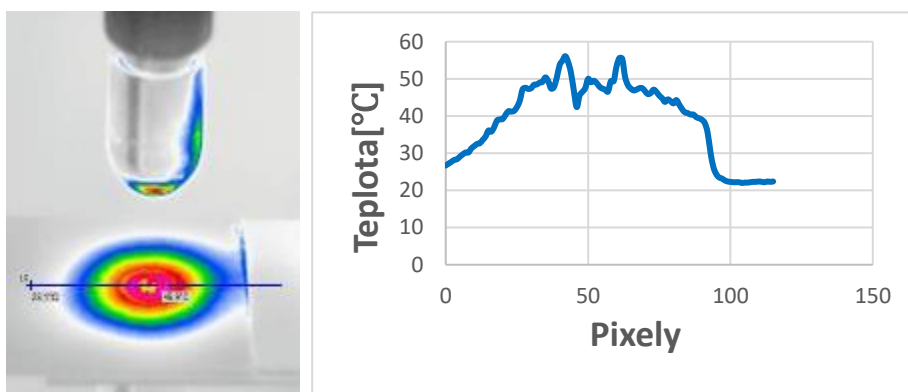


Obrázek 26 - termogram obsahující funkci oblast a její následné vyhodnocení

6.6.3 Funkce teplotní profil

Tato funkce zobrazuje průběh teploty na uživatelem zvolené úsečce v podobě grafu. Její využití se uplatní například při monitorování teplotní homogenity nebo rozsahu vzniklých závad. [2],[11]

Praktická ukázka využití funkce teplotní profil je na obrázku č. 27, kde zvolená úsečka prochází teplotním polem svarového spoje, pomocí softwaru byl poté zhotoven teplotní profil odpovídající danému úseku.

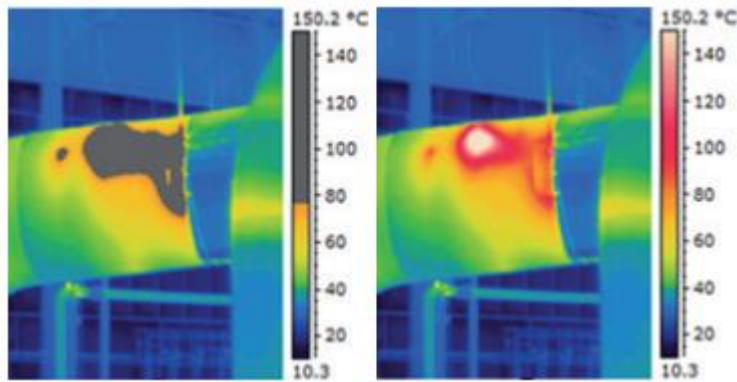


Obrázek 27 - termogram osahující funkci teplotní profil a její následné vyhodnocení

6.6.4 Funkce izoterma

Funkci izoterma lze využívat jako funkci izoterma-nad, izoterma-pod nebo izoterma-interval. Izotermy tedy monitorují a pomáhají určit kde je teplota měřeného objektu nad, pod či v určitém intervalu přípustných hodnot (teplot). V praxi se jedná o velmi často využívané funkce, kde mód izoterma-nad uživateli signalizuje místa kde je překročena horní mez přípustných hodnot (nastavena uživatelem), mód izoterma-pod naopak místa, kde byla překročena dolní mez přípustných hodnot, a mód izoterma-interval místa s teplotou v daném intervalu hodnot. [2],[11]

Praktická ukázka využití této funkce je na obrázku č. 28, pomocí modu izoterma-nad byla stanovena horní mez intervalu (limitní teplota) na hodnotu 80°C, při překročení tohoto intervalu software upozornil uživatele a graficky zobrazil plochy kde došlo k překročení daného intervalu (obrázek vlevo).



Obrázek 28 - termogram osahující funkci izoterma a její následné vyhodnocení [2]

6.6.5 funkce delta

Pro stanovení rozdílů mezi údaji poskytnutými měřícími funkcemi se používá tzv. funkce delta. Mezi nejčastější použití patří například určení rozdílů teplot mezi dvěma body. Může být, ale také využita například při určování rozdílu maximální či minimálních teplot mezi dvěma teplotními profily apod. [2],[11]

Pozn.: některé termokamery mohou obsahovat i další měřící funkce, např. alarm izolace, alarm vlhkosti apod. Jedná se ale o tzv. specializované měřící funkce, které jsou významné jen pro vybranou oblast použití (stavebnictví, potravinářství apod.). [2],[11]

6.7 Další funkce

U většiny současných termokamer lze vytvořit a uložit spolu s termogramem i klasickou fotografii pořízenou pomocí vestavěného digitálního fotoaparátu který je součástí termokamery. Této skutečnosti využívají tzv. obrazové funkce u kterých pak vhodnými algoritmy dochází ke kombinaci fotografie a termogramu (v procesoru termokamery). Díky těmto funkcím lze tedy lépe vyhodnocovat i prezentovat naměřené údaje. [2],[11]

Optické osy termokamery a fotoaparátu nejsou totožné, z tohoto důvodu je pro správnou činnost obrazových funkcí nezbytné, aby byla termokamera zaostřena jinak nedojde k správnému prolnutí termogramu a fotografie, což může zapříčinit chybu měření. [2],[11]

Mezi nejběžnější obrazové funkce, se kterými se lze u současných termokamer běžně setkat patří:

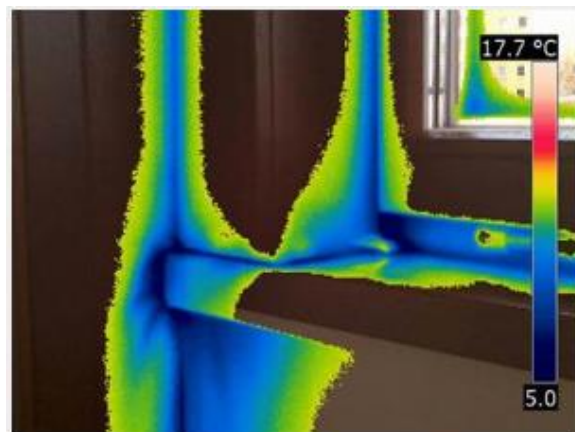
1. teplotní prolnutí
2. obraz v obraze
3. MSX
4. blending
5. radiometrické video

6.7.1 funkce teplotní prolnutí

Principem funkce teplotního prolnutí je zobrazit fotografii na místo termogramu (v jistém intervalu teplot). Funkci uživatel využije především tehdy, je-li třeba na povrchu zkoumaného objektu co nejpřesněji lokalizovat polohu teplotní anomálie.

Tato funkce tedy kombinuje termogram a fotografii tak, aby nalezená anomálie (závada) byla zobrazena na fotografii společně s informací o jejím rozsahu, a velikostí povrchové teploty. [2],[11]

Ukázka této funkce je na obrázku č. 29, kde po prolnutí fotografie okenního těsnění a termografických dat lze přesně pozorovat detaily teplotní anomálie.



Obrázek 29 – záznam funkce teplotní prolnutí [11]

6.7.2 Funkce obraz v obraze

Při použití funkce obraz v obraze se sloučí termogram a fotografii tak, že termogram překryje jen určitou zvolenou část fotografie (jsou zachovány původní maximální rozměry fotografie a zvolené rozměry termogramu), díky tomu je pomocí fotografie zachycen širší kontext termogramu což podobně jako u funkce teplotního prolnutí usnadňuje lokalizaci teplotních anomálií. [2],[11]

Termogram na obrázku č. 30 zachycuje fotografii pokoje a její překrytí termografickými údaji měřeného prostoru



Obrázek 30 – záznam funkce obraz v obraze [11]

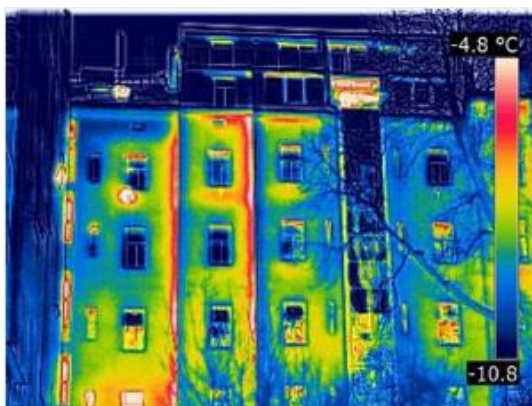
6.7.3 Funkce MSX

Touto patentovanou funkcí jsou v současnosti vybavené všechny termokamery značky Flir. Funkce MSX¹⁰ prolíná termogram s reálnou fotografií tak, že hrany (obrysy) z reálného snímku (fotografie) jsou vloženy do termogramu, rozpoznatelné však nejsou jen obrysy jednotlivých objektů, ale také nápisy a detaily jejich povrchu.

Tato funkce je užitečná především v průmyslu, neboť lze snadno identifikovat a odlišit jednotlivé objekty. [2],[11]

Na obrázku č. 31 je praktická ukázka funkce MSX, detailní hrany budovy získané z reálné fotografie jsou prolnuty do termogramu

¹⁰ MSX – Multi Spectral Dynamic Imagine (multispektrální zobrazení)

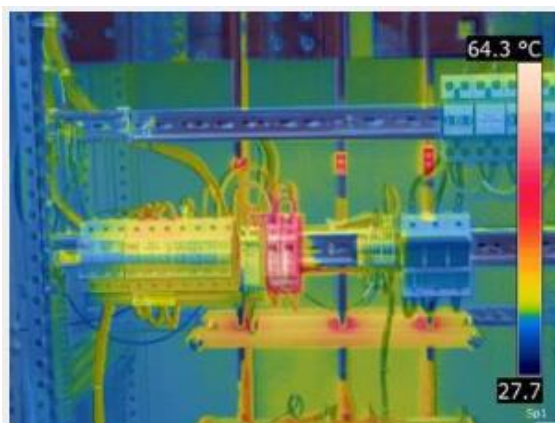


Obrázek 31 - záznam funkce MSX [11]

6.7.4 Funkce blending

Funkce blending (bělení) funguje podobně jako funkce MSX, tedy prolíná fotografii a termogram, pořízená fotografie však není nijak upravována, dochází pouze k zesvětlení a k následnému stažení fotografie do pozadí. Funkce uživateli pomáhá lokalizovat a identifikovat měřené objekty či rozpoznávat jednotlivé části konstrukce. [2],[11]

Na obrázku č. 32, je termogram technického zařízení, u něhož byla použita funkce blending, lze tak lépe identifikovat jednotlivé části zařízení u kterých došlo k tepelnému výkyvu.



Obrázek 32 – záznam funkce blending [11]

6.7.5 Funkce radiometrické video

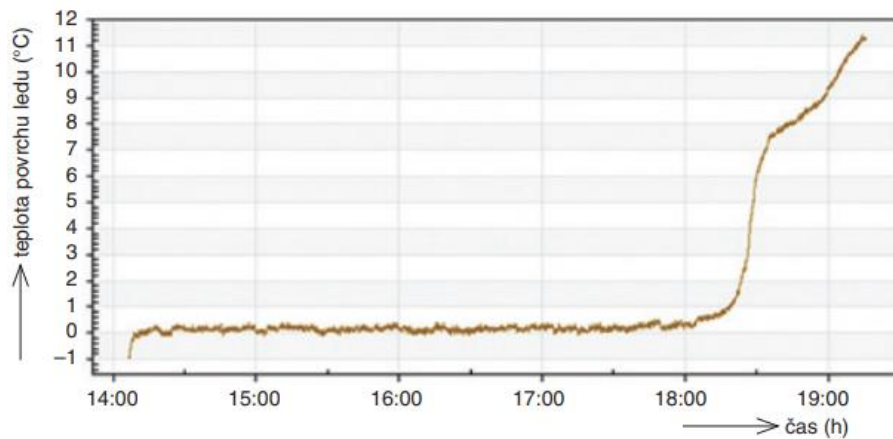
Podstata funkce tzv. radiometrického videa je v možnosti zaznamenávat jednotlivé termogramy do radiometrické sekvence (v délce i několika hodin). Tuto radiometrickou sekvenci může uživatel později editovat, např. upravit parametry

měření (emisivitu, zdánlivou odraženou teplotu, atmosférické vlivy apod.), a také vytvořit z jednotlivých snímků samostatné termogramy. [2],[11]

Jelikož se jedná o časový záznam, funkce také umožňuje vykreslit údaje poskytované jednotlivými měřicími funkcemi do grafu, a to v závislosti na čase. [2],[11]

Možný počet snímků uložených za sekundu je omezen buď samotnou snímkovou frekvencí termokamery, nebo datovým spojením s PC. [2],[11]

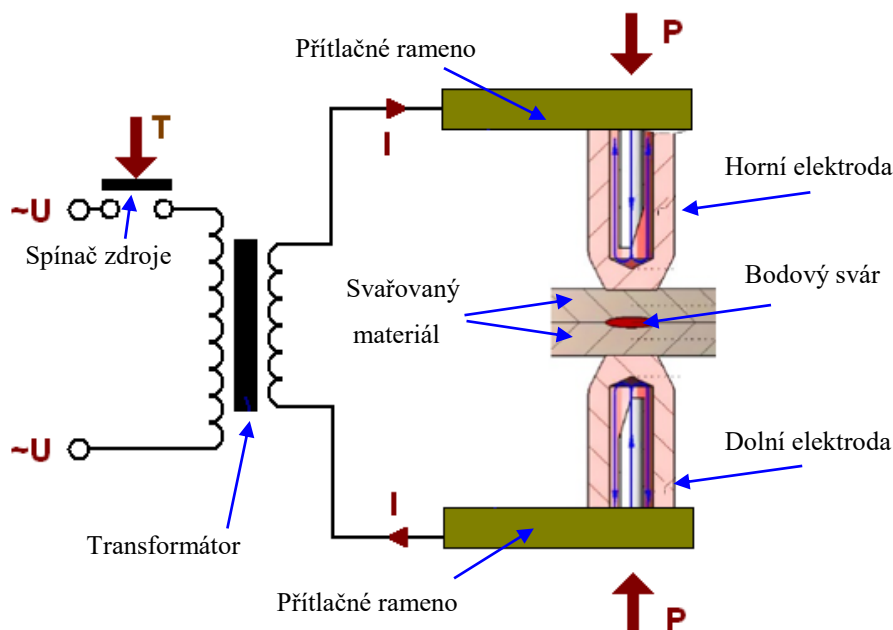
Grafický záznam na obrázku č. byl vytvořen pomocí radiometrického videa, jedná se o průběh tání ledu, díky časové ose můžeme sledovat jednotlivé úseky tohoto procesu.



Obrázek 33 - grafický záznam vytvořený radiometrickou funkcí [2]

7 Princip odporového bodového svařování

Odporové bodové svařování patří mezi metody, jimiž lze výhodně zvýšit produktivitu práce (snížit výrobní náklady v oblasti mezd a materiálu). V praxi je to nejpoužívanější způsob na svařování tenkých plechů (0,01 až 10 mm i více) zejména v automobilovém průmyslu. Princip této metody je naznačen na obrázku č. 34. Spojované materiály jsou k sobě přimáčknuty dvěma elektrodami, které jsou upevněny na přitlačná ramena a jsou napájena ze zdroje svařovacího proudu (zdrojem svařovacího proudu v bodových svářečkách je většinou výkonný transformátor). Ke svaření materiálu dojde po sepnutí zdroje spínačem na dobu T . Svařovanými materiály začne procházet elektrický proud. Při procházení proudu vzniká velký odpor a dojde k lokálnímu natavení styčných ploch svařovaných plechů. Po vypnutí proudu při stálém působení tlaku materiál ztuhne a vytvoří svarový spoj. [21], [30], [31]



Obrázek 34 - princip metody odporového bodového svařování [21]

V porovnání s ostatními metodami svařování probíhá bodové odporové svařování ve velmi krátkých časových intervalech, takže vyvinutá tepelná energie se prakticky celá využije k ohřátí místa svaru na svařovací teplotu, Kromě toho jsou ztráty rozvedením tepla do okolí svaru minimální a spotřeba elektrické energie při chodu stroje naprázdno zanedbatelná. Tyto dvě vlastnosti zvyšují energetickou ekonomii, neboť snižují celkové náklady výrobního procesu. [21], [30], [31]

8 Analýza vad odporových bodových svarů

Na svary obsahující vadu (či několik vad) je nutno pohlížet jako na nebezpečné koncentrátoři napětí, které mají nepříznivý vliv na velikost meze únavy a za určitých podmínek mohou vést až ke vzniku křehkého lomu. [18]

Vadou se obecně rozumí každá odchylka od vlastností udávaných technickými normami, technickými podmínkami případně dodaným smluvním vzorem. Svarové vady mohou být zjevné (lze je klasifikovat pouhým okem či jednoduchými pomůckami), nebo skryté, které se klasifikují pomocí přístrojů a případnými laboratorními zkouškami. [18]

Podmínku kvalitního svarového spoje určuje jeho tvar, velikost, celistvost, požadované chemické složení svarového kovu a mechanicko-plastické vlastnosti svaru, přičemž na tuto podmínku má zásadní vliv množství a závažnosti případných vad které daný svar obsahuje. [18], [19]

Dle ustanovení příslušných předpisů (norem), lze svarové vady zařadit mezi svarové vady přípustné, nepřípustné, opravitelné nebo neopravitelné. Do samotného provozu však lze připustit pouze takové svary, které obsahují typy vad, o kterých víme, že při daných (známých) provozních podmínkách zatížení neohrozí bezpečnost svařovaných zařízení a konstrukcí. [18]

8.1 Příčiny vzniku

Jednotlivé typy vad svarových spojů, a především příčiny jejich vzniku se liší dle použité svařovací metody (technologie). Tato práce je zaměřena na odporové bodové svařování, proto se následující text věnuje nepříznivým faktorům, které souvisejí se vznikem vad, při aplikaci právě této metody svařování.

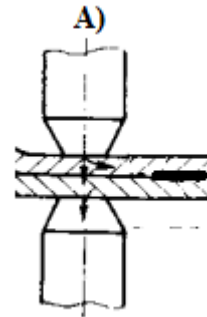
8.1.1 Odbočování svařovacího proudu

Může-li svařovací proud procházet i jinou cestou než přes svarový spoj, potom na vytvoření a kvalitu bodového sváru nepříznivě působí tzv. odbočování svařovacího proudu (například odbočování proudu přes sousední sváry).

V praxi je tedy potřeba dodržet minimální vzdálenost mezi svary dle normy EN ISO 14373 kdy už odbočovací proudy nehrozí, přičemž pro spodní cestu proudu volit co nejvodivější materiál. [20], [21]

Pozn.

- A) *Odchýlení svařovacího proudu přes sousední svarový spoj.*



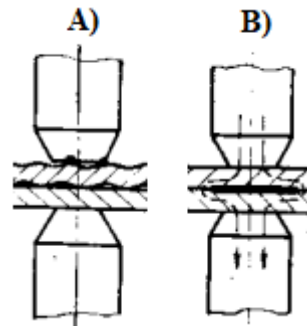
Obrázek 35 - nevhodné podmínky svařování [20]

8.1.2 Kvalita povrchu plechů

Velmi častou příčinou nekvalitních spojů je nedokonalá příprava svařovaných dílů, svařovaný povrch musí být před samotným procesem svařování zbaven nečistot, olejů, mastnoty, rzi apod. V praxi se stěny daného povrchu očistí smirkovými papíry, kartáči, kotouči nebo otrykasjí příslušným abrazivem. Ve výjimečných případech se provádí moření kyselinou. [20],[21],[23]

Pozn.

- A) *Nevhodný povrch plechu.*
 B) *Rez a okuje na stykové ploše.*



Obrázek 36 – nevhodné podmínky povrchu pro svařování [20]

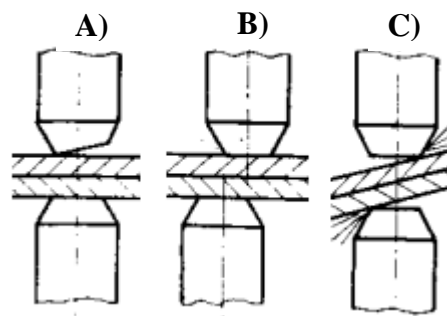
8.1.3 Kvalita elektrických kontaktů

Stykové plochy elektrod musí být rovnoběžné a přesně dosedat na svařovaný materiál, také nesmí být vyvrácené a osy obou elektrod by měly být ve vzájemné rovině. [20],[21],[23]

Při nesprávném přeplátování svařovaných dílů, se mezi nimi může vytvořit mezera, při svařovacím procesu se pak svár bude tvořit v okolí této mezery, což způsobí ztrátu pevnosti, klesá celková kvalita svarového spoje a může dojít k defektu svařované konstrukce. [20],[21],[23]

Pozn.

- A) Nedostatečná styková plocha.
- B) Nerovnoběžné osy elektrod.
- C) Vyvrácené uložení plechu.



Obrázek 37 - nevhodné podmínky kontaktu pro svařování [20]

8.1.4 Nastavení parametrů svařování

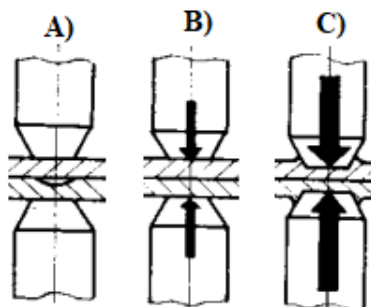
Parametry svařování pro konkrétní druhy materiálů a jejich tloušťky jsou dohledatelné a tabulkově zaznamenány, z pravidla jsou součástí technické dokumentace svařovacího zařízení (zdroje). V praxi se však vždy provádí několik zkušebních svarů, jelikož tyto údaje mají v podstatě jen informační charakter. [20],[21],[23]

Základními svařovacími parametry u odporového bodového svařování jsou svařovací síla (F), svařovací proud (I) a svařovací čas (t), při použití příliš vysoké hodnoty přitlačného tlaku (svařovací síly), vznikají nežádoucí vtisky ve svařovaných dílech, nebo naopak při použití nedostatečné hodnoty přitlačného tlaku nemusí dojít k vytvoření potřebné stykové plochy která je nutná pro průchod elektrického proudu. [20],[21],[23]

Také špatně zvoleným pracovním proudem a jeho délkou působení (délka jednoho pracovního cyklu) dochází ve svařovacím procesu ke vzniku vad. Při zvolení nadměrně vysokého proudu dochází k propalování materiálu. Svár pak vykazuje menší pevnost a je více náchylný na korozní činitele. Naopak při zvolení nedostatečných hodnot proudu, nedojde k patřičnému provaření svarové čočky a klesá možnost zatížení svarového spoje. [20],[21],[23]

Pozn.

- A) Dlouhá doba působení.
- B) Malý přitlačný tlak.
- C) Velký přitlačný tlak.



Obrázek 38 - nevhodné svařovací parametry [20]

8.2 Klasifikace vad

Následující klasifikace vad (vznikajících při aplikaci odporového bodového svařování) byla vytvořena dle normy ČSN EN ISO 6520-2: Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 2: Tlakové svařování.

Tato norma podrobně rozebírá, popisuje a zařazuje svarové vady do šesti následujících skupin:

1. P1 – Trhliny
2. P2 – Dutiny
3. P3 – Pevné vměstky
4. P4 – Studené spoje
5. P5 – Vady tvaru a rozměru
6. P6 – Ostatní vady nezahrnuté do skupiny P až P5

Kde: písmeno „P“ značí tlakové svařování.

8.2.1 P1 – Trhliny

Kvůli možnosti dalšího šíření, jsou trhliny považovány za nejnebezpečnější svarovou vadu, Trhliny se vyskytují podélné i příčné umístěny ve svaru nebo v přechodové oblasti. Mezi hlavní příčiny jejich vzniku patří velké vnitřní pnutí, které může být způsobeno špatnou svařitelností materiálu (dochází k jeho zakalení). Z hlediska dynamického namáhání snižují únosnost svarového spoje. Vznik trhlín se v praxi potlačuje použitím měkkého svařovacího režimu, a nechlazených elektrod. [19], [21], [23]

Existuje velké množství trhlín jejíž tvar, umístění a příčiny vzniku jsou odlišné, následující tabulka byla vytvořena dle normy ČSN EN ISO 6520-2, obsahuje referenční čísla, označení a popis trhlínových vad, vznikajících metodou odporového bodového svařování.

Tabulka 2 – klasifikace trhlin metody odporového bodového svařování [24]

Klasifikace trhlin		
Referenční číslo	Označení	Vysvětlení
P 1001	Mikrotrhlina	Trhlina obvykle pozorovatelná pouze pod mikroskopem.
P 1100	Hvězdicová trhlina	Vícenásobné trhliny vyběhající z jednoho společného bodu umístěného obvykle uvnitř čočky.
P 1200	Čárová trhlina	Trhlina ve tvaru čáry, která může probíhat až do TOO ¹¹ .
P 1300	Trhlina v rovině spoje	Trhlina obvykle směřující k okraji čočky.
P 1400	Trhlina v TOO.	Trhlina umístěná v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje
P 1500	Trhlina v základním materiálu (neovlivněném)	Trhlina umístěná v neovlivněném základním materiálu
P 1600	Povrchová trhlina	Trhlina v oblasti svaru, která je otevřena na povrch.

Na obrázku č. 39 je makrosnímek odporového bodového spoje, který obsahuje mikrotrhlinu zapříčiněnou nevhodně zvolenými svařovacími parametry.



Obrázek 39 - mikrotrhlina ve svarovém spoji

8.2.2 P2 – Dutiny

Při procesu odporového bodového svařování je vznik dutin zapříčiněn nevhodně zvoleným režimem svařování, konkrétně dochází-li k příliš dlouhému ohřevu materiálu. Výskyt dutin je často doprovázen nežádoucím výstřikem materiálu, a to převážně pod elektrodou nebo mezi svařovanými plechy.

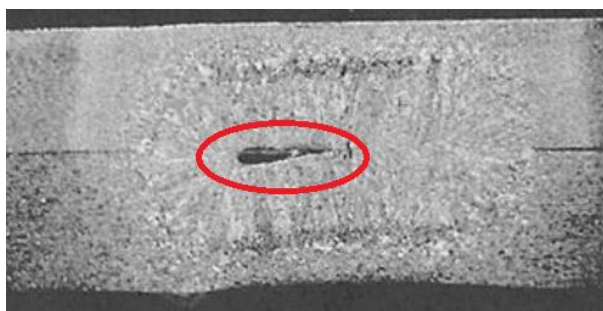
¹¹ TOO – tepelně ovlivněná oblast

K zamezení vzniku dutin je potřeba zvolit správné hodnoty přítlačného tlaku. Klasifikaci dutinových vad, které mohou vzniknout při procesu odporového bodového svařování obsahuje tabulka č. 3. [19], [21], [23]

Tabulka 3 – klasifikace dutin metody odporového bodového svařování [24]

Klasifikace dutin		
Referenční číslo	Označení	Vysvětlení
P 2011	Bublina	Plynová dutina převážně kulovitého tvaru.
P 2012	Rovnoměrná pórovitost	Četné plynové bubliny rovnoměrně rozložené ve svarovém kovu.
P 2013	Shluk pórů	Rovnoměrně rozložená skupina pórů (místní pórovitost).
P 202	Staženina	Dutina způsobená ve svarovém kovu během tuhnutí.
P 203	Kovacic staženina	Tvoření kovacic staženiny může být zesíleno smrštěním.

Na obrázku č. 40 je makrosnímek odporového bodového spoje, který obsahuje plynovou dutinu zapříčiněnou nevhodně zvolenými svařovacími parametry.



Obrázek 40 - plynová dutina ve svarovém spoji [23]

8.2.3 P3 – Pevné vměstky

Svým častým výskytem ve svarových spojkách jsou vměstky označovány za jednu z nejčastějších svarových vad. Vznikají v důsledku znečištění povrchu svařovaného materiálu a elektrod (také poruchou chlazení), kdy při procesu svařování dochází k povrchovému natavení spoje. Vměstky jsou rizikové především tím, že snižují mez únavy svarů. Pro zamezení vzniku vměstků je důležitá kvalitní příprava, především zvolit správný způsob čištění svařovaného materiálu a elektrod. Tabulka č. 4 obsahuje klasifikaci těchto vad pro metodu odporového bodového svařování. [19], [21], [23]

Tabulka 4 - klasifikace vměstků metody odporového bodového svařování [24]

Klasifikace vměstků		
Referenční číslo	Označení	Vysvětlení
P 303	Oxidický vměstek	Tenké vměstky oxidu kovu ve svaru (izolované nebo ve shlucích),
P 304	Kovový vměstek	Částice cizího kovu uzavřená ve svarovém kovu.
P 306	Vměstek nečistoty	Ztuhlý zbytek roztaveného materiálu s nečistotami, uzavřenými ve svaru.

Na obrázku č. 41 je makrosnímek (vlevo) a snímek (vpravo) odporového bodového spoje, který obsahuje pevné vměstky zapříčiněné znečištěním povrchu svařovaného materiálu.



Obrázek 41 – pevné vměstky ve svarovém spoji [21]

8.2.4 P4 – Studené spoje

Studené spoje jsou zapříčiněny nedokonalým tavným spojením (nedostatečného natavení materiálu). Mezi hlavní příčiny patří, nesprávné nastavení svařovacích parametrů, opotřebení elektrod, nebo výskyt a působení bočních proudů (odbočování svařovacího proudu). Tabulka č. 5, obsahuje klasifikaci těchto vad pro metodu odporového bodového svařování. [19], [21], [23]

Tabulka 5 - klasifikace studených spojů metody odporového bodového svařování [24]

Klasifikace studených spojů		
Referenční číslo	Označení	Vysvětlení
P 401	Žádné spojení	Stykové plochy nejsou spojeny.
P 403	Nedostatečné spojení	Stykové plochy jsou pouze částečně nebo nedostatečně spojeny.

Na obrázku č. 42 je makrosnímek odporového bodového spoje, který v důsledku nedostatečného natavení materiálu nevytvořil dostatečné spojení stykové plochy.



Obrázek 42 - nedostatečně spojený svarový spoj

8.2.5 P5 – Vady tvaru a rozměru

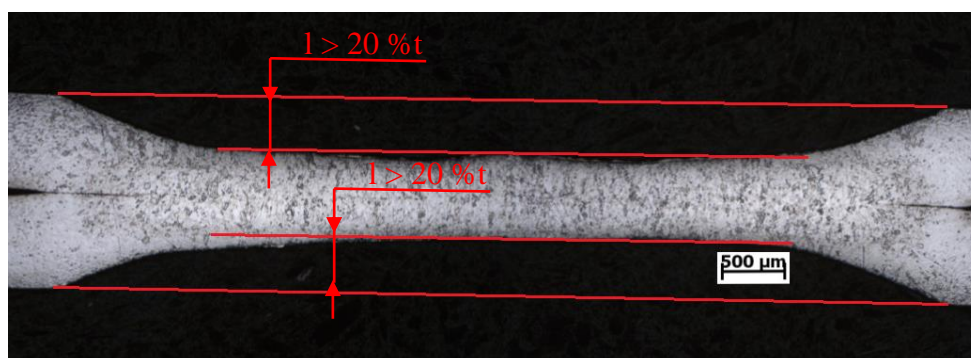
Nedokonalý tvar či rozměr svarového spoje může mít negativní vliv na odolnost svařovaných součástí a konstrukcí. U metody odporového bodového svařování existuje velké množství vad tvarů a rozměrů, mezi typické vady patří nízká nebo vysoká čočka, nesymetrický tvar, malý průměr svaru nebo hluboké otisky elektrod apod. Tabulka č. 6 obsahuje klasifikaci těchto vad pro metodu odporového bodového svařování. [19], [21], [23]

Tabulka 6 - klasifikace vad tvarů a rozměrů metody odporového bodového svařování [24]

Klasifikace vad tvarů a rozměrů		
Referenční číslo	Označení	Vysvětlení
P 501	Vrub	Povrchová rýha způsobená svařováním.
P 520	Deformace (zkřivení)	Svařované díly nemají požadovaný tvar a rozměr.
P 5211	Nesprávná tloušťka čočky nebo nápěchu (výronku)	Čočka je příliš plochá nebo nápěch (výronek) je příliš malý.
P 5212	Nadměrná tloušťka čočky	Tloušťka čočky je větší, než je požadováno.
P 5213	Průměr čočky je příliš malý	Průměr čočky je menší, než je požadováno.
P 5214	Průměr čočky je příliš velký	Průměr čočky je větší, než je požadováno
P 5215	Asymetrická čočka nebo výronek	Asymetrie tvaru či umístění čočky nebo výronku.
P 5216	Nedostatečný průvar čočky	Hloubka průvaru čočky měřená od roviny spoje je v jednom ze spojovaných dílů nedostatečná
P 522	Jednostranné protavení	Slepý otvor v místě svaru způsobený výstřikem roztaveného kovu.
P 523	Úplné protavení čočky nebo svaru	Průchozí otvor v místě svaru způsobený výstřikem roztaveného kovu.

P 524	Nadměrná tepelně ovlivněná oblast (TOO)	TOO je větší, než je požadováno.
P 525	Nadměrné rozevření plechů	Spára mezi svařovanými díly je nepřijatelně velká.
P 5261	Vtisk na povrchu materiálu	Místní prohlubeniny povrchu svařovaného dílu v oblasti tisku elektrody.
P 5262	Povrchový výčnělek	Vyvýšení materiálu ve formě nápěchu nebo výronku vedle vtisku elektrody.
P 5263	Materiál elektrody nalepený na povrchu dílu	Materiál elektrody, který ulpívá na povrchu dílu.
P 52641	Nadměrný vtisk	Průměr nebo šířka vtisku je větší, než je požadováno.
P 52642	Nadměrná hloubka vtisku elektrody	Hloubka vtisku je větší, než je požadováno.
P 52643	Nerovnoměrný vtisk elektrody	Hloubka vtisku, průměr nebo šířka jsou nerovnoměrné.
P 5266	Místní nastavení způsobené čelistmi	Nastavení povrchu svařovaných dílů v oblasti míst přívodu proudu.
P 5268	Poškozený povlak	Vada způsobená poškozením povrchové vrstvy povlaku.

Na obrázku č. 43 je makrosnímek odporového bodového spoje, který obsahuje hluboké otisky elektrod zapříčiněné nevhodně zvolenou přitlačnou silou (tlakem).



Obrázek 43 - hluboké otisky elektrod ve svarovém spoji

8.2.6 P6 – Ostatní vady

Poslední skupinou vad odporových bodových svarových spojů jsou tzv. vady ostatní, které nespádají do žádné z výše uvedených kategorií. Do této kategorie spadá například výstřik svařovaného kovu, ke kterému nejčastěji dochází v rovině svařovaných plechů při nadměrném přívodu tepla do svařovacího procesu. Tabulka č. 7 obsahuje klasifikaci těchto vad pro metodu odporového bodového svařování. [19], [21], [23]

Tabulka 7 - klasifikace vad tvarů a rozměrů metody odporového bodového svařování [24]

Klasifikace vměstků		
Referenční číslo	Označení	Vysvětlení
P 602	Rozstřík	Kapky kovu, které ulpívají na povrchu svařovaného dílu.
P 6011	Náběhové zbarvení (viditelný oxidický povrch)	Zkorodovaný povrch v oblasti bodového svaru nebo svarového švu.
P 612	Výstřik roztaveného kovu	Roztavený kov je vytlačen do oblasti mezi díly, včetně rozstříku.

Na obrázku č. 44 je snímek odporového bodového spoje, který obsahuje výstřik svarového kovu zapříčiněný nevhodně zvolenými svařovacími parametry.

Pozn.

Například u tavných svarových spojů se vyhodnocení přípustnosti vad provádí dle dalších vyhodnocovacích norem (EN ISO 5817, EN ISO 10042 apod.) kde je přípustnost v závislosti na stupni kvality svaru určena velikostí a množstvím vad. Zatímco u tlakových metod (zejména u zmiňovaného bodového odporového svařování) takovéto vyhodnocovací normy neexistují, takže případná kritéria přípustnosti se volí na základě dohod a vlastních předpisů jako jsou podnikové normy apod. Nicméně existují základní doporučení uvedená v normě EN ISO 14373 týkající se doporučené velikosti svarové čočky, vtisku elektrod atd.



Obrázek 44 - výstřik svarového kovu ve svarovém spoji [23]

9 Úvod do experimentu

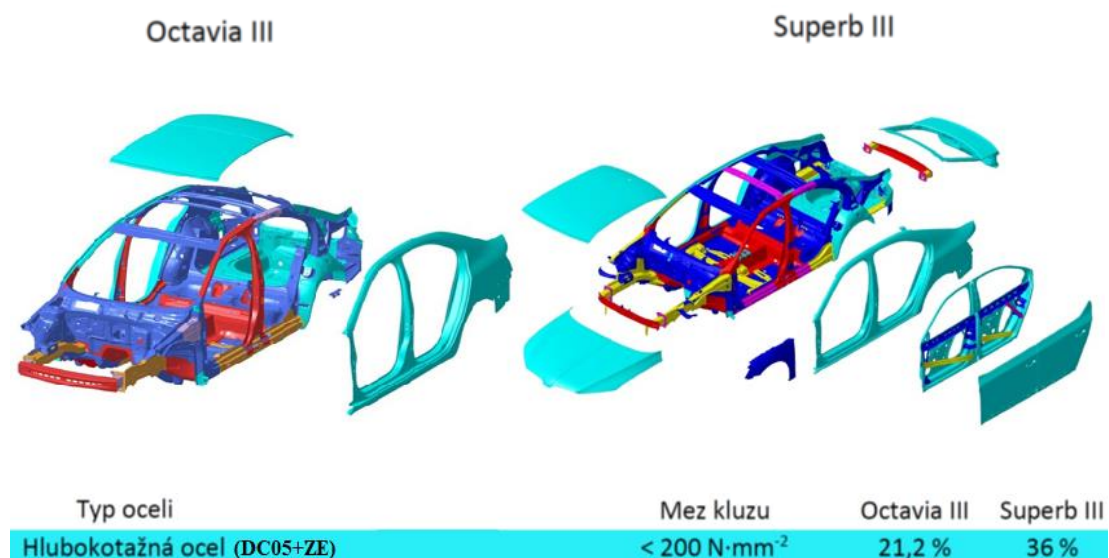
Experimentální část diplomové práce se zabývá ověřením možnosti vyhodnocovat online termografií proces odporového bodového svařování. Praktický ověřovací experiment byl proveden v nově zařízené mezifakultní laboratoři výuky svářečských technologií, umístěné v prostorách budovy CIIRK (českého institutu informatiky, robotiky a kybernetiky).

Pro dosažení cíle bylo zapotřebí analyzovat nejčastější typy vad vznikajících během svařovacího procesu metodou bodového odporového svařování a ze získaných experimentálních dat se pokusit navrhnout technologický postup pro možné opakované dosažení jednotlivých typů těchto vad.

Dále pro zvolené typy vad realizovat vždy dvě nezávislé množiny (trénovací a testovací data) teplotních (radiometrických) záznamů z termokamery a navrhnout vhodné příznaky pro klasifikaci defektního či nedefektního svarového spoje.

9.1 Použitý materiál

Pro experiment byla použita hlubokotažná ocel DC05+ZE (EN 10152) elektrolyticky povlakovaná zinkem s celkovou tloušťkou plechu $h = 0,7$ mm a tloušťkou zinkového povlaku $4,5$ μm . Tato ocel je jedním z nejčastěji používaných materiálů např. ve firmě Škoda Auto a.s. kde se používá na části automobilových karosérií (nejčastěji na střechu a vnější postranice, viz obrázek č. 45).



Obrázek 45 - materiálův koncept automobilu [26]

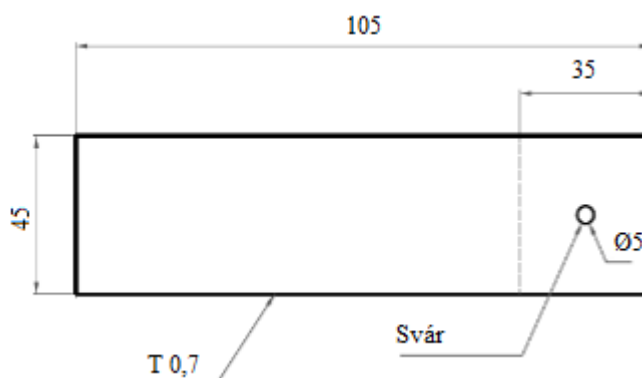
Chemické složení a mechanické vlastnosti použité oceli jsou uvedeny v tabulce č.8.

Tabulka 8 - chemické složení a mechanické vlastnosti oceli DC05+ZE []

Chemické složení					Mechanické vlastnosti		
C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Si [%]	Re [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	A ₈₀ [%]
0,06	0,35	0,025	0,02	0,02	max 200	270 – 330	39

9.2 Zkušební vzorek

Pro experiment byly svařeny vzorky plechu o rozměrech 45 x 105 mm a tloušťce 0,7 mm, svar byl umístěn ve středové ose přeplátované vrstvy tak, aby výsledný svařenec mohl být podroben následným technologickým zkouškám.



Obrázek 46 - rozměry zkušební vzorku

9.3 Svařovací zařízení

Pro vytváření svarových spojů byl použit svařovací odporový lis Dalex PMS 11-4 (obr. č. 47). SW¹² řídicí jednotky použitého zařízení (SER MEGA) byl navíc vylepšen na verzi V1.25.077B (SER MEGA 2) a celé zařízení bylo doplněno o speciální externí SW pro detailní monitorování svařovacích parametrů (SER-Mega PC). [27]

SW (SER-Mega PC) je navržen ke komunikaci s řídicí jednotkou (SER Mega 2) svařovacího

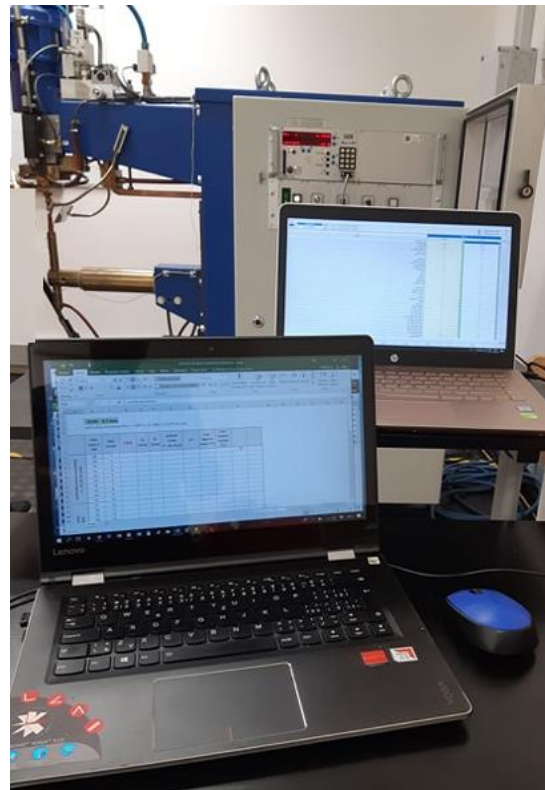


Obrázek 47 - svařovací odporový lis Dalex PMS 11-4

¹² SW - software

zařízení. SW umožňuje velmi jednoduché nastavování, změnu a preciznější grafické monitorování svařovacích parametrů přes externě připojený PC¹³. [27]

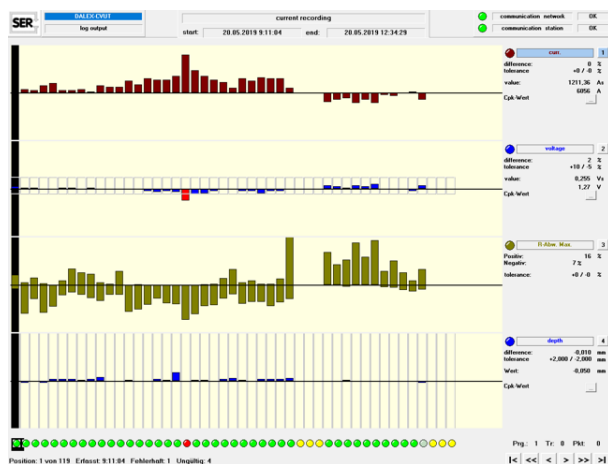
Pro nastavování svařovacích parametrů používá zařízení tzv. učící svary (teach welds). Po nastavení požadovaných svařovacích parametrů uživatelem se tedy provedou tři učící svarové spoje, přičemž průběh průměrných parametrů z těchto tří učících svarů považuje řídicí jednotka zařízení za optimální (učící), při každém dalším svaru se tak řídicí jednotka snaží doregulovat průběh parametrů během svařování právě na toto vzorové nastavení, řídicí jednotka je tedy sama schopna v malém rozsahu korigovat průběh nastavených



svařovacích parametrů a tím předcházet vzniku chyb v daném svařovacím procesu. [27]

Obrázek 48 - komunikace softwaru a řídicí jednotky

SW (SER-Mega PC) pak umožňuje detailní kontrolu průběhu (v řádu ms) svařovacího proudu, elektrického odporu, napětí a hloubky vtlačení elektrod do materiálu. Kromě toho uživatelé zobrazuje i procentuální odchylku od nastaveného optimálního průběhu parametrů a zobrazuje průběh těchto parametrů v závislosti na čase. Což v praxi umožňuje mnohem přesnější kontrolu nastavení parametrů a pro tuto práci klíčovou opakovatelnost procesu. [27]



Obrázek 49 - průběh parametrů svařovacího procesu v SW SER – MEGA PC

¹³ PC – Personal Computer (počítač)

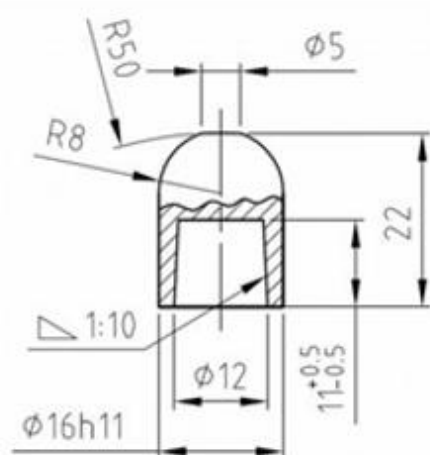
Charakteristika svařovacího odporového lisu Dalex PMS 11-4 je uvedena v tabulce č. 9.

Tabulka 9 - charakteristika svařovacího zařízení Dalex PMS 11-4 [28]

Charakteristika svařovacího zařízení Dalex PMS 11-4	
Svařovací poloha	Vertikální
Maximální svařovací výkon [kVA]	237
Maximální zkratový proud [kVA]	296
Pohon svařovací hlavy	pneumatický
Rozteč ramen (min/max), [mm]	115/415
Maximální svařovací proud [kA]	33,8
Zkratový proud [kA]	42,2
Elektrodová síla [N]	200-600
Délka výložníku ramen [mm]	550
Šířka / hloubka / výška [mm]	780 / 1253 / 1636
Hmotnost stroj / řídicí skříň [kg]	485 / 65

9.4 Svařovací elektrody

V průběhu experimentu byly ve svařovacím procesu používány kované elektrodové čepičky pro odporové bodové svařování typ 39D 1978-2 z materiálu A2/2 - CuCr1Zr, s průměrem stykové plochy 5 mm a s průměrem upínací části 16 mm viz obrázek č. 50.



Obrázek 50 - elektrodové čepičky 39D 1978-2 [27]

Chemické složení elektrodové čepičky je uvedeno v tabulce č. 10.

Tabulka 10 - chemické složení použitých svařovacích elektrod

Chemické složení elektrodové čepičky 39D 1978-2		
Cu [%]	Cr [%]	Zr [%]
98,98	0,9	0,12

9.5 Termokamera

Svařovací proces byl monitorován stacionární termokamerou LWIR WIC 640, pro přesné bezdotykové měření teploty v laboratorních a industriálních podmínkách. Průměr použitého objektivu byl 19 mm.



Obrázek 51 - termokamera LWIR, WIC 640

Technické parametry termokamery LWIR WIC 640 jsou uvedeny v tabulce č. 11.

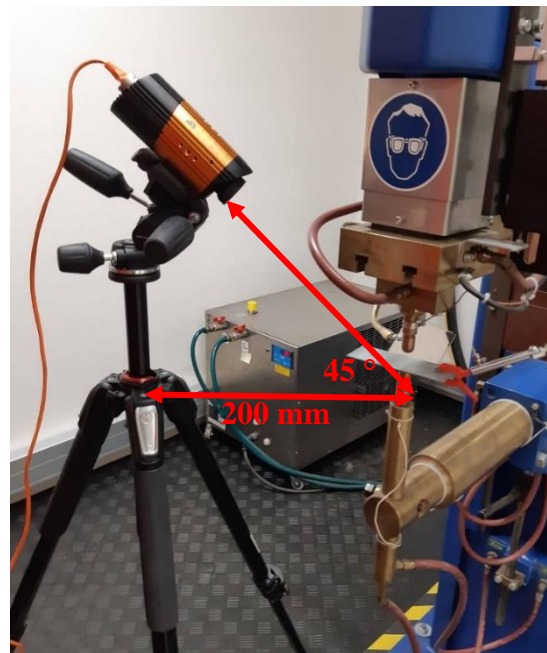
Tabulka 11 - technické parametry termokamery LWIR WIC 640[29]

Technické parametry termokamery LWIR WIC 640	
Rozlišení senzoru	640 x 512 pixelů
Tepelná citlivost	$\leq 0,03 \text{ } ^\circ\text{C}$ (30 mK)
Přesnost	Vysoká: $\pm 2 \%$ nebo $\pm 2^\circ\text{C}$
Stupeň krytí	Vysoký: IP65
Teplotní rozsah	Až + 1500°C
Zorné pole objektivů	13°- 69° (6,8 – 19 mm)

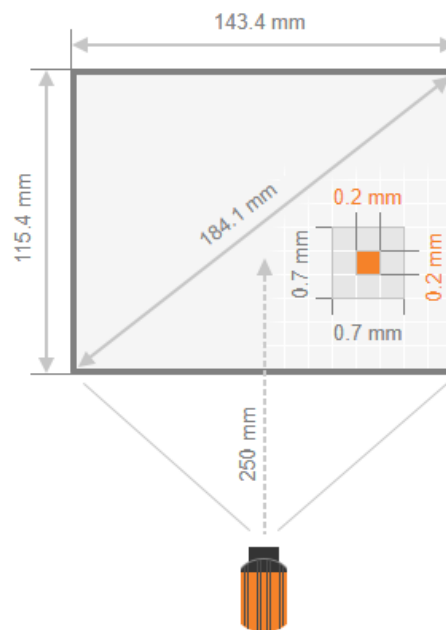
Termokamera byla během experimentu připojena ke svařovacímu lisu DALEX PMS 11-4 tak, že při každém sepnutí svařovacího okruhu snímala proces vytváření odporového bodového svaru.

Pro pořízení co nejkvalitnějších termografických záznamů byla termokamera nastavena pod úhlem 45° ve vzdálenosti 250 mm od svařovaných plechů.

Celkové parametry stanoveného zorného pole pro termokameru LWIR WIC 640 s průměrem použitého objektivu 19 mm jsou zobrazeny na obrázku č. 53. Při experimentu tak bylo použito $HFOV = 143,4 \text{ mm}$, $VHFO = 115,4 \text{ mm}$ a $DFOV^{14} = 184,1 \text{ mm}$ (viz kapitola č. 6.5), při reálném pokrytí jednoho pixelu 0,2 mm.



Obrázek 52 - zorné pole termokamery



LWIR WIC 640

Obrázek 53 - zorné pole termokamery [29]

9.6 Software

Pořízené údaje (termogramy) byly vyhodnocovány a zpracovány v softwaru CorePlayer který byl navržen pro detailní analýzu termogramů a radiometrických videí

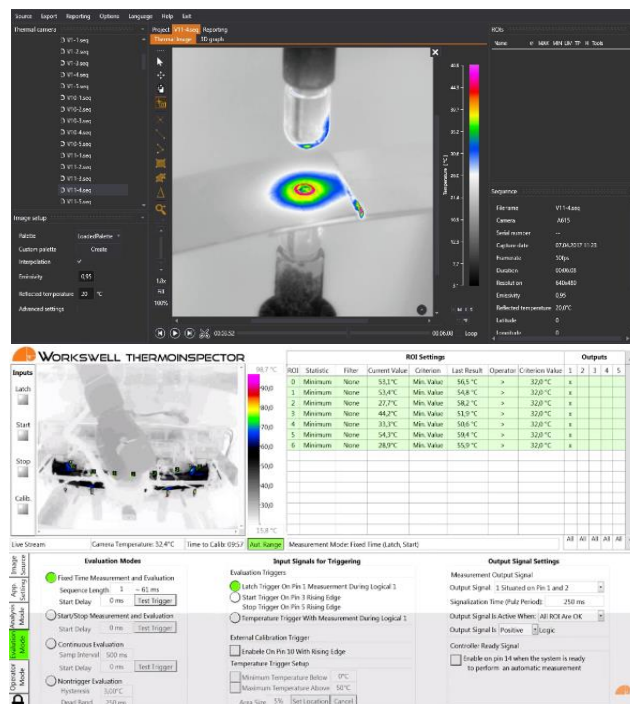
pořízených za pomoci termokamery, tento software umožňuje například editaci dat a jejich export do jiných formátů či tvorbu potřebných reportů. Software obsahuje všechny běžné již zmiňované funkce pro potřebnou analýzu získaných dat (teplota v bodě, měřicí oblast, minimum a maximum v oblasti, teplotní profil, izoterma atd. viz kapitola č. 6.6) ale také méně obvyklé funkce (tvorba 3D modelů, protokolů

¹⁴ DFOV – Diagonal Field of View

a detailní analýzu videa včetně střihu jednotlivých sekvencí atd.). Software umožňuje také nastavení teplotního rozsahu, atmosférických podmínek, emisivity apod. [25]

Další používaný software během daného experimentu byl software ThermoInspector který patří mezi termovizní NDT¹⁵ inspekční systém využíváný pro kontrolu a posouzení kvality ve výrobě. Systém ThermoInspector se osvědčil a je využíván v desítkách různých odvětví průmyslu: hutnictví, sklářství, plastikářství, slévárenství, a nyní i pro proces svařování. Systém umožňuje tvorbu programových modulů pro specifické algoritmy strojového vidění, samozřejmě je možnost nastavení vizualizace a vyhodnocovacích pravidel. ThermoInspector navíc umožňuje funkci triggerování, která není v CorePlayeru dostupná. Tato funkce je důležitá pro přesné načasování okamžiku sběru dat což je klíčové při vytváření databáze, ale i při vyhodnocení daného svaru. Tato funkce tedy zajistí opakovatelnost měření a relevantnost dat v pořizované databázi. Oba tyto systémy jsou od společnosti Workswell s.r.o. [25], [27]

Ukázka pracovního prostředí softwaru CorePlayer při vyhodnocování svarového spoje (nahore) a pracovního prostředí softwaru ThermoInspector při monitorování svařovacího procesu (dole) je na obrázku č. 54.



Obrázek 54 - software CorePlayer a ThermoInspector [25]

¹⁵ NDT – Non Destructive Testing (nědestruktivní zkoušení materiálů)

10 Provedení experimentu

Před samotným experimentem byla nejprve na svařovacím zařízení (odporový lis Dalex PMS 11-4) provedena optimalizace svařovacích parametrů dle normy ČSN EN ISO 14 373 pro metodu odporového bodového svařování. Tyto optimalizované parametry byly určeny pro experimentální materiál DC05+ZE s tloušťkou 0,7 mm.

Výsledné optimalizované parametry svařovacího procesu jsou uvedeny v tabulce č. 12.

Tabulka 12 - optimalizované parametry

Optimalizované svařovací parametry		
Svařovací proud (I)	Čas svařování (t)	Přítlačná síla (F)
23,5% (6,5 kA)	200 [ms]	2 [kN]

Pro další část experimentu se svařilo celkem 7 sad zkušebních vzorků. První sada vzorků (deset svarových spojů) byla svařena stanovenými optimalizovanými parametry. Při svařování následných 6 sad zkušebních vzorků se v každé sadě vždy úmyslně měnila hodnota jednoho ze stanovených svařovacích parametrů tak, aby byl buď příliš vysoký, nebo příliš nízký. Každý průběh svarového spoje byl navíc snímán termokamerou, což vedlo k získání detailních termografických údajů potřebných pro výslednou analýzu.

Díky tomu se podařilo v laboratorním prostředí nasimulovat podmínky, které mohou vzniknout při svařovacím procesu v běžném průmyslovém prostředí, a které mohou zapříčinit vznik nekvalitního svarového spoje. Celkem bylo pro experiment vytvořeno 102 svarových spojů (tedy i termogramů), z toho 31 svarů bylo tzv. učících (viz kapitola 8.3).

Takto vytvořené svarové spoje byly následně vyhodnoceny a podrobeny technologickým zkouškám, a to jak nedestruktivním VT (vizuální zkouška), UT (ultrazvuková zkouška) tak destruktivním, konkrétně byla provedena mechanizovaná odlupovací zkouška a pro určení jednotlivých vad které svarové spoje obsahují byl u vybraných svarových spojů proveden metalografický výbrus pro zkoušku makrostruktury.

10.1 Ultrazvuková zkouška

Všechny vytvořené svary byly zkontrolovány nedestruktivně pomocí ultrazvukové zkoušky na přístroji OmnyScan od firmy Olympus s.r.o. s použitím sondy s vodní předsádkou s měničem 4,5 mm a frekvencí 20MHz.

Tabulka 13 - technické parametry přístroje OmnyScan []

Přístrojové parametry	
Rozsah pulzní frekvence	10 Hz až 2000 Hz
Délka pulsu	25 ns až 5000 ns
Použitá sonda	Water col spo
Průměr měniče použité sondy	4,5 mm
Použitá pulzní frekvence	20 MHz



Obrázek 55 - přístroj OmnyScan od firmy Olympus []

Vyhodnocení svarů bylo provedeno na základě vlastností echogramů a tloušťky stlačených plechů. Z těchto údajů bylo provedeno celkové vyhodnocení ultrazvukové zkoušky (V – Vyhovuje / N – Nevyhovuje).

Tabulka 14 - výsledné vyhodnocení svarových spojů ultrazvukovou zkouškou

optimalizované parametry I = 23,5% (6,5kA)		nízký svařovací proud I = 17% (4kA)		vysoký svařovací proud I = 26% (8,5kA)		krátký čas svařování t=140ms		dlouhý čas svařování t=260ms		nízká přitlačná síla F=1kN		vysoká přitlačná síla F=2,5kN	
číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr
21	V	34	N	48	V	66	N	80	N	93	V	110	V
22	V	35	N	49	V	67	N	81	V	97	N	111	V
23	V	36	N	50	V	68	N	82	N	98	N	112	V
24	N	37	N	51	V	69	N	83	V	99	N	113	V
25	V	38	N	52	N	70	N	84	V	100	V	114	V
26	N	39	N	53	V	71	V	85	N	101	N	115	V
27	V	40	N	54	V	72	N	86	V	102	V	116	V
28	V	41	N	55	V	73	N	87	V	103	V	117	V
29	V	42	N	56	V	74	N	88	V	104	N	118	V
30	V	43	N	57	V	75	N	89	N	105	V	119	V
										106	V		

Pozn.

detailní hodnoty výsledků všech technologických zkoušek jsou uvedeny v příloze č.1.

10.2 Mechanizovaná odlupovací zkouška

Všechny vytvořené svary byly dále podrobeny destruktivní mechanické odlupovací zkoušce dle ČSN EN ISO 10 447 pomocí digitálního vertikálního hydraulického zkušebního stroje LabTest model 5.100S na ústavu strojírenské technologie.

Tabulka 15 - technické parametry přístroje LabTest []

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



Obrázek 56 - přístroj LabTest

Vyhodnocení svarů bylo provedeno na základě maximální únosné síly, optimální hodnota byla stanovena z rozsahu naměřených sil odpovídajících vyhovujícím svarovým spojům. (778 až 1042 kN). Po následném dotrnutí vzorků byly změřeny průměry svarových čoček a bylo zkontrolováno, zda byl v souladu s normou ČSN EN ISO 14 373 vytvořen vyhovující svarový spoj (pro naše experiment se má vyhovující průměr svarových čoček pohybovat v rozmezí 4,5 až 6,7 mm).

Tabulka 16 - výsledné vyhodnocení svarových spojů mechanizovanou odlupovací zkouškou

optimalizované parametry I = 23,5% (6,5kA)		nízký svařovací proud I = 17% (4kA)		vysoký svařovací proud I = 26% (8,5kA)		krátký čas svařování t=140ms		dlouhý čas svařování t=260ms		nízká přitlačná síla F=1kN		vysoká přitlačná síla F=2,5kN	
číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr	číslo svaru v SW	závěr
21	V	34	V	48	N	66	V	80	N	93	V	110	V
22	V	35	V	49	N	67	V	81	N	97	V	111	N
23	V	36	N	50	N	68	V	82	V	98	N	112	N
24	V	37	N	51	N	69	V	83	N	99	N	113	N
25	V	38	V	52	N	70	V	84	N	100	V	114	V
26	V	39	V	53	N	71	V	85	N	101	V	115	N
27	V	40	N	54	N	72	V	86	N	102	N	116	V
28	V	41	V	55	N	73	V	87	N	103	V	117	V
29	V	42	V	56	N	74	V	88	N	104	N	118	N
30	V	43	V	57	N	75	V	89	N	105	N	119	V
										106	N		

10.3 Technický postup pro opakované dosažení vad

Jak již bylo uvedeno (kap. 7.2) existuje velké množství jednotlivých typů vad odporových bodových svarových spojů, příčiny jejich vzniku lze rozdělit do dvou skupin, vady vznikající především buď chybnou či zanedbanou technologickou přípravou (znečištění svarové plochy či elektrod, špatná volba svařovaného materiálu, špatně zvolené polohování plechů apod.) nebo chybným technickým provedením které spočívá především ve volbě a nastavení svařovacích parametrů.

Pro první skupinu jsou typické vady jako jsou například oxidické vměstky, vměstky nečistot apod. Navrhnout technický postup pro opakované dosažení těchto vad by bylo obtížné, většinou by vedlo k znehodnocování materiálů (záměrné znečištění plechů, opotřebením elektrod atd.) a bylo časově náročné. Jako vhodnou alternativou pro navržení technického postupu opakovatelnosti vad se jeví možnost využití rychlého nastavování svařovacích parametrů a schopnosti rychle měnit jejich hodnoty na svařovacím zařízení.





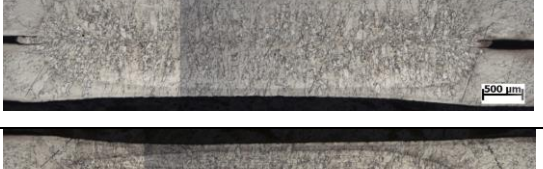

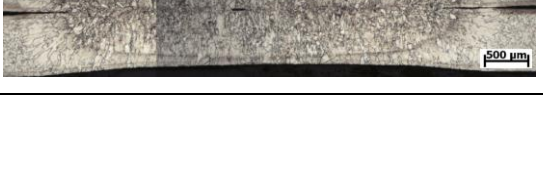
Při návržení technického postupu pro opakovatelný vznik vad tedy vycházíme z myšlenky, že existují-li optimalizované parametry pro opakované dosažení vyhovujícího svarového spoje (spoje bez vad), lze experimentálně určit také parametry pro opakované dosažení spoje nevyhovujícího (obsahujícího vadu).

Pro zjištění, jaké konkrétní vady svarové spoje obsahují, bylo u vybraných svarových spojů (učící svarové spoje viz tabulka č. 17) provedeno vizuální vyhodnocení pomocí metalografického výbrusu (v souladu s požadavky normy ČSN EN ISO 14 373). Tj. zejména průměr svaru (čočky) má být symetrický a pohybovat se okolo hodnoty cca $3,5\sqrt{t}$ až $5\sqrt{t}$ (kde t je tloušťka svařovaného plechu), přičemž průměr svaru d je přibližně 1,15x větší než průměr čočky. Otisky elektrod mají být mělké a pravidelné, nesmí být větší než 20% tloušťky plechu. Průvar svarové čočky do každého plechu musí být mezi 20 a 80% tloušťky plechu. Tyto svarové spoje byly pro tuto zkoušku vybrány, jelikož představují zástupce všech vytvořených sad svarových spojů, a tedy i všech použitých kombinací zkoumaných svařovacích parametrů.

Výsledky tohoto vyhodnocení jsou zaznamenány v tabulce č. 17, kde:

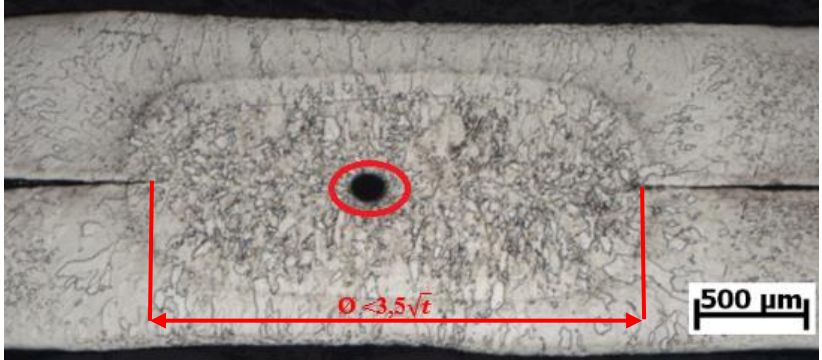
1. - *Hodnocení velikosti průvaru (A – vyhovuje, N – nevyhovuje),*
2. - *hodnocení otisku elektrod (A – vyhovuje, N – nevyhovuje),*
3. - *hodnocení vnitřní vady (A – nepřítomny, N – vyskytují se),*
4. - *hodnocení průměru svarové čočky (A – vyhovuje, N – nevyhovuje).*

Tabulka 17 - výsledné vyhodnocení makrosnímků učicích svarových spojů

Označení svaru v SW	Makrosnímek svarového spoje	Výsledky hodnocení			
		1.	2.	3.	4.
18. (optimalizované parametry)		A	A	A	A
32. (nízký svařovací proud)		A	A	N	N
47. (vysoký svařovací proud)		A	A	N	N
65. (krátký svařovací čas)		A	A	N	A
78. (dlouhý svařovací čas)		A	A	A	N
95. (nízký přítlak)		A	A	A	A
109. (vysoký přítlak)		A	N	N	A

První výrazné vady vykazoval makrosnímek svaru č. 32, který byl vytvořen při záměrně nízkých hodnotách svařovacího proudu, tyto vady byla klasifikovány jako vady patřící do skupiny P5 – vada tvaru a rozměru, konkrétně se jedná o nevyhovující rozměr svarové čočky a v určité oblasti došlo dokonce k jejímu úplnému protavení. Bližší specifikace svarového spoje a nalezených vad je uvedena v tabulce č. 18.

Tabulka 18 - specifikace svarového spoje č. 32.

Označení svaru v SW	32. (nízký svařovací proud)
Nalezené vady: (svar obsahuje vady spadající do skupiny P5 – vady tvaru a rozměru).	
Referenční číslo vady	Označení a definice
P 5213	Průměr čočky je příliš malý, (průměr čočky je menší, než je požadováno).
P 523	Průchozí otvor v místě svaru způsobený výstřikem roztaveného kovu.

Nastavené svařovací parametry, při kterých došlo k vytvoření svaru č. 32 a tedy i k vytvoření obsažených vad jsou uvedeny v tabulce č. 19.

Tabulka 19 - nastavené svařovací parametry svaru č. 32.

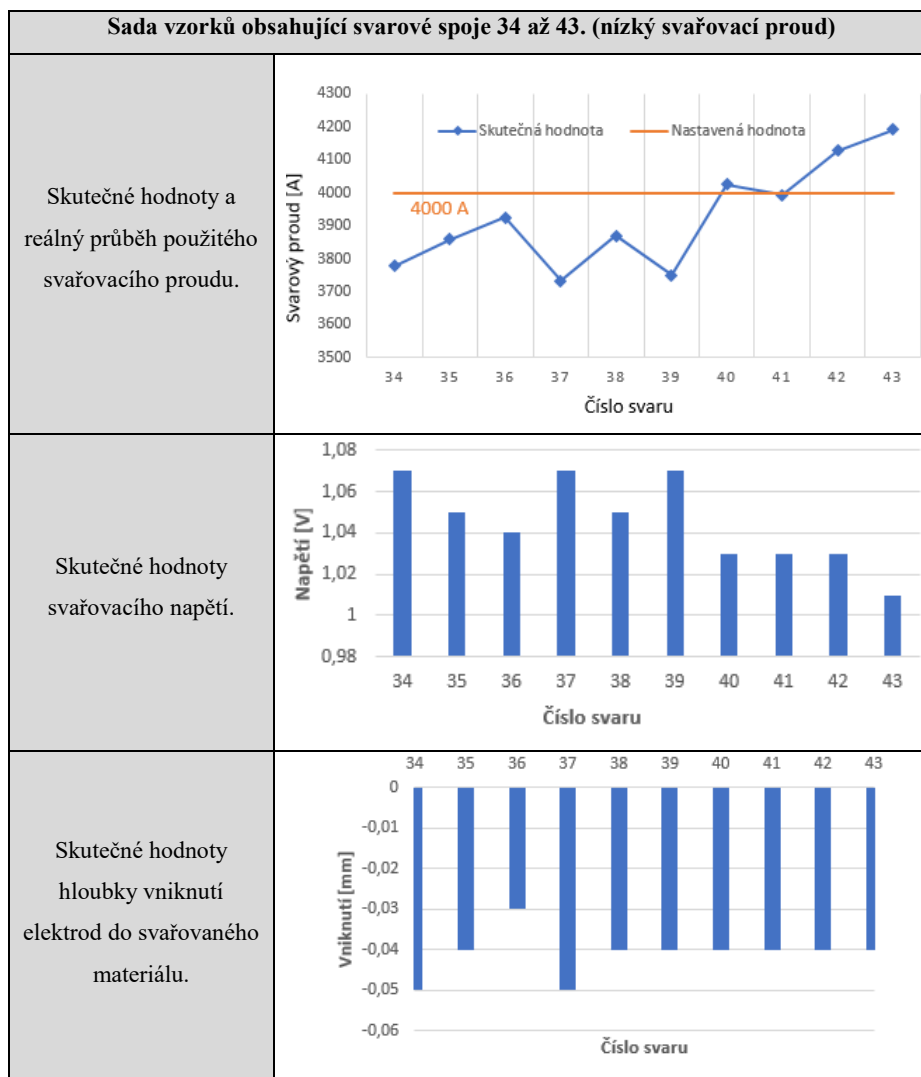
Nastavené svařovací parametry svaru č. 32.		
Svařovací proud (I)	Čas svařování (t)	Přítlačná síla (F)
17% (4 kA)	200 [ms]	2 [kN]

Tyto svařovací parametry byly použity u jedné sady svarových spojů (s označením 34 až 43). Díky vyhodnocení makrosnímku, výsledkům nedestruktivní ultrazvukové zkoušky a destruktivní mechanizované odlupovací zkoušky lze tedy předpokládat že tyto vady (a jejich kombinace) obsahuje celá sada těchto vzorků.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 8.3, řídicí jednotka použitého svařovacího zařízení (odporový lis Dalex PMS 11-4) se snaží doregulovat průběh parametrů během svařování dle vzorových (učících) svarů. Proto se hodnoty nastavených svařovacích

parametrů mohou mírně lišit od hodnot skutečných, tyto odchylky byly zaznamenány pomocí SW (SER-Mega PC) a jsou zobrazeny v tabulce č. 20, která obsahuje reálný průběh svařovacího proudu, hodnoty použitého napětí a skutečnou hloubku vniknutí elektrod do svařovaného materiálu.

Tabulka 20 - naměřené skutečné hodnoty pomocí softwaru SER-Mega PC



Skutečné svařovací parametry, zjištěné pomocí SW (SER-Mega PC) při kterých došlo k vytvoření svaru č. 32 a tedy i k vytvoření obsažených vad jsou uvedeny v tab. č. 21.

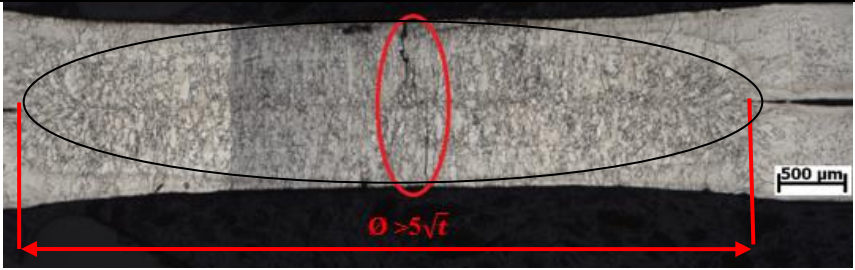
Tabulka 21 - skutečné svařovací parametry

Skutečné svařovací parametry svaru č. 32.		
Svařovací proud (I)	Čas svařování (t)	Přítlačná síla (F)
% (3,676 kA)	200 [ms]	2 [kN]

Z výše uvedených skutečností tak můžeme konstatovat, že pro vytvoření odporového bodového svarového spoje z hlubokotažné oceli DC05+ZE tloušťky 0,7 mm obsahujícího vady typu P 5213 (průměr čočky je menší, než je požadováno) a P 523 (úplné protavení čočky nebo svaru) je důležité, aby se použité svařovací parametry pohybovaly kolem hodnot: svařovací proud $I = 3,676$ kA, čas svařování $t = 200$ ms, přítláčnou sílu = 2 kN (které odpovídá hloubka vtisku elektrod = 0,04 mm) a napětí při svařovacím procesu $U = 1,07$ V.

Další značný výskyt vad, které mají výrazný vliv na znehodnocení svarového spoje byl analyzován u učícího svarového spoje č. 47. Tento spoj vznikl při záměrně vysokých hodnotách svařovacího proudu čímž se potvrdily výsledky předešlých studií o tom, že hodnota zvoleného svařovacího proudu má zásadní vliv na kvalitu výsledného svařence. Nalezené vady, které svarový spoj obsahuje, patří do skupin P1 – trhliny a P5 – vady tvaru a rozměru. Bližší specifikace svarového spoje a jeho vad je uvedena v tabulce č. 22.

Tabulka 22 - specifikace svarového spoje č. 47.

Označení svaru v SW	47. (vysoký svařovací proud)
Nalezené vady: (svar obsahuje vady spadající do skupin P1 – trhliny a P5 – vady tvaru a rozměru).	
Referenční číslo vady	Označení a definice
P 1001	Mikrotrhlina, (trhlina obvykle pozorovatelná pouze pod mikroskopem).
P 5214	Průměr čočky je příliš velký, (průměr čočky je větší, než je požadováno).
P 524	Nadměrná tepelně ovlivněná oblast (TOO je větší, než je požadováno).

Nastavené svařovací parametry, při kterých došlo k vytvoření svaru č. 47 a tedy i k vytvoření obsažených vad jsou uvedeny v tabulce č. 23.

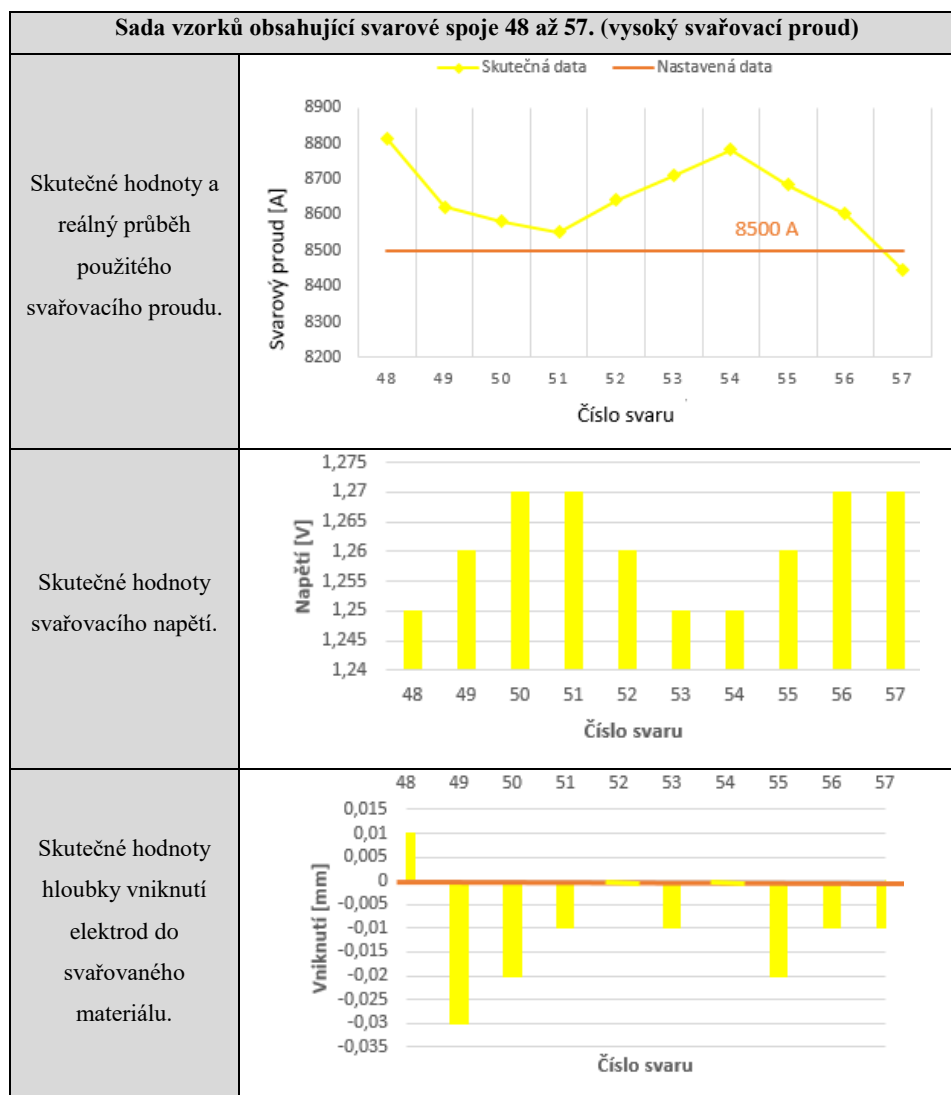
Tabulka 23 - nastavené svařovací parametry svaru č. 47.

Nastavené svařovací parametry svaru č. 47.		
Svařovací proud (I)	Čas svařování (t)	Přítláčná síla (F)
26% (8,5 kA)	200 [ms]	2 [kN]

Tyto svařovací parametry byly použity u jedné sady svařových spojů (s označením 48 až 57). Díky vyhodnocení makrosnímku, technologických zkoušek lze tedy předpokládat že tyto vady (a jejich kombinace) obsahuje celá sada těchto vzorků.

Odchytky nastavených svařovacích parametrů způsobené regulací řídicí jednotkou použitého svařovacího zařízení byly zaznamenány pomocí SW (SER-Mega PC) a jsou zobrazeny v tabulce č. 24, která opět obsahuje reálný průběh svařovacího proudu, hodnoty použitého napětí a skutečnou hloubku vniknutí elektrod do svařovaného materiálu.

Tabulka 24 – naměřené skutečné hodnoty pomocí softwaru SER-Mega PC



Skutečné svařovací parametry, zjištěné pomocí SW (SER-Mega PC) při kterých došlo k vytvoření svaru č. 47 a tedy i k vytvoření obsažených vad jsou uvedeny v tabulce č. 25

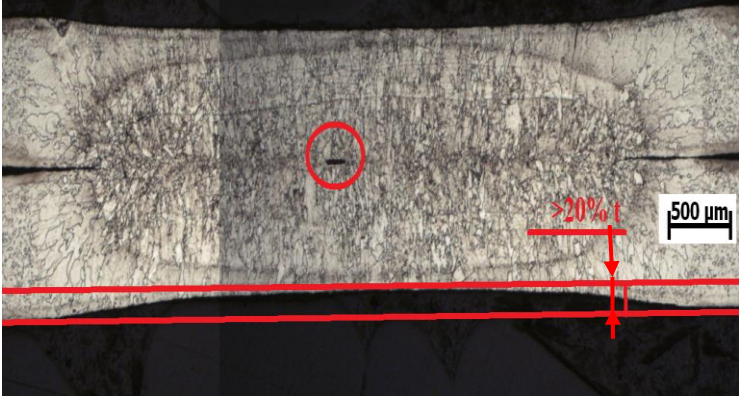
Tabulka 25 - skutečné svařovací parametry svaru č. 47.

Skutečné svařovací parametry svaru č. 47.		
Svařovací proud (I)	Čas svařování (t)	Přítlačná síla (F)
% (8,786 kA)	200 [ms]	2 [kN]

Z daných výsledků tak můžeme předpokládat, že pro vytvoření odporového bodového svarového spoje z hlubokotažné oceli DC05+ZE tloušťky 0,7 mm obsahujícího vady typu P 1001 (mikrotrhlina), P 5214 (průměr čočky je větší, než je požadováno) a P 524 (nadměrná tepelně ovlivněná oblast) je zapotřebí použít následující svařovací parametry: svařovací proud $I = 8,786$ kA, čas svařování $t = 200$ ms, přítlačnou sílu = 2 kN (které v tomto případě odpovídá hloubka vtisku elektrod = 0,01 mm) a napětí při svařovacím procesu $U = 1,25$ V

Poslední makrosnímek, na kterém lze pozorovat výraznější svarové vady patří svarovému spoji č. 109. Tento spoj vznikl při záměrně vysokých hodnotách přítlačné síly. Nalezené vady, které svarový spoj obsahuje patří do skupiny P5 – vady tvaru a rozměru. Bližší specifikace svarového spoje je uvedena v tabulce č. 26.

Tabulka 26 - specifikace svarového spoje č. 109.

Označení svaru v SW	109. (vysoký přítlak)
Nalezené vady: (svar obsahuje vady spadající do skupin P2 – dutiny a P5 – vady tvaru a rozměru).	
Referenční číslo vady	Označení a definice
P 523	Průchozí otvor v místě svaru způsobený výstřikem roztaveného kovu.
P 52642	Hloubka vtisku je větší, než je požadováno.

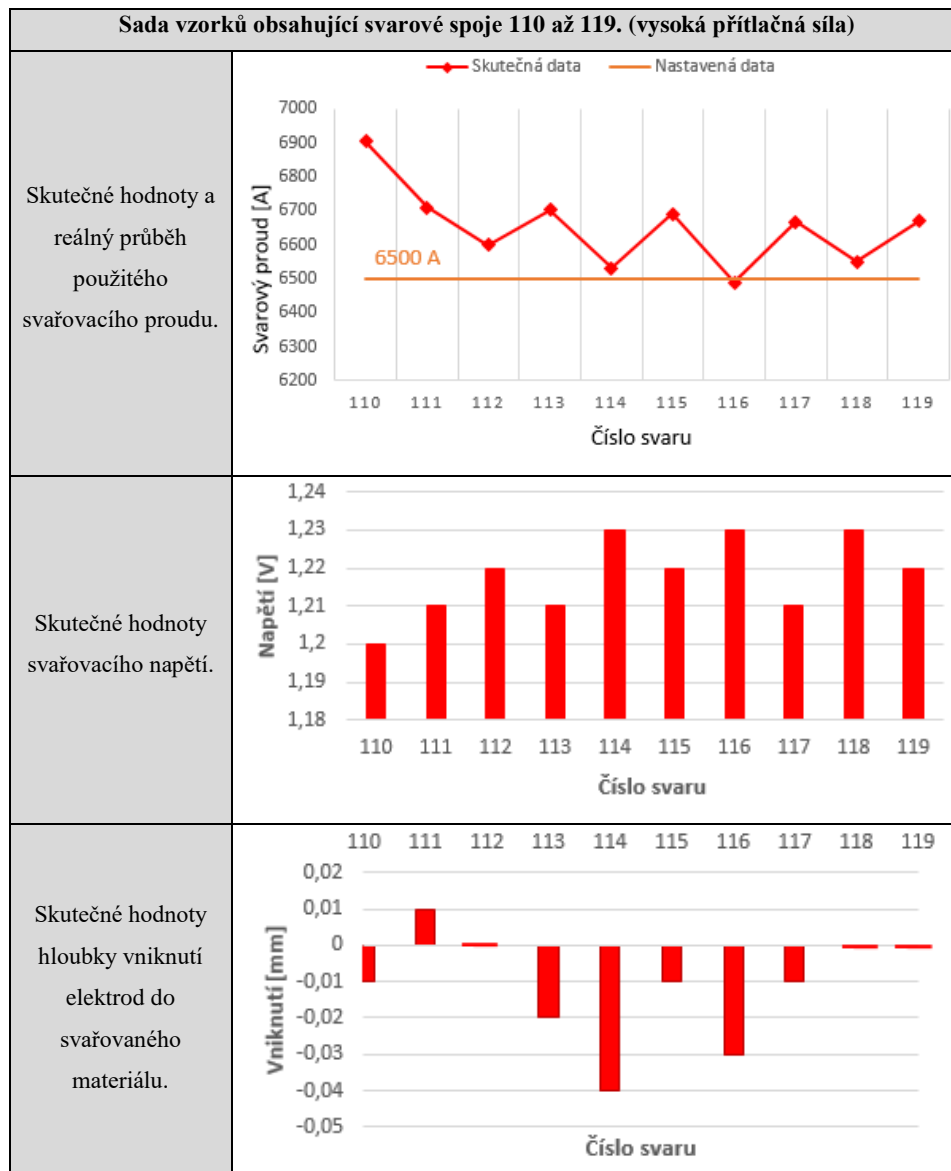
Nastavené svařovací parametry, při kterých došlo k vytvoření svaru č. 109 a tedy i k vytvoření obsažených vad jsou uvedeny v tabulce č. 27.

Tabulka 27 - nastavené svařovací parametry svaru č. 109.

Nastavené svařovací parametry svaru č. 109.		
Svařovací proud (I)	Čas svařování (t)	Přítlačná síla (F)
23,5% (6,5 kA).	200 [ms]	2,5 [kN]

Odchytky nastavených svařovacích parametrů způsobené regulací řídicí jednotkou použitého svařovacího zařízení jsou zobrazeny v tabulce č. 28 (reálný průběh svařovacího proudu, hodnoty použitého napětí a skutečnou hloubku vniknutí elektrod do svařovaného materiálu).

Tabulka 28 - skutečné hodnoty parametrů naměřené pomocí softwaru SER-Mega PC



Skutečné svařovací parametry, zjištěné pomocí SW (SER-Mega PC) při kterých došlo k vytvoření svaru č. 109 a tedy i k vytvoření obsažených vad jsou uvedeny v tabulce č. 29.

Tabulka 29 - skutečné svařovací parametry svaru č. 109.

Skutečné svařovací parametry svaru č. 109.		
Svařovací proud (I)	Čas svařování (t)	Přítlačná síla (F)
% (6,948kA)	200 [ms]	2,5 [kN]

Pro vytvoření odporového bodového svarového spoje z hlubokotažné oceli DC05+ZE tloušťky 0,7 mm obsahujícího vady typu P 523 (Úplné protavení čočky nebo svaru) a P 52642 (hloubka vtisku je větší, než je požadováno), je zapotřebí použít následující svařovací parametry: svařovací proud $I = 6,948$ kA, čas svařování $t = 200$ ms, přítlačnou sílu = 2,5 kN (které v tomto případě odpovídá hloubka vtisku elektrod = 0,04 mm) a napětí při svařovacím procesu $U = 1,19$ V.

Konečný přehled všech nalezených typů vad obsažených v učicích svarech a skutečné hodnoty nastavených svařovacích parametrů při kterých k daným chybám došlo jsou uvedeny v tabulce č. 30.

Tabulka 30 - nalezené vady a jejich použité svařovací parametry

Specifikace vady		Skutečné hodnoty svařovacích parametrů				
Referenční číslo	Vada	Proud (I) [kA]	Čas (t) [ms]	Síla (F) [kN]	Napětí (U) [V]	Vtisk [mm]
P 523	Úplné protavení čočky nebo svaru	6,948	200	2,5	1,19	0,04
		3,676	200	2	1,07	0,04
P 1001	Mikrotrhlina	8,786	200	2	1,25	0,01
P 5213	Malý průměr čočky	3,676	200	2	1,07	0,02
P 5214	Velký průměr čočky	8,786	200	2	1,25	0,01
P 524	Nadměrná TOO	8,786	200	2	1,25	0,01
P 52642	Velká hloubka vtisku	6,948	200	2,5	1,19	0,04

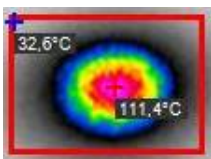
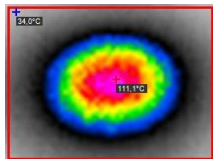
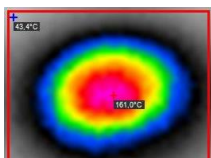
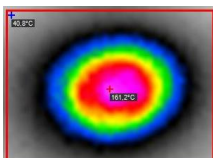
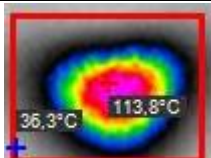
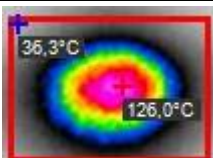
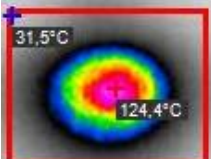
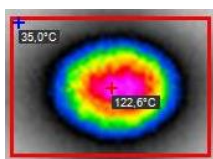
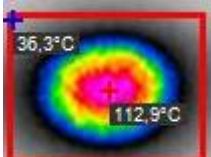
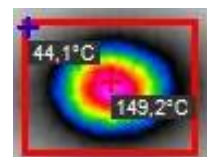
10.4 Realizace záznamů z termokamery

Dalším úkolem je pro vybrané typy vad bodových odporových svarů realizovat dvě nezávislé množiny (trénovací a testovací data) z teplotních (radiometrických) záznamů z termokamery. Tyto množiny poslouží pro tvorbu algoritmů, které na základě stanovených příznaků a databáze vyhodnotí, zda se jedná o vyhovující či potenciálně vadný svarový spoj.

10.5 Primární množina

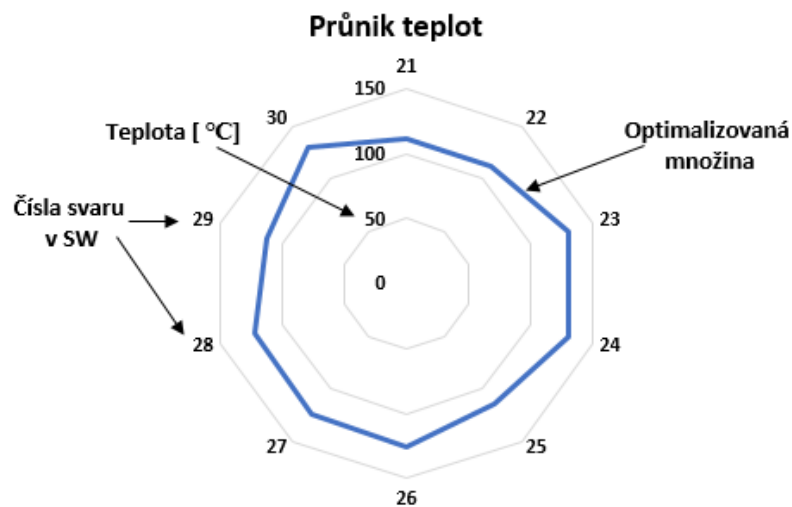
První množina dat byla vytvořena pomocí hodnot maximálních teplot v jisté zájmové oblasti, konkrétně byla v softwaru CorePlayer (viz kapitole 8.6) pomocí funkce oblast (viz kapitola 6.6.2) vyhodnocena maximální teplota v teplotním poli svarového spoje. Výsledné hodnoty teplot (pro optimalizované parametry) spolu s termogramy příslušného svarového spoje jsou zaznamenány v tabulce č. 31.

Tabulka 31 - Výsledné hodnoty maximálních teplot ve zvoleném teplotním poli

Optimalizované parametry					
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			21		22
	Max. teplota		111,4 °C	Max. teplota	111,1 °C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			23		24
	Max. teplota		131 °C	Max. teplota	131,2 °C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			25		26
	Max. teplota		113,8 °C	Max. teplota	125 °C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			27		28
	Max. teplota		124,4 °C	Max. teplota	122,4 °C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			29		30
	Max. teplota		112,9 °C	Max. teplota	129,2 °C

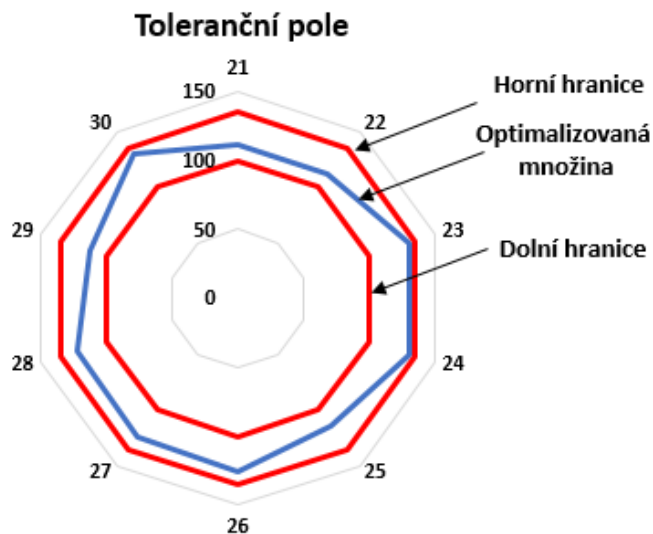
Na základně vyhodnocení získaných termogramů (tedy zjištěných hodnot maximálních teplot ve zvolené tepelné oblasti) jsme schopni určit optimální průnik teplot. Jelikož tento průnik byl vytvořen z termografických údajů pořízených při monitoringu svarových spojů vznikajících při zvolených optimalizovaných parametrech (tedy svarů které jsou díky technologickým zkouškám označeny za svary vyhovující), lze tedy tento průnik považovat za průnik ideální.

Výsledný tvar průniku (množin teplot) vykresluje graf na obrázku č. 57.



Obrázek 57 - Průnik teplot odpovídající vyhovujícím svarovým spojům

Aby bylo pomocí získaných dat možné vyhodnotit kvalitu svarového spoje, je třeba navrhnout vhodné příznaky pro klasifikaci: defektní / nedefektní svarový spoj. Z tohoto důvodu byli na základě výsledného tvaru průniku (množiny) teplot, vymezeny dolní a horní hranice, které vytvořili oblast odpovídající potenciálnímu vyhovujícímu svarovému spoji (toleranční pole), viz. graf na obrázku č. 58.



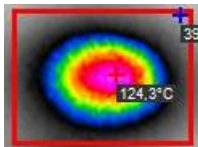
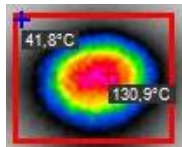

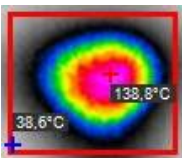
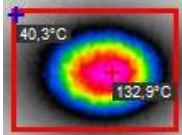
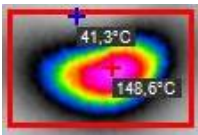
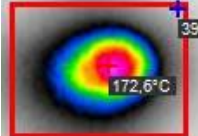
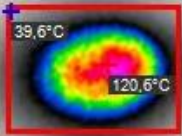
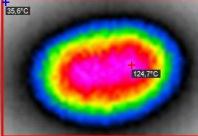

Obrázek 58 - Vymezená oblast přípustných řešení (toleranční pole)

Předpokládáme tedy, že pomocí této oblasti (jejíž dolní hranice odpovídá 100 °C a horní hranice 135°C) lze experimentálně určit (na základě naměřených termografických dat, konkrétně maximálních teplot v oblasti svarového spoje) zda daný zkoumaný svarový spoj odpovídá předepsaným standardům.

Pro ověření tohoto předpokladu byla pomocí získaných termografických dat vyhodnocena také maximální teplota v teplotním poli pro svarové spoje, u kterých byla záměrně provedena změna svarových parametrů, příslušné svarové spoje tak nevznikaly při ideálních (optimalizovaných parametrech) a proto lze předpokládat vznik nevyhovujících (defektních) spojů. Tento fakt následně potvrdily technologické zkoušky.

Výsledné hodnoty teplot (pro vysoký svařovací proud) spolu s termogramy příslušného svarového spoje jsou zaznamenány v tabulce č. 32.

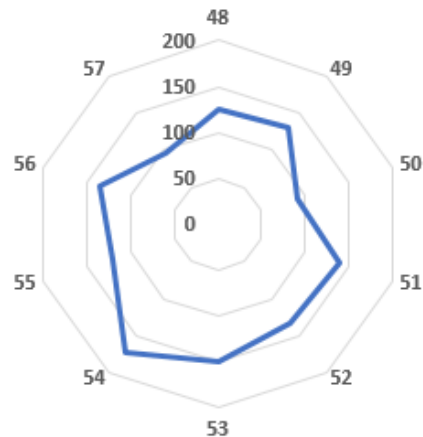
Tabulka 32 - Výsledné hodnoty maximálních teplot ve zvoleném teplotním poli

Vysoký svařovací proud					
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			48		49
	Max. teplota		124,3 °C	Max. teplota	130,9°C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			50		51
	Max. teplota		92°C	Max. teplota	138,8°C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			52		53
	Max. teplota		132,9°C	Max. teplota	148,6°C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			54		55
	Max. teplota		172,6°C	Max. teplota	120,6°C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			56		57
	Max. teplota		134,7°C	Max. teplota	95,8°C

Stejně jako u svarů vytvořených pomocí optimalizovaných svařovacích parametrů byl i u svarů vytvořených při záměrně vysokých hodnotách svařovacího proudu nejprve určen (na základně vyhodnocení získaných termogramů, tedy zjištěných hodnot maximálních teplot ve zvolené tepelné oblasti) průnik teplot (množina teplot).

Výsledný tvar dané množiny, hodnoty příslušných teplot a označení svařových spojů dle SW, jsou zobrazeny v grafu na obrázku č. 59.

Průnik teplot (vysoký svařovací proud)

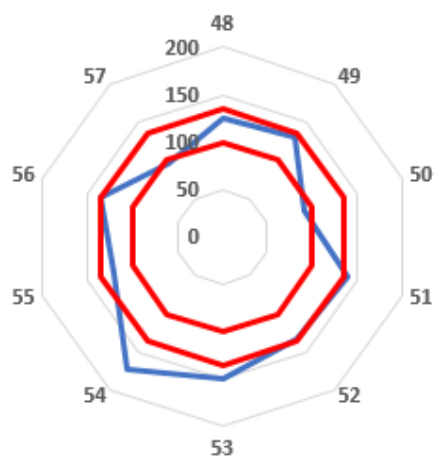


Obrázek 59 - průnik teplot (množina) odpovídající použití vysokého svařovacího proudu

Pro zjištění, zdali jsme schopni odhalit nekvalitní svařové spoje (spoje obsahující vady) pomocí termografického měření byla tato množina teplot (odpovídající defektním svařovým spojům) porovnána s vytvořeným tolerančním polem vzniklým při analýze vyhovujících svařových spojů (viz obrázek č. 57).

Průnik vzniklé množiny teplot s tolerančním polem pro vyhovující svařové spoje je na obrázku č. 60.

Toleranční pole



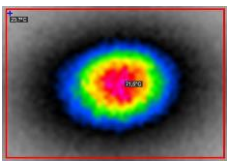
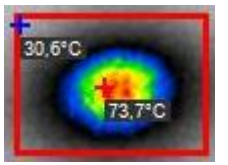
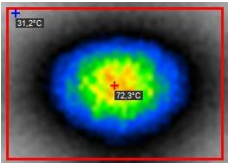
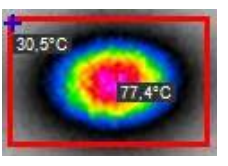
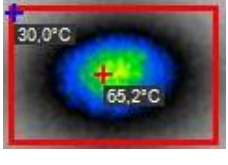
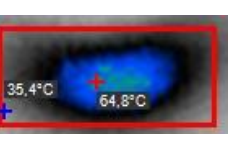
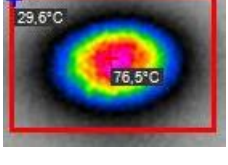
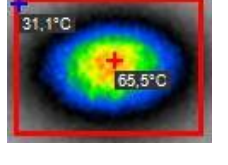
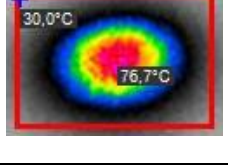
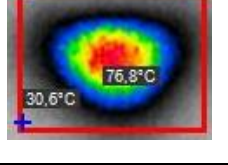
Obrázek 60 - průnik množiny (odpovídající vysokému svařovacímu proudu) a tolerančního pole

Po porovnání vzniklé množiny s tolerančním polem lze určit které svarové spoje jsou z hlediska maximální naměřené teploty v teplotním poli svaru vyhovující (jsou uvnitř tolerančního pole) a které svarové spoje mohou obsahovat potencionální vady (jsou mimo toleranční pole). Mezi nevyhovující svarové spoje patří spoje č: 50, 51, 53, 54, a 57. Stanovené toleranční pole tak vyhodnotilo že 50 % svarových spojů ze sady obsahující svarové spoje vytvořené při vysokých parametrech svařovacího proudu je nevyhovujících.

Další záměrná změna svařovacích parametru byla provedena v sadě svarových spojů (34 až 43) u kterých došlo k nastavení nízkého svařovacího proudu. Technologické zkoušky vyhodnotily všechny svarové spoje z této sady jako nevyhovující.

Výsledné hodnoty teplot (pro nízký svařovací proud) spolu s termogramy příslušného svarového spoje jsou zaznamenány v tabulce č. 33.

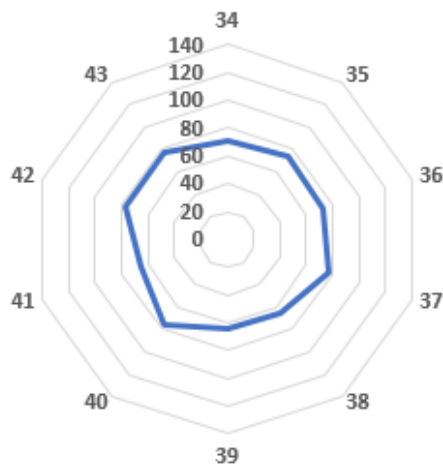
Tabulka 33 - Výsledné hodnoty maximálních teplot ve zvoleném teplotním poli

Nízký svařovací proud					
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			34		35
	Max. teplota		71,5 °C	Max. teplota	73,7°C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			36		37
	Max. teplota		72,3°C	Max. teplota	77,4°C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			38		39
	Max. teplota		65,2°C	Max. teplota	64,8°C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			40		41
	Max. teplota		76,5°C	Max. teplota	65,5°C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW		
			42		43
	Max. teplota		76,7°C	Max. teplota	76,8°C

Také u svarů vytvořených při záměrně nízkých hodnotách svařovacího proudu byl nejprve určen (na základně vyhodnocení získaných termogramů, tedy zjištěných hodnot maximálních teplot ve zvolené tepelné oblasti) průnik teplot (množina teplot).

Výsledný tvar dané množiny, hodnoty příslušných teplot a označení svarových spojů dle SW, jsou zobrazeny v grafu na obrázku č. 61.

Průnik teplot (nízký svařovací proud)

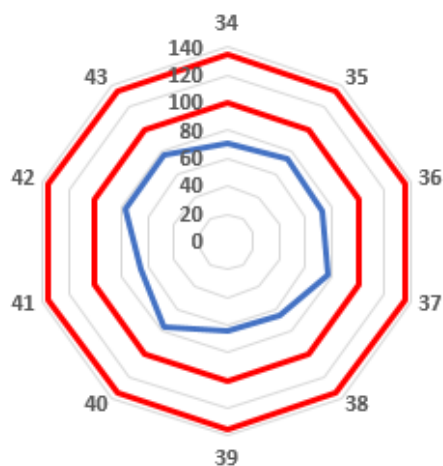


Obrázek 61 - průnik teplot (množina) odpovídající použití nízkého svařovacího proudu

Pro určení přípustnosti svarového spoje pomocí termografického měření, byla tato množina teplot (odpovídající defektním svarovým spojům) opět porovnána s vytvořeným tolerančním polem vzniklým při analýze vyhovujících svarových spojů.

Průnik vzniklé množiny teplot (pro nízký svarový proud) s tolerančním polem pro vyhovující svarové spoje je na obrázku č. 62.

Toleranční pole

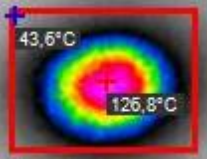
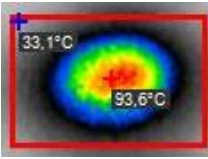
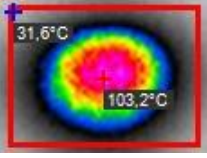
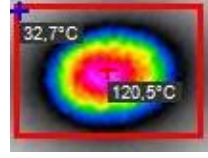
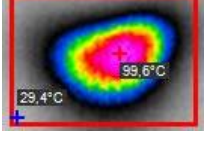
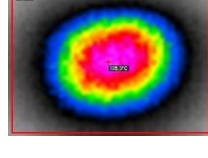
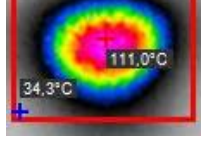


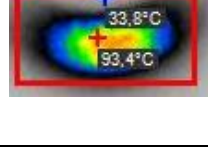


Obrázek 62 - průnik množiny (odpovídající nízkému svařovacímu proudu) a tolerančního pole

Po porovnání vzniklé množiny s tolerančním polem lze opět určit které svarové spoje jsou z hlediska maximální naměřené teploty v teplotním poli svaru vyhovující (jsou uvnitř tolerančního pole) a které svarové spoje mohou obsahovat potencionální vady (jsou mimo toleranční pole). V tomto případě se žádný ze zkoumaných svarových spojů nenachází v oblasti přípustných řešení. Stanovené toleranční pole tak vyhodnotilo, že všechny svarové spoje ze sady pro nízký svarový proud jsou nevyhovující (obsahují vady).

Poslední výrazné vady byly zaznamenány u svarových spojů, u kterých byla provedena záměrná změna svařovacích parametru (došlo k nastavení vysoké přítlačné síly). Jedná se o sadu obsahující svarové spoje č. 110 až 119. Výsledné hodnoty teplot spolu s termogramy příslušného svarového spoje jsou zaznamenány v tabulce č. 34.

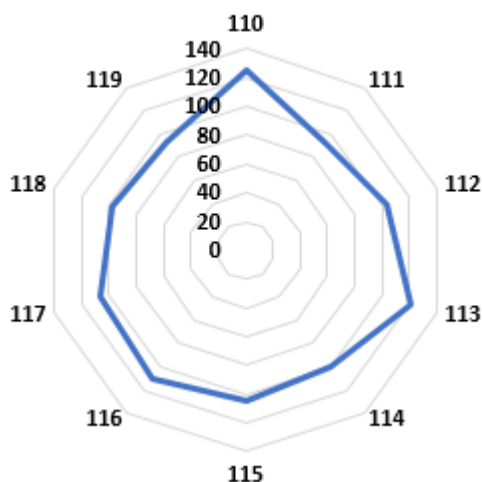
Tabulka 34 - Výsledné hodnoty maximálních teplot ve zvoleném teplotním poli

Vysoká přítlačná síla			
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW
	110		111
	Max. teplota		Max. teplota
	125,8 °C		93,6 °C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW
	112		113
	Max. teplota		Max. teplota
	103,2 °C		120,8 °C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW
	114		115
	Max. teplota		Max. teplota
	99,6 °C		105,3 °C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW
	116		117
	Max. teplota		Max. teplota
	111 °C		105,7 °C
	Číslo svaru v SW		Číslo svaru v SW
	118		119
	Max. teplota		Max. teplota
	97,6 °C		93,4 °C

Stejně jako v předchozích případech byl nejprve určen (na základně vyhodnocení získaných termogramů, tedy zjištěných hodnot maximálních teplot ve zvolené tepelné oblasti) průnik (množina) teplot, vzniklých při použití vysoké hodnoty přitlačné síly.

Výsledný tvar dané množiny, hodnoty příslušných teplot a označení svarových spojů dle SW, jsou zobrazeny v grafu na obrázku č. 63.

Průnik teplot (vysoká přitlačná síla)

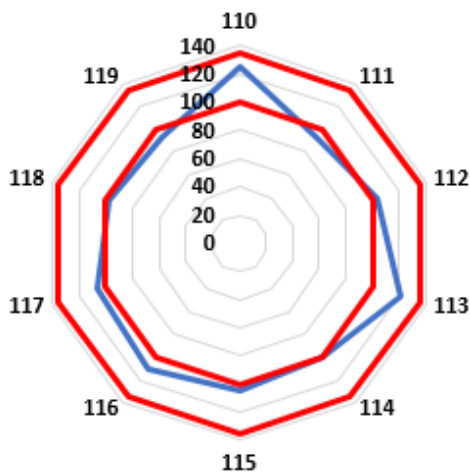


Obrázek 63 - průnik teplot (množina) odpovídající použití vysoké přitlačné síly

Vzniklá množina teplot (odpovídající vysoké přitlačné síle) byla opět porovnána s vytvořeným tolerančním polem vzniklým při analýze vyhovujících svarových spojů.

Průnik vzniklé množiny teplot (pro vysokou přitlačnou sílu) s tolerančním polem pro vyhovující svarové spoje je zobrazena v grafu na obrázku č. 64.

Toleranční pole



Obrázek 64 - průnik množiny (odpovídají vysoké přitlačné síle) a tolerančního pole

Z grafu na obrázku č. 64 je patrné že navržené toleranční pole vyhodnotilo jako nevyhovující pouze tři svarové spoje, konkrétně se jedná o svarové spoje číslo: 111, 118, a 119, tedy 30 % svarových spojů, ze sady vzniklé při vyšších hodnotách přítláčné síly, je dle zjištění hodnot maximálních teplot ve zvolené tepelné oblasti svarového spoje defektních, zbytek svarových spojů z této sady (vzniklé při nadměrně vysokých hodnotách přítláčné síly) se nachází ve stanovené toleranci.

10.6 Sekundární množina

Návrh druhé množiny dat, pro případnou tvorbu algoritmů byl také vytvořen pomocí softwaru CorePlayer od společnosti Workswell s.r.o. (viz kapitole 8.6), konkrétně byla termografická data zanalyzována pomocí funkce teplotní profil (viz kapitola 6.6.3).

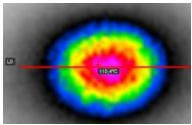

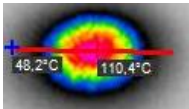

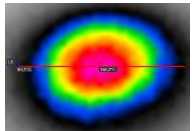

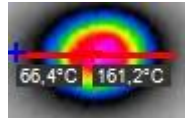

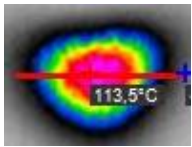

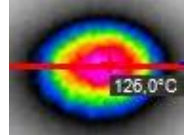

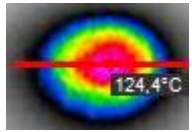

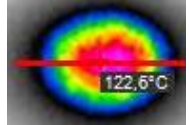

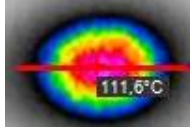

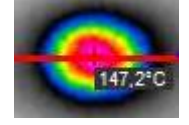
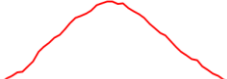
Výhodou oproti předešlé množině vzniklé na základě nejvyšší hodnoty naměřené teploty v daném teplotním poli je, že teplotní profil zobrazuje průběh teploty na uživatelem zvolené úsečce a graficky ho zaznamenává.

Tato množina tedy není závislá pouze na jedné termografické hodnotě (maximální teplota ve zvolené tepelné oblasti), ale bere v úvahu celý teplotní rozsah, v určitém uživatelem zvoleném momentu a úseku (nejvhodnější okamžik pro vytvoření záznamu je několik desítek milisekund od odskočení elektrody), a především výsledný tvar vzniklé křivky.

Lze tedy předpokládat že vzniklé toleranční pásmo dle výsledného tvaru této množiny bude ve srovnání s výše zmiňovaným tolerančním polem mít přísnější nároky na vyhodnocení kvality svarového spoje.

Zjištěné výsledné průběhy teplotních profilů (pro svary vytvořené při použití optimalizovaných parametrů) spolu s termogramy příslušného svarového spoje (obsahují vyznačenou úsečku zkoumané oblasti) jsou zaznamenány v tabulce č. 35.

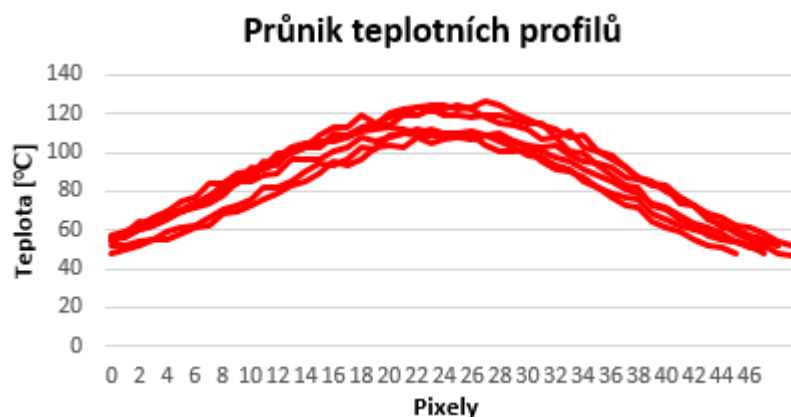
Tabulka 35 – Výsledné průběhy teplotních profilů ve zvolené oblasti

Optimalizované parametry					
Číslo svaru v SW	Teplotní profil	Číslo svaru v SW	Teplotní profil		
21			22		
23			24		
25			26		
27			28		
29			30		

Na základně vyhodnocení (tedy zjištěných průběhů teplotních profilů ve zvolené oblasti) jsme schopni určit optimální množinu. Jelikož tyto tepelné průběhy byly vytvořeny z termografických údajů pořízených při monitoringu svarových spojů vznikajících při zvolených optimalizovaných parametrech (tedy svarů, které jsou díky technologickým zkouškám označeny za svary vyhovující), lze tedy tvary vzniklých profilů považovat za ideální.

Podobně jako u návržení tolerančního pole z maximálních teplot v příslušné oblasti svarového spoje, je i při návržení tolerančního pásma z průběhů teplotních profilů nutné nejprve vytvořit průnik teplotních profilů, podle kterého budou následně zvoleny příslušné hranice tolerančního pásma.

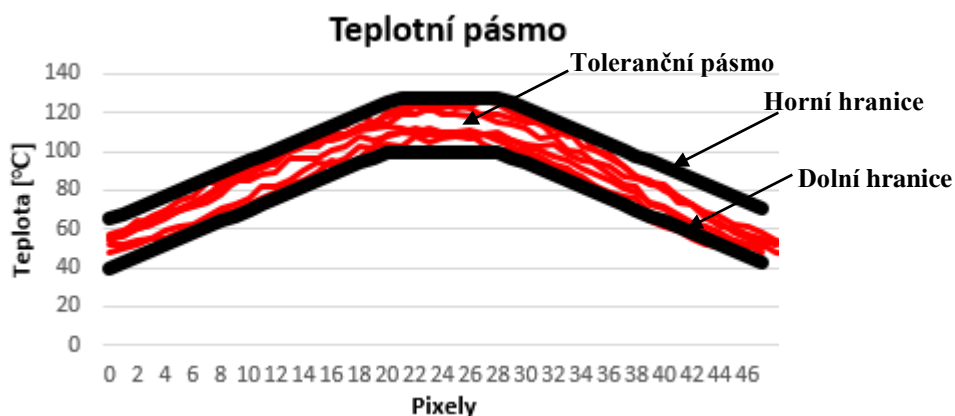
Výsledný tvar průniku (množiny teplotních profilů) je zobrazen graficky na obrázku č. 65.



Obrázek 65 - Průnik teplotních profilů odpovídají vyhovujícím svarovým spojům

Z výsledného průniku teplotních profilů je patrné že při vytváření svarových spojů při zvolených optimalizovaných parametrech mají teplotní profily celé sady svarových spojů velmi podobný průběh jak z hlediska tvaru, tak z hlediska dosažených teplot, tím se ověřila skutečnost, že při dodržení totožných svařovacích parametrů a svařovacího postupu jsou i naměřená termografická data velmi podobná.

Aby bylo pomocí získaných dat (optimálního tvaru teplotního profilu) možné vyhodnotit kvalitu svarového spoje, byli na základě výsledného tvaru průniku (množiny) teplotních profilů, vymezeny dolní a horní hranice, které vytvořili oblast odpovídající potencionálnímu vyhovujícímu svarovému spoji (toleranční pásmo), viz graf na obrázku č. 66.

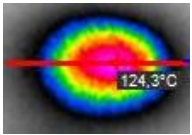

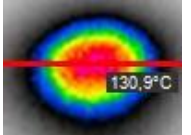



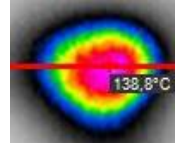

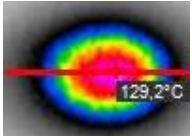

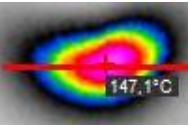

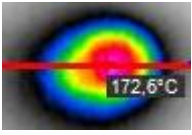

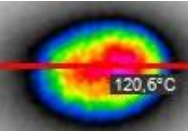

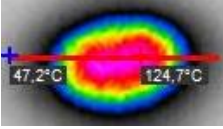





Obrázek 66 - Vymezená oblast přípustných řešení (toleranční pásmo)

Opět tedy předpokládáme, že pomocí této oblasti (jejíž dolní hranice dosahuje minima na hodnotě 0 a 46 pixelů, přičemž minimum odpovídá teplotě okolo 40°C, maximum dolní hranice je na hodnotě 20 až 28 pixelů, přičemž odpovídá teplotě okolo 100°C. Horní hranice dosahuje svého minima a maxima na totožných hodnotách, tedy 0 a 46 pixelů pro minimum a 20 až 28 pixelů pro maximum, dosažené hodnoty teplot se ovšem liší, minimum dosahuje teplot okolo 65°C a maximum odpovídá 125 °C.) lze experimentálně určit, zda příslušný zkoumaný svarový spoj odpovídá předepsaným standardům.

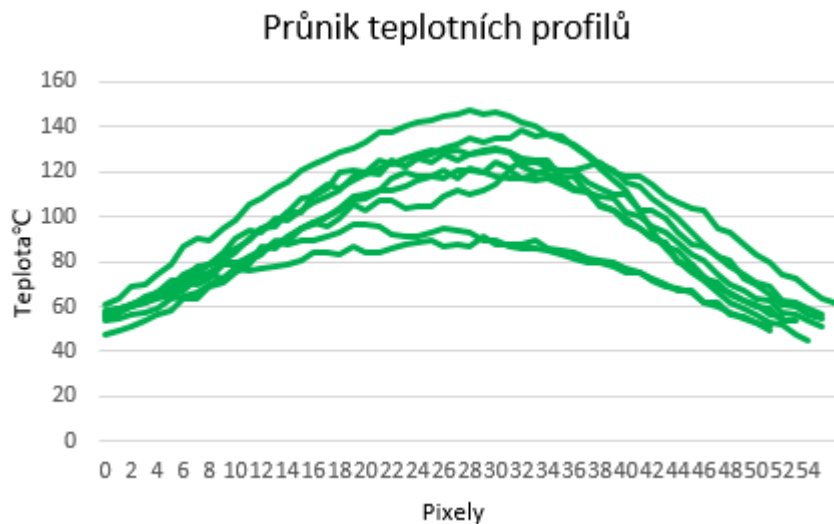
Pro ověření byly pomocí získaných termografických dat vyhodnoceny také teplotní profily odpovídající nevyhovujícím svarovým spojům, u kterých byla záměrně provedena změna svarových parametrů. Výsledné hodnoty teplotních profilů (pro vysoký svařovací proud) spolu s termogramy příslušného svarového spoje jsou zaznamenány v tabulce č. 36.

Tabulka 36 - Výsledné průběhy teplotních profilů ve zvolené oblasti

Vysoký svařovací proud					
Číslo svaru v SW		Teplotní profil	Číslo svaru v SW		Teplotní profil
48			49		
50			51		
52			53		
54			55		
56			57		

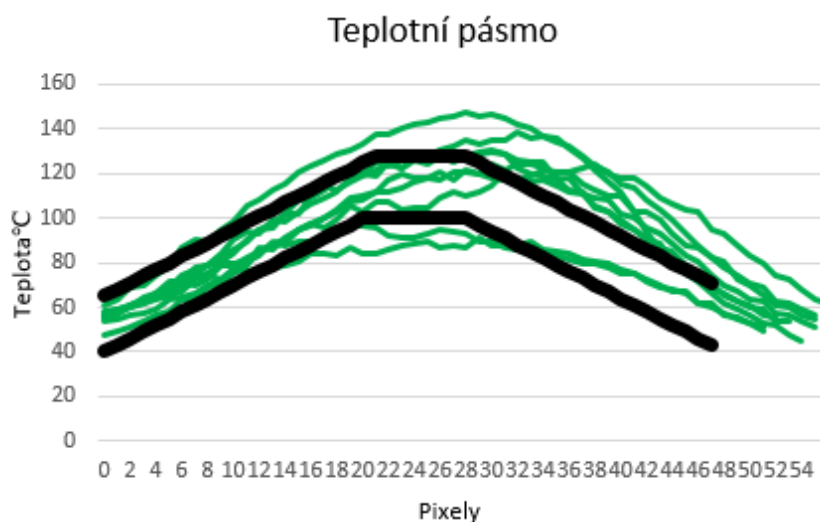
Stejně jako u svarů vytvořených pomocí optimalizovaných svařovacích parametrů byl i u svarů vytvořených při záměrně vysokých hodnotách svařovacího proudu nejprve určen (na základně vyhodnocení získaných termogramů, tedy stanovených průběhů teplotních profilů) průnik (množina) příslušných teplotních profilů.

Výsledný průběh průniku dané množiny (teplotních profilů), jsou zobrazeny v grafu na obrázku č. 67.



Obrázek 67 - průnik teplotních profilů (množina) odpovídající použití vysokého svařovacího proudu

Pro následné zjištění, který svarový spoj odpovídá stanovenému tolerančnímu pásmu byla tato množina teplotních profilů (odpovídající svarovým spojům vytvořených při vysokých hodnotách svařovacího proudu) porovnána s vytvořeným tolerančním pásmem vzniklým při analýze vyhovujících svarových spojů (viz obrázek č. 68).

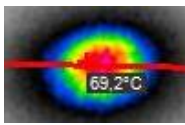

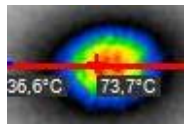

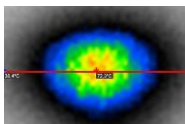

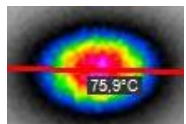

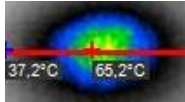



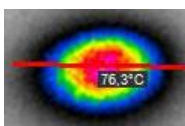

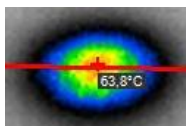

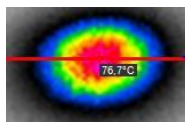

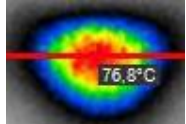



Obrázek 68 - průnik množiny (odpovídají vysokému svařovacímu proudu) a tolerančního pásma

Po porovnání vzniklé množiny s tolerančním pásmem je patrné, že žádný teplotní průběh svarového spoje neleží celou svou délkou v tolerančním pásmu, většina svarových spojů (kromě svarových spojů číslo: 50, 51, 57) má začáteční průběh teplotního profilu v souladu s tolerančním pásmem, okolo oblasti odpovídající hodnotě 30 pixelů však teplotní průběh překročí horní hranici tolerančního pásma, což je nejspíše způsobeno právě vysokými hodnotami použitého svařovacího proudu.

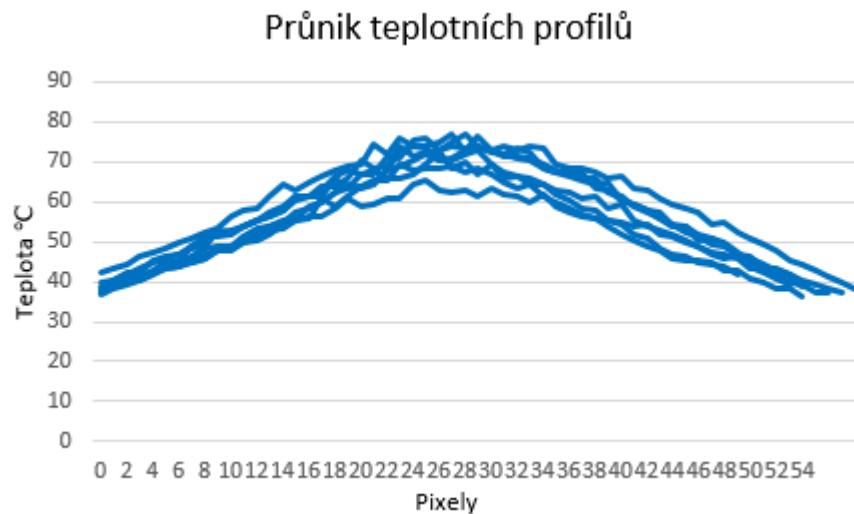
Dalším zkoumaným faktorem byla záměrná změna svařovacích parametrů, která byla provedena v sadě svarových spojů (34 až 43) u kterých došlo k nastavení nízkého svařovacího proudu, následné technologické zkoušky vyhodnotily všechny svarové spoje z této sady jako nevyhovující. Výsledné hodnoty teplotních profilů (pro nízký svařovací proud) spolu s termogramy příslušného svarového spoje jsou zaznamenány v tabulce č. 37.

Tabulka 37 - Výsledné průběhy teplotních profilů ve zvolené oblasti

Nízký svařovací proud					
Číslo svaru v SW		Teplotní profil	Číslo svaru v SW		Teplotní profil
34			35		
36			37		
38			39		
40			41		
42			43		

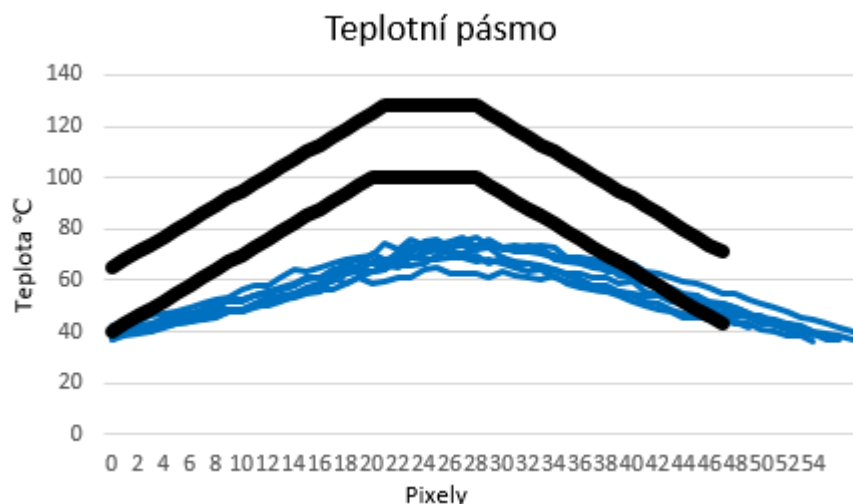
Také u svarů vytvořených při záměrně nízkých hodnotách svařovacího proudu bylo nejprve nutné vytvořit (na základně vyhodnocení získaných termogramů, tedy zjištěných průběhů teplotních profilů) průnik (množinu) teplotních profilů.

Výsledný průběh průniků dané množiny (teplotních profilů), je zobrazen v grafu na obrázku č. 69.



Obrázek 69 - průnik teplotních profilů (množina) odpovídající použití nízkého svařovacího proudu

Tento průnik (množina) teplotních profilů (odpovídající svarovým spojům vytvořených při nízkých hodnotách svařovacího proudu) byla opět porovnána s vytvořeným tolerančním pásmem vzniklým při analýze vyhovujících svarových spojů, viz obrázek č. 70.

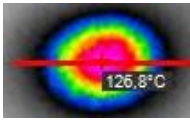

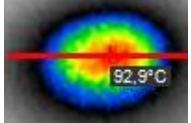

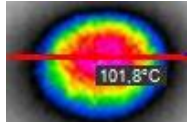

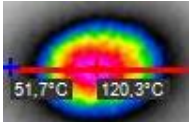

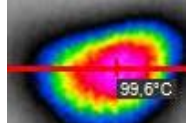

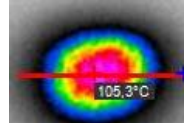

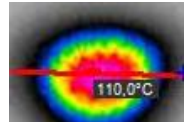

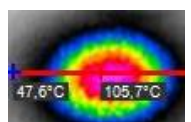

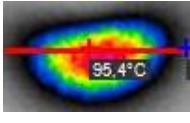

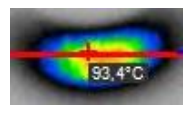



Obrázek 70 - průnik množiny (odpovídají nízkému svařovacímu proudu) a tolerančního pásma

Z grafu na obrázku číslo 68 lze vypožorovat, že žádný ze série svarových spojů vytvořených při nízkých hodnotách svařovaného proudu (svary číslo 34 až 43) není dle stanoveného teplotního pásma vyhovující. Je to způsobeno posunutím průběhů teplotních profilů k výrazně nižším teplotám což je zapříčiněno právě použitím nízkých hodnot svařovacího proudu.

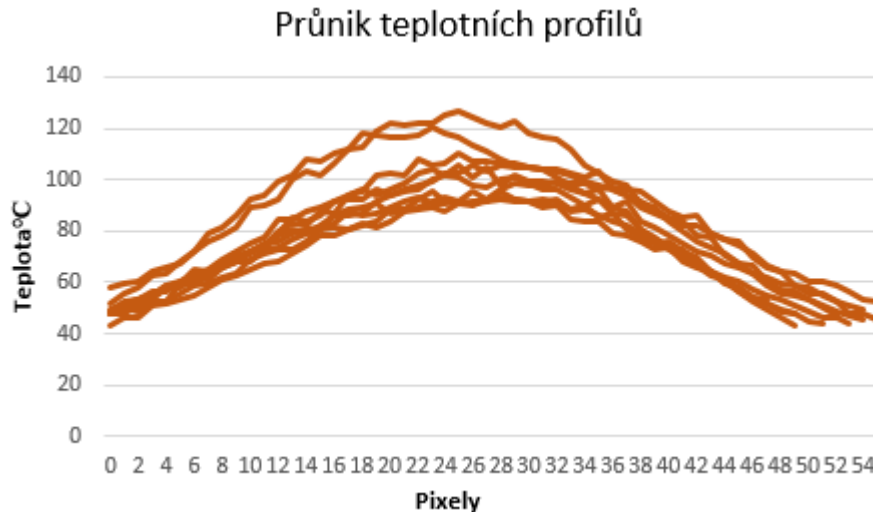
Technologické zkoušky prokázaly poslední výrazné vady u sady svarových spojů, u kterých byla provedena záměrná změna svařovacích parametru nastavením vysoké přítláčné síly. Jedná se o sadu obsahující svarové spoje č. 110 až 119. Výsledné průběhy teplotních profilů spolu s termogramy příslušného svarového spoje jsou zaznamenány v tabulce č. 38.

Tabulka 38 - Výsledné průběhy teplotních profilů ve zvolené oblasti

Vysoká přítláčná síla					
Číslo svaru v SW		Teplotní profil	Číslo svaru v SW		Teplotní profil
110			111		
112			113		
114			115		
116			117		
118			119		

Stejně jako v předchozích případech byl (při vyhodnocení termografických dat svarových spojů) nejprve určen průnik (množina) teplotních profilů, vzniklých při použití vysoké hodnoty přitlačné síly.

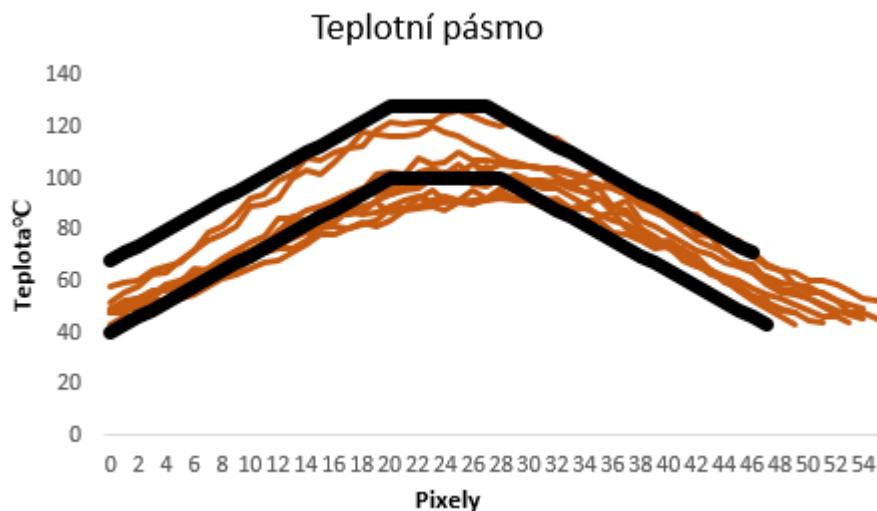
Výsledný průnik (množina) teplotních profilů, je zobrazen v grafu na obrázku č. 71.



Obrázek 71 - průnik teplotních profilů (množina) odpovídající použití vysoké přitlačné síly

Vzniklá množina teplotních profilů (odpovídající vysoké přitlačné síle) byla opět porovnána s vytvořeným tolerančním pásmem vzniklým při analýze vyhovujících svarových spojů.

Průnik vzniklé množiny teplotních profilů (pro vysokou přitlačnou sílu) s tolerančním pásmem pro vyhovující svarové spoje je zobrazena v grafu na obrázku č. 72.



Obrázek 72 - průnik množiny (odpovídají nízkému svařovacímu proudu) a tolerančního pásma

Z průniku získané množiny teplotních profilů a tolerančního pásma na obrázku č.70 je patrné, že pro navržené toleranční pásmo jsou přípustné pouze tři teplotní profily odpovídající svarovým spojům číslo: 110, 111, a 116 zbytek svarových spojů bylo tímto kritériem vyhodnoceno jako nevyhovující (defektní).

10.7 Vyhodnocení

Pro konečné stanovení, je-li přípustné vyhodnocovat online termografií proces odporového bodového svařování, byly získané termografické výsledky porovnány s výsledky provedených technologických zkoušek. Zjištěné údaje jsou zaznamenány v tabulce č. 39, tyto údaje odpovídají svarovým spojům vytvořených při vysokých hodnotách svařovacího proudu, makrosnímky takto zhotovených svarových spojů vykazují vady typu trhlin a vady tvaru a rozměru, kde:

I [kA] ... skutečná hodnota svařovacího proudu

F_{max} [kN] ... maximální naměřená síla při destruktivní mechanické odlupovací zkoušce dle ČSN EN ISO 10 447

d_1/d_2 [mm] ... rozměry svarové čočky

d [mm] ... průměr svarové čočky dle normy ČSN EN ISO 14 373

UT ... výsledky ultrazvukové zkoušky

V – vyhovuje, N – nevyhovuje

Tabulka 39 - konečné výsledky technologických a termografických zkoušek pro sadu 48 až 57.

Parametry	číslo svaru v SW	I [kA]	F_{max} [kN]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	průměr čočky $d = (d_1+d_2)/2$	UT t [mm]	Termografie	
								Toleranční pole	Teplotní pásmo
vysoký svařovací proud $I = 26\%$ (8,5 kA)	48	8,814	1015	7,2	6,4	6,8	1,12	V	N
	49	8,622	1051	7,6	7,3	7,45	1,21	V	N
	50	8,582	994	7,9	7,1	7,5	1,18	N	N
	51	8,552	1037	7,5	7,3	7,4	1,21	N	N
	52	8,642	983	7,4	7	7,2	1,18	V	N
	53	8,71	1091	6,7	7,1	6,9	1,18	N	N
	54	8,782	966	7,6	6,9	7,25	1,12	N	N
	55	8,684	995	7,3	8,3	7,8	1,18	V	N
	56	8,602	931	7,2	7,3	7,25	1,18	V	N
	57	8,444	949	7,5	7,4	7,45	1,18	N	N

V souladu s požadavky normy ČSN EN ISO 14 373 byly všechny svarové spoje v této sadě vyhodnoceny jako nevyhovující, Zajímavé výsledky zaznamena ultrazvuková zkouška, která byla vyhodnocena dle vlastností echogramů a tloušťky stlačených plechů, tato zkouška vyhodnotila pouze jeden svarový spoj (č.53) jako nevyhovující, zbytek (tedy 90 % svarových spojů) bylo v souladu s požadavky. Svarové spoje byly také vyhodnoceny pomocí stanoveného tolerančního pole (množina nejvyšších hodnot naměřených teplot ve zvolené tepelné oblasti) a tolerančního pásma (množina teplotních profilů na zvolené přímce). Toleranční pole vyhodnotilo jako nevyhovující svarové spoje vzorky číslo: 50, 51, 53, 54 a 57 zbytek (tedy 50 % svarových spojů) bylo v souladu se stanovenou tolerancí. Navržený toleranční profil vyhodnotil všechny svarové spoje, jako spoje nevyhovující, čímž dosáhl totožných výsledků jako při vyhodnocení v souladu s požadavky normy ČSN EN ISO 14 373.

V tabulce č. 40 jsou výsledky technologických a termografických zkoušek pro sadu svarových spojů obsahující svary číslo 34 až 43, tyto údaje odpovídají svarovým spojům vytvořených při nízkých hodnotách svařovacího proudu, makrosnímky takto zhotovených svarových spojů vykazují dutinové vady a vady tvaru a rozměru.

Tabulka 40 - konečné výsledky technologických a termografických zkoušek pro sadu 34 až 43.

Parametry	číslo svaru v SW	I [kA]	F _{max} [kN]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	průměr čočky d = (d ₁ +d ₂)/2	UT	Termografie	
								Toleranční pole	Teplotní pásmo
nízký svařovací proud I = 17 % (4 kA)	34	3,778	652	5,6	5,1	5,35	N	N	N
	35	3,858	644	5,4	4,9	5,15	N	N	N
	36	3,924	634	4,3	4,6	4,45	N	N	N
	37	3,732	720	4,9	4,5	4,7	N	N	N
	38	3,87	635	5,1	4,9	5	N	N	N
	39	3,75	656	5,3	5,3	5,3	N	N	N
	40	4,024	691	4,2	4,9	4,55	N	N	N
	41	3,992	715	5	4,6	4,8	N	N	N
	42	4,128	643	5,2	4,9	5,05	N	N	N
	43	4,19	651	5	5	5	N	N	N

V souladu s požadavky normy ČSN EN ISO 14 373 byly svarové spoje číslo 36, 37, a 40 v této sadě vyhodnoceny jako nevyhovující. Žádný ze svarových spojů nevyšel

dle výsledků ultrazvukové zkoušky jako spoj vyhovující. Při termografickém vyhodnocení vyhodnotilo stanovené toleranční pole (množina nejvyšších hodnot naměřených teplot ve zvolené tepelné oblasti) i toleranční pásmo (množina teplotních profilů na zvolené přímce) všechny svarové spoje jako nevyhovující. Odlupovací mechanická zkouška dle ČSN EN ISO 10 447 navíc prokázala, že svarové spoje této sady vykazují nižší hodnoty maximální naměřené síly, čímž klesají i mechanické vlastnosti svarového spoje.

Poslední zkoumanou sadou byla sada svarových spojů vytvořených při vysokých hodnotách přítláčné síly, jedná se o svary číslo 110 až 119, makrosnímky takto zhotovených svarových spojů vykazují vady typu trhlin a vady tvaru a rozměru. Výsledky technologických a termografických zkoušek obsahuje tabulka č. 41.

Tabulka 41 - konečné výsledky technologických a termografických zkoušek pro sadu 34 až 43.

Parametry	číslo svaru v SW	I [kA]	F _{max} [kN]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	průměr čocky d = (d ₁ +d ₂)/2	UT t [mm]	Termografie	
								Toleranční pole	Teplotní pásmo
vysoký přítlak P = 2,5 kN	110	6,904	1003	6,8	6,4	6,6	1,18	V	V
	111	6,708	873	7,5	6,9	7,2	1,15	N	V
	112	6,6	821	7,3	6,4	6,85	1,21	V	N
	113	6,702	967	7	6,9	6,95	1,21	V	N
	114	6,532	1002	6,7	6,2	6,45	1,24	V	N
	115	6,69	789	7,5	6,1	6,8	1,24	V	N
	116	6,49	871	7,3	5,9	6,6	1,27	V	V
	117	6,666	875	6,9	6,6	6,75	1,24	V	N
	118	6,55	874	7,2	6,6	6,9	1,21	N	N
	119	6,67	994	6,8	6,3	6,55	1,21	N	N

Svarové spoje číslo 111, 112, 113, 115 a 118 byly v souladu s požadavky normy ČSN EN ISO 14 373 vyhodnoceny jako nevyhovující, zbytek (50 %) splňoval dané požadavky. Ultrazvuková zkouška neprokázala žádné nevyhovující svarové spoje. Termografické vyhodnocení pomocí tolerančního pole vyhodnotilo 30 % svarových spojů z dané sady jako nevyhovující, jedná se o spoje číslo 111, 118 a 119, stanovené tomografické toleranční pásmo vyhodnotilo 70 % svarových spojů jako nevyhovující, konkrétně svarové spoje číslo 112, 113, 114, 115, 117, 118, 119.

11 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat nejčastější typy vad bodových odporových svarových spojů, včetně příčin jejich vzniku. Dále pro analyzované typy vad realizovat dvě nezávislé množiny teplotních (radiometrických) záznamů z termokamery a pomocí těchto množin navrhnout vhodné příznaky pro klasifikaci stavu svarového spoje (defektní/nedefektní svarový spoj), to vše pro ověření možnosti vyhodnocovat online termografií proces odporového bodového svařování.

Při analýze typů vad odporových bodových svarů se ukázalo, že mezi nejčastější vady patří vady skupiny P5 (vady tvaru a rozměru) konkrétně se jedná o nevyhovující hodnoty průměru svarové čočky, nadměrně velkou TOO, nepřiměřenou hloubku vtisku elektrod a úplné protavení svarové čočky, dále svary obsahovaly vady skupiny P1 (trhliny) konkrétně mikrotrhliny.

Při porovnání svařovacích parametrů, v rámci kterých, k jednotlivým typům vad došlo je zřejmé, že největší vliv na potenciální množství a vznik vad má svařovací proud, při nadměrně vysokých hodnotách proudu dochází ke vzniku trhlin, nadměrné velikosti svarových čoček či tepelně ovlivněných oblastí a velké hloubky vtisků elektrod do svařovaného materiálu. Naproti tomu byly zaznamenány také malé průměry svarových čoček a jejich částečné nebo úplné protavení, ke kterému došlo i při výrazně menších hodnotách svařovacího proudu. Použití nadměrné přitlačné síly má negativní vliv na hloubku vtisku elektrod a při současných vyšších hodnotách proudu může vést ke vzniku průchozích otvorů v místě svarové čočky způsobených výstřikem roztaveného kovu. Zajímavým faktem je že při vzniku všech zmiňovaných vad byly použity totožné svařovací časy (200 ms), doba svařovacího cyklu tak měla nejmenší vliv na vznik vad při svařovacím procesu. Navíc jsou jednotlivé typy vad většinou doprovázeny dalšími anomáliemi, které vznikají v důsledku nastavení různých kombinací svařovacích parametrů.

Pro opakované dosažení vad s označením P 523 (úplné protavení svarové čočky nebo svaru) při procesu odporového bodového svařování na odporovém svařovacím lisu Dalex PMS 11-4 pro hlubokotažnou ocel DC05+ZE s tloušťkou 0,7 mm je tak zapotřebí nastavit svařovací parametry které vyvolají buď nízkou hodnotu svařovacího proudu (přibližně 3,6 kA) nebo velkou hodnotu svařovacího proudu (přibližně 7 kA) s kombinací větší hodnotou přitlačné síly (2,5 kN). Pro opakované

dosažení vad s označením P 1001 (mikrotrhlina) a P5-vady tvaru a rozměru, konkrétně pro dosažení nadměrných hodnot svarových čoček a TOO, je zapotřebí nastavit hodnotu svařovacího proudu přibližně 8,8 kA, (zbytek svařovacích parametrů může zůstat na optimalizovaných hodnotách). Pokud chceme naopak dosáhnout malé hodnoty svarových čoček je zapotřebí nastavit hodnotu svarového proudu okolo 3,7 kA, Pro nadměrné hloubky vtisku elektrod je nutno nastavit vyšší přítlačnou sílu (2,5 kN) v kombinaci s vyššími hodnotami svařovacího proudu (přibližně 6,95 kA).

Pro zjištěné typy vad bodových odporových svarových spojů, byly při realizaci záznamu z termokamery vytvořeny dvě nezávislé množiny, první množina byla vytvořena z hodnot maximálních teplot v teplotním poli svarového spoje, druhá množina byla vytvořena z průběhu teplotních profilů na zvolené přímce. Pomocí těchto množin se stanovilo toleranční pole (v případě maximálních teplot v teplotním poli byla dolní teplotní hranice tolerančního pole stanovena na 100°C a horní teplotní hranice na 135°C) a toleranční pásmo (v případě teplotních profilů na zvolené přímce dosahovala dolní hranice tolerančního pásma minima na hodnotě 0 a 46 pixelů, přičemž minimum odpovídá teplotě okolo 40°C, maximum dolní hranice je na hodnotě 20 až 28 pixelů, přičemž odpovídá teplotě okolo 100°C. Horní hranice dosahuje svého minima a maxima na totožných hodnotách, tedy 0 a 46 pixelů pro minimum a 20 až 28 pixelů pro maximum, dosažené hodnoty teplot se ovšem liší, minimum dosahuje teplot okolo 65°C a maximum odpovídá 125 °C), které sloužili k vyhodnocování přípustnosti svarových spojů pomocí termografických údajů.

Takto vyhodnocené údaje byly porovnány s výsledky provedených standartních technologických zkoušek, což vedlo k následujícímu zjištění:

- Při vyhodnocování sady svarových spojů vytvořených při záměrně vysokých hodnotách svařovacího proudu se termografické výsledky (vyhodnocené pomocí množiny vzniklé z teplotních profilů) shodovaly s výsledky technologické zkoušky provedené v souladu s požadavky normy ČSN EN ISO 14 373. Vyhodnocení pomocí druhé množiny (tolerančního pole vytvořeného z maximálních teplot ve vybraném teplotním poli) vyhodnotilo 50 % svarových spojů z dané sady jako nevyhovující, což je ale stále podstatně více odhalených nevyhovujících svarových spojů než

u ultrazvukové zkoušky, která vyhodnotila pouze 10 % nevyhovujících svarových spojů.

- U sady svarových spojů vytvořených při záměrně nízkých hodnotách svařovaného proudu, se výsledky vyhodnocení přípustnosti odporových bodových svarových spojů ultrazvukové zkoušky a termografických údajů (teplotního pásma i tolerančního pole) shodovaly, pomocí termografie tak bylo dosaženo stejných výsledků jako při aplikaci ultrazvukové zkoušky.
- Při vyhodnocování poslední sady svarových spojů vzniklých při vyšších hodnotách přitlačné síly, bylo dle technologické zkoušky provedené v souladu s požadavky normy ČSN EN ISO 14 373, bylo vyhodnoceno že 50 % svarových spojů z dané sady je nevyhovujících, dle ultrazvukové zkoušky bylo 100 % svarových spojů vyhovujících a výsledky získané pomocí termografie se také lišily. Vyhodnocení pomocí tolerančního pole vytvořeného na základě maximální hodnoty teplot ve vybraném teplotním poli vyhodnotilo 30 % svarových spojů jako nevyhovující a vyhodnocení pomocí stanoveného teplotního pásma na základě průběhu teplotních profilů na zvolené přímce vyhodnotilo 70 % svarových spojů jako nevyhovující. Tyto výraznější rozdíly byly nejspíše způsobeny nastavenými svařovacími parametry, změna přitlačné síly měla na rozdíl od změny použitého svařovacího proudu menší vliv na vznik příslušných vad a jejich četnost, použité technologické metody odhalování vad obsažených ve svarových spojích tak nemuseli odhalit veškeré množství či jednotlivé typy vad.

Z dosažených výsledků vyplývá, že pomocí termografie jsme schopni odhalit jednotlivé typy vad ve svarových spojích vytvořených metodou odporového bodového svařování, nejlepší účinek byl zaznamenán u svarových spojů vytvořených při neoptimálních hodnotách svařovacího proudu, obzvláště pak při nízkých hodnotách svařovacího proudu, tyto svarové spoje obsahovali převážně trhlinové a tvarové vady. Z pevnostního hlediska jsou to tedy nejzávažnější typy vad.

Navíc bylo zjištěno, že se kritériální nároky na vyhodnocení kvality svarového spoje pomocí termografie dají určit, případně změnit výběrem patřičné množiny nebo jejich kombinací. Z daných výsledků ale spíše vyplývá, že princip vyhodnocení pomocí termografie nespočívá v přímém odhalení daných vad, ale v zaznamenání odchylek svařovacích parametru od běžných standardů, které tyto vady způsobují.

Před samotným vyhodnocováním tak bude zapotřebí stanovit termografické parametry pro rozpoznávání, zda se jedná o vyhovující/nevhovující svarový spoje, vždy pro každý svařovací proces. V praxi tedy bude samotné vyhodnocování vždy předcházet budování učící a trénovací množiny svarů například z databáze realizovaných průběhů a z těchto množin budou následně vycházet příslušné vyhodnocovací algoritmy.

Výsledky tohoto experimentu, a především získané poznatky tedy slouží jako tzv. tréninková množina vzorů (dat), na jejichž základě v současné době kolegové z firmy Workswell s.r.o. vytváří zmiňovaný vyhodnocovací algoritmus pro software ThermoInspector (viz kapitola 9.6), tvorba vyhodnocovacího algoritmu tedy ještě není u konce, ale stále pokračuje.

12 Použité literární zdroje

- [1] KADLEC, Karel. *Teoretické základy bezdotykového měření teploty (část 1)*. *Automa* [online]. 2014 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52890.pdf
- [2] SOVA, J., KOLAŘÍK, L. *Termokamery a pyrometry*. *Automa* [online]. 2014 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/termokamery-a-pyrometry-2014_02_52891_7333/
- [3] SOVA, J., KADLEC, K. *Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití*. *Allforpower* [online]. 2014 [cit.2019-03-26]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf
- [4] PAVELEK, Milan. *Teorie termovizních měření* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/0700-z01.pdf>
- [5] PAVELEK, Milan. *Termomechanika. I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [7] POWERWIKI. *Planckův vyzařovací zákon* [online]. 2008 [cit.2019-04-07]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/wiki/OOEET_PlanckuvZakon
- [8] BRYNDA, Petr. *Úvod do teorie termovizního měření* [online]. [cit.2019-04-08] Dostupné z: http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie_brynda.pdf
- [9] BIOFYZIKÁLNÍ ÚSTAV LFMU. *Bezkontaktní termografie* [online]. 2017 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.med.muni.cz/biofyz/zobrazovacimetody/files/Termo.pdf>
- [10] ŠKEŘÍK, M. *Infračervená termografie – Stupeň I, II – podklady pro školení dle ISO 9712, SNT-TC-1A a EN 4179 / NAS 410, ATG, 2012*
- [11] TERMOKAMERA. *Princip a funkce* [online]. 2017 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce>

- [12] KANČO, Jan. *Praktické rady při práci s termokamerami* [online]. 2011 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <file:///C:/Users/bob/Downloads/1211-clanek-prorevize-2-11-kanco.pdf>
- [13] HUŠEK, Miloš. *Princip bezdotykového měření teploty* [online]. 2014 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
- [14] KADLEC, Karel. *Teoretické základy bezdotykového měření teploty (část 1)*. *Automa* [online]. 2014 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52626.pdf
- [15] SOVA, Jan. *Bezdotykové měření teplotních polí II* [online]. 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_19_erm.php
- [16] SOVA, Jan. *bezdotykové měření teplotních polí I* [online]. 2017 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_18_ter.php
- [17] WORKSWELL. *Termokamery flir a školení* [online.] 2017 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: http://www.termokamery-flir.cz/termokamery-flir-prehled/#Termokamery_prumyslove
- [18] BARTÁK, Jiří. *Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení* [online] 2012 [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [19] MINAŘÍK, V. *Obloukové svařování*. Praha: Scientia, 1998. ISBN 80-7183-19-0
- [20] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975, 265, [1] s.
- [21] KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařování elektrickým odporem*, studijní podklady. Praha : ČVUT, Ústav strojírenské technologie
- [22] MATOUŠEK, Jan. *Nedestruktivní kontrola bodových svarů v automobilovém průmyslu*. Praha : Advanced Technology Group s. r. o., 2016
- [23] ZHANG, Hongyan a SENKARA, Jacek. *Resistance welding*. Londýn : Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-203-61639-1.

- [24] *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 2 Tlakové svařování*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. ČSN ISO 6520-2.
- [25] WORKSWELL. *Software pro termografii* [online]. 2019 [cit. 2019-06-21]. Dostupné z: <https://workswell.cz/prehled-produktu/?t=software>
- [26] KOLAŘÍK, L SOVA, J. *využití termografie při hodnocení kvality odporových bodových svarových spojů*, ČVUT, fakulta strojní, - přednáška, 2019.
- [27] ZPRÁVA ŘEŠENÍ PROJEKTU TRIO 2018. *Termovizní systém pro nedestruktivní testování svarových spojů*. ČVUT v Praze, fakulta strojní
- [28] DALEX. *Průmyslové svařovací odporové lisy* [online]. 2015 [cit. 2019-06-21]. Dostupné z: <http://download.dalex.cz/katalogy.html>
- [29] WORKSWELL. *Workswell InfraRed Camera (WIC)* [online]. 2019 [cit. 2019-06-22]. Dostupné z: <https://workswell.cz/termokamera-workswell-infrared-camera-wic/>
- [30] SVARBAZAR.CZ. *Bodovky a bodování* [online]. 2008 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008033102>
- [31] ROCKWELD. *Bodové - svařování* [online]. 2013 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/bodove-svarovani/>
- [32] KOLAŘÍKOVÁ, M., *Effekt of resistance spot welding parameters on DC06 steel weld spot quality*, METAL 2018
- [33] FOREJTOVÁ, L., *Defect detection of resistance spot welds used in automotive industry by NDT*, METAL 2018
- [34] VOLLMER M., MOLLMAN K. P.: *Infrared Thermal Imagine*. Wiley-VCH 2010, ISBN 978-3-527-40717-0
- [35] HLAVÁČ V., SEDLÁČEK, M.: *Zpracování signálů a obrazu*, skriptum FEL ČVUT, Vydavatelství ČVUT, Praha 2009

13 Seznam obrázků

Obrázek 1 - ukázka termogramu, kde jednotlivé pixely odpovídají povrchové teplotě objektu [16].....	12
Obrázek 2 - model černého tělesa.....	13
Obrázek 3 - závislost vyzařování černého tělesa podle Planckova zákona [7]	15
Obrázek 4 - zobrazení Wienova zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce záření pro černé těleso [4].....	16
Obrázek 5 - teplota odpovídající maximální vlnové délce dle Wienova zákona [1].	16
Obrázek 6 – závislost intenzity vyzařování černého tělesa [1].....	17
Obrázek 7 - zobrazení Stefanova - Boltzmannova zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce záření pro černé těleso [4]	18
Obrázek 8 - interakce záření a tělesa [1].....	19
Obrázek 9 - graf závislosti emisivity na vlnové délce pro dané materiály [15]	21
Obrázek 10 - závislost vyzařování a emisivity na vlnové délce tří základních druhů těles (zářičů) [1].....	21
Obrázek 11 - vliv emisivity povrchu na naměřené hodnoty [3]	22
Obrázek 12 - stanovení emisivity neznámého materiálu pomocí vyrovnání teplot [12]	23
Obrázek 13 - princip působení odražené zdánlivé teploty na detektor termokamery [15].....	24
Obrázek 14 - vliv odražené zdánlivé teploty na naměřené hodnoty [15]	25
Obrázek 15 - schéma principu metody odrazu	26
Obrázek 16 - nastavení měřených parametrů (termokamera FLIR T440) [15].....	27
Obrázek 17 - průběh termografického měření [3]	28
Obrázek 18 - termokamera Flir T640 [17].....	31
Obrázek 19 - teplota na povrchu skla (vpravo) a teplota vlákna žárovky které je sklem obklopeno (vlevo) [2].....	32
Obrázek 20 - vliv útlumu atmosféry na spektrální rozsah [11]	32
Obrázek 21 - termogramy pořízené s různou hodnotou NETD [2]	33
Obrázek 22 - povrch detektoru [11].....	34
Obrázek 23 - schéma definující parametry VFOV a HFOV [2].....	35
Obrázek 24 - vnesená chyba měření způsobena nedostatečným rozlišením termokamery [2].....	35

Obrázek 25 - termogram obsahující funkci bod [11].....	37
Obrázek 26 - termogram obsahující funkci oblast a její následné vyhodnocení	37
Obrázek 27 - termogram obsahující funkci teplotní profil a její následné vyhodnocení	38
Obrázek 28 - termogram obsahující funkci izoterma a její následné vyhodnocení [2]	39
Obrázek 29 – záznam funkce teplotní prolnutí [11]	40
Obrázek 30 – záznam funkce obraz v obraze [11].....	41
Obrázek 31 - záznam funkce MSX [11]	42
Obrázek 32 – záznam funkce blending [11]	42
Obrázek 33 - grafický záznam vytvořený radiometrickou funkcí [2]	43
Obrázek 34 - princip metody odporového bodového svařování [21]	44
Obrázek 35 - nevhodné podmínky svařování [20].....	46
Obrázek 36 – nevhodné podmínky povrchu pro svařování [20]	46
Obrázek 37 - nevhodné podmínky kontaktu pro svařování [20]	47
Obrázek 38 - nevhodné svařovací parametry [20].....	47
Obrázek 39 - mikrotrhlina ve svarovém spoji	49
Obrázek 40 - plynová dutina ve svarovém spoji [23].....	50
Obrázek 41 – pevné vměstky ve svarovém spoji [21]	51
Obrázek 42 - nedostatečně spojený svarový spoj	52
Obrázek 43 - hluboké otisky elektrod ve svarovém spoji.....	53
Obrázek 44 - výstřik svarového kovu ve svarovém spoji [23]	54
Obrázek 45 - materiálový koncept automobilu [26].....	55
Obrázek 46 - rozměry zkušebního vzorku.....	56
Obrázek 47 - svařovací odporový lis Dalex PMS 11-4	56
Obrázek 48 - komunikace softwaru a řídicí jednotky.....	57
Obrázek 49 - průběh parametrů svařovacího procesu v SW SER – MEGA PC	57
Obrázek 50 - elektrodové čepičky 39D 1978-2 [27]	58
Obrázek 51 - termokamera LWIR, WIC 640	59
Obrázek 52 - zorné pole termokamery	60
Obrázek 53 - zorné pole termokamery [29].....	60
Obrázek 54 - software CorePlayer a ThermoInspector [25].....	61
Obrázek 55 - přístroj OmnyScan od firmy Olympus []	63
Obrázek 56 - přístroj LabTest	64
Obrázek 57 - Průnik teplot odpovídají vyhovujícím svarovým spojům.....	75

Obrázek 58 - Vymezená oblast přípustných řešení (toleranční pole).....	75
Obrázek 59 - průnik teplot (množina) odpovídající použití vysokého svařovacího proudu	77
Obrázek 60 - průnik množiny (odpovídající vysokému svařovacímu proudu) a tolerančního pole.....	77
Obrázek 61 - průnik teplot (množina) odpovídající použití nízkého svařovacího proudu	79
Obrázek 62 - průnik množiny (odpovídají nízkému svařovacímu proudu) a tolerančního pole.....	79
Obrázek 63 - průnik teplot (množina) odpovídající použití vysoké přitlačné síly	81
Obrázek 64 - průnik množiny (odpovídají vysoké přitlačné síle) a tolerančního pole	81
Obrázek 65 - Průnik teplotních profilů odpovídají vyhovujícím svarovým spojům .	84
Obrázek 66 - Vymezená oblast přípustných řešení (toleranční pásmo)	84
Obrázek 67 - průnik teplotních profilů (množina) odpovídající použití vysokého svařovacího proudu.....	86
Obrázek 68 - průnik množiny (odpovídají vysokému svařovacímu proudu) a tolerančního pásma	86
Obrázek 69 - průnik teplotních profilů (množina) odpovídající použití nízkého svařovacího proudu.....	88
Obrázek 70 - průnik množiny (odpovídají nízkému svařovacímu proudu) a tolerančního pásma	88
Obrázek 71 - průnik teplotních profilů (množina) odpovídající použití vysoké přitlačné síly.....	90
Obrázek 72 - průnik množiny (odpovídají nízkému svařovacímu proudu) a tolerančního pásma	90

14 Seznam tabulek

Tabulka 1 - příklady informativní hodnoty emisivity pro vybrané materiály [1].....	22
Tabulka 2 – klasifikace trhlin metody odporového bodového svařování [24]	49
Tabulka 3 – klasifikace dutin metody odporového bodového svařování [24].....	50
Tabulka 4 - klasifikace vměstků metody odporového bodového svařování [24]	51
Tabulka 5 - klasifikace studených spojů metody odporového bodového svařování [24].....	51
Tabulka 6 - klasifikace vad tvarů a rozměrů metody odporového bodového svařování [24].....	52
Tabulka 7 - klasifikace vad tvarů a rozměrů metody odporového bodového svařování [24].....	54
Tabulka 8 - chemické složení a mechanické vlastnosti oceli DC05+ZE []	56
Tabulka 9 - charakteristika svařovacího zařízení Dalex PMS 11-4 [28]	58
Tabulka 10 - chemické složení použitých svařovacích elektrod	59
Tabulka 11 - technické parametry termokamery LWIR WIC 640[29]	59
Tabulka 12 - optimalizované parametry	62
Tabulka 13 - technické parametry přístroje OmnyScan [].....	63
Tabulka 14 - výsledné vyhodnocení svarových spojů ultrazvukovou zkouškou.....	63
Tabulka 15 - technické parametry přístroje LabTest []	64
Tabulka 16 - výsledné vyhodnocení svarových spojů mechanizovanou odlupovací zkouškou	64
Tabulka 17 - výsledné vyhodnocení makrosnímků učících svarových spojů	66
Tabulka 18 - specifikace svarového spoje č. 32.	67
Tabulka 19 - nastavené svařovací parametry svaru č. 32.	67
Tabulka 20 - naměřené skutečné hodnoty pomocí softwaru SER-Mega PC.....	68
Tabulka 21 - skutečné svařovací parametry	68
Tabulka 22 - specifikace svarového spoje č. 47.	69
Tabulka 23 - nastavené svařovací parametry svaru č. 47.	69
Tabulka 24 – naměřené skutečné hodnoty pomocí softwaru SER-Mega PC	70
Tabulka 25 - skutečné svařovací parametry svaru č. 47.	71
Tabulka 26 - specifikace svarového spoje č. 109.	71
Tabulka 27 - nastavené svařovací parametry svaru č. 109.	72

Tabulka 28 - skutečné hodnoty parametrů naměřené pomocí softwaru SER-Mega PC	72
Tabulka 29 - skutečné svařovací parametry svaru č. 109.	73
Tabulka 30 - nalezené vady a jejich použité svařovací parametry	73
Tabulka 31 - Výsledné hodnoty maximálních teplot ve zvoleném teplotním poli	74
Tabulka 32 - Výsledné hodnoty maximálních teplot ve zvoleném teplotním poli	76
Tabulka 33 - Výsledné hodnoty maximálních teplot ve zvoleném teplotním poli	78
Tabulka 34 - Výsledné hodnoty maximálních teplot ve zvoleném teplotním poli	80
Tabulka 35 – Výsledné průběhy teplotních profilů ve zvolené oblasti	83
Tabulka 36 - Výsledné průběhy teplotních profilů ve zvolené oblasti	85
Tabulka 37 - Výsledné průběhy teplotních profilů ve zvolené oblasti	87
Tabulka 38 - Výsledné průběhy teplotních profilů ve zvolené oblasti	89
Tabulka 39 - konečné výsledy technologických a termografických zkoušek pro sadu 48 až 57.	91
Tabulka 40 - konečné výsledy technologických a termografických zkoušek pro sadu 34 až 43.	92
Tabulka 41 - konečné výsledy technologických a termografických zkoušek pro sadu 34 až 43.	93

15 Seznam použitých zkratek a symbolů

č.	číslo	mm	milimetr
tab.	tabulka	μm	mikrometr
obr.	obrázek	M_0	celková intenzita zářivého toku
R	elektrický odpor	kN	kilonewton
I	elektrický proud	b	Wienova konstanta
t	čas nebo také tloušťka plechu	τ	transmitance
$M_{\lambda 0}$	spektrální hustota zářivého toku	h	Planckova konstanta
T	termodynamická teplota	Cu	měď
F	přítlačná svařovací síla	Cr	chrom
kA	kiloampér	P	tlak nebo také fosfor
d	pracovní průměr elektrod nebo také průměr svaru	mK	milikelvin
ms	milisekunda	IR	infra red
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia	m^2	metr čtvereční
K	kelvin	m	hmotnost nebo také metr
NETD	noise equivalent temperature difference	Re	mez luzu
MSX	Multi Spectral Dynamic Imagine	R $\ddot{\text{h}}$	stupeň F $\ddot{\text{a}}$ hostn $\ddot{\text{e}}$ ita
c	měrná tepelná kapacita	Fe	železo
A	ampér nebo také tažnost	C	uhlík
α	absorbace	ρ	reflektance
ε	emisivita	Mn	mangan
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$	watt na metr čtvereční mikrometr
E	záření	NDT	non destructive technologi
SW	software	W/m	watt na metr
FOV	Field of View	U	napětí
N	newton	S	síra
V	volt	Pozn.	poznámka
λ	vlnová délka	PC	personal computer

16 Přílohy

příloha 1 - kompletní výsledky konvenčních technologických zkoušek

parametry	číslo svaru v SW	I [kA]	F _{max} [kN]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	průměr čočky d = (d ₁ +d ₂)/2	UT
optimalizované parametry I = 23,5% (6,5kA)	21	6,906	890	6,6	6,2	6,4	1,27
	22	6,72	987	6,6	6,2	6,4	1,18
	23	6,638	1042	6,8	6	6,4	1,24
	24	6,324	928	7,2	5,7	6,45	1,21
	25	6,798	955	7,2	6	6,6	1,24
	26	6,648	997	6,6	6,7	6,65	1,27
	27	6,828	928	6,2	5,9	6,05	1,21
	28	6,782	845	6,5	6,3	6,4	1,21
	29	6,826	778	6,8	6,4	6,6	1,2
	30	6,286	786	6,2	6,5	6,35	1,24
nízký svařovací proud I = 17 % (4 kA)	34	3,778	652	5,6	5,1	5,35	
	35	3,858	644	5,4	4,9	5,15	
	36	3,924	634	4,3	4,6	4,45	
	37	3,732	720	4,9	4,5	4,7	
	38	3,87	635	5,1	4,9	5	
	39	3,75	656	5,3	5,3	5,3	
	40	4,024	691	4,2	4,9	4,55	
	41	3,992	715	5	4,6	4,8	
	42	4,128	643	5,2	4,9	5,05	
	43	4,19	651	5	5	5	
vysoký svařovací proud I = 26 % (8,5 kA)	48	8,814	1015	7,2	6,4	6,8	1,12
	49	8,622	1051	7,6	7,3	7,45	1,21
	50	8,582	994	7,9	7,1	7,5	1,18
	51	8,552	1037	7,5	7,3	7,4	1,21
	52	8,642	983	7,4	7	7,2	1,18
	53	8,71	1091	6,7	7,1	6,9	1,18
	54	8,782	966	7,6	6,9	7,25	1,12
	55	8,684	995	7,3	8,3	7,8	1,18
	56	8,602	931	7,2	7,3	7,25	1,18
	57	8,444	949	7,5	7,4	7,45	1,18
krátký svařovací čas t = 140 ms	66	6,288	763	6,4	5,8	6,1	1,27
	67	6,338	797	6,2	5,9	6,05	1,27
	68	6,132	942	6,4	5,7	6,05	1,3
	69	6,076	955	6,9	5,7	6,3	1,27
	70	6,216	924	7	6	6,5	1,35
	71	5,884	1012	6,3	6,5	6,4	1,27

	72	6,272	807	6,9	5,4	6,15	1,24
	73	6004	915	7,3	6	6,65	1,33
	74	6,112	842	6,2	5,8	6	1,33
	75	6,298	1018	6,5	6,1	6,3	1,27
dlouhý svařovací čas t = 260 ms	80	7,236	1095	7,2	6,5	6,85	1,24
	81	7,172	940	7,7	6,3	7	1,24
	82	7,134	984	6,9	6,2	6,55	1,27
	83	7,19	1038	7,2	7,1	7,15	1,24
	84	7,272	1098	7,5	6,5	7	1,24
	85	6,824	1031	7,9	6,8	7,35	1,3
	86	7,054	1041	7,5	6,5	7	1,27
	87	7,218	1086	7,1	6,4	6,75	1,18
	88	7,056	962	7,5	6,8	7,15	1,24
89	7,2	794	7	7,1	7,05	1,21	
nízký přitlak P = 1 kN	93	6,715	857	6,7	6,5	6,6	1,24
	97	6,566	885	7,2	5,9	6,55	1,3
	98	6,844	908	7,5	6,7	7,1	1,23
	99	6,756	1085	6,9	6,7	6,8	1,3
	100	6,966	876	7,2	6,1	6,65	1,24
	101	6,874	948	6,4	5,6	6	1,27
	102	6,784	936	7,2	6,6	6,9	1,24
	103	6,8	813	6,7	6,2	6,45	1,24
	104	6,676	866	7,1	7,4	7,25	1,15
	105	6,498	955	7,6	6,2	6,9	1,27
106	6,704	831	7,1	7,3	7,2	1,24	
vysoký přitlak P = 2,5 kN	110	6,904	1003	6,8	6,4	6,6	1,18
	111	6,708	873	7,5	6,9	7,2	1,15
	112	6,6	821	7,3	6,4	6,85	1,21
	113	6,702	967	7	6,9	6,95	1,21
	114	6,532	1002	6,7	6,2	6,45	1,24
	115	6,69	789	7,5	6,1	6,8	1,24
	116	6,49	871	7,3	5,9	6,6	1,27
	117	6,666	875	6,9	6,6	6,75	1,24
	118	6,55	874	7,2	6,6	6,9	1,21
	119	6,67	994	6,8	6,3	6,55	1,21

Pozn.

- Zelená – vyhovující svar
- Červená – nevhovující svar