



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie**

Bakalářská práce

Termografické hodnocení kvality odporových svarových spojů

Thermographic quality evaluation of resistance spot welds

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: bez oboru

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

Autor práce:

Vladislav Vorobev

© 2019 ČVUT v Praze

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vorobeč** Jméno: **Vladislav** Osobní číslo: **423338**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojniho inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Termografické hodnocení kvality odporových svarových spojů

Název bakalářské práce anglicky:

Thermographic quality evaluation of resistance spot welds

Pokyny pro vypracování:

- Popis technologie bodového svařování elektrickým odporem v automobilovém průmyslu
- Analýza současného stavu v oblasti termografické kontroly svarových spojů (s bližším zaměřením na odporové bodové svařování)
- Návrh a ověření měření emisivity pro účely reálného termografického záznamu při měření odporových bodových svarů
- Návrh a provedení experimentu termografického hodnocení kvality odporových bodových svarů
- Zhodnocení dosažených výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] Škeřík, M. Infračervená termografie – podklady pro školení podle ISO 9712, ATG, 2012
- [2] ČSN EN 10878 – Nedestruktivní zkoušení – Infračervená termografie, slovník, UNMZ, 2017
- [3] Zhang H., Senkara J.: Resistance Welding: Fundamentals and Applications, CRC Press Published, 2005
- [4] Lanzoni D.: Infrared Thermography: electrical and industrial applications, 2015

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

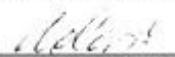
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

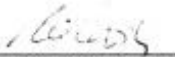
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **31.10.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18.01.2019**

Platnost zadání bakalářské 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 očkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že tuto předloženou bakalářskou práci “Termografické hodnocení kvality odporových svarových spojů ” jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce doc. Ing. Ladislava Kolaříka, Ph.D. a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu.

V Praze dne 18. ledna 2019

.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D. za odborné vedení této bakalářské práce, trpělivost, ochotný a vstřícný přístup.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE a Ing. Lucii Forejtové, IWE za pomoc při realizaci experimentu.

V neposlední řadě bych rád poděkoval Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., IWE za věnovaný čas a pomoc při realizaci experimentu.

Bakalářská práce byla realizována za finanční podpory MPO v rámci řešení projektu TRIO č. FV10757 s názvem „Termovizní systém pro nedestruktivní testování svarových spojů“.

Anotační list

Jméno autora:	Vladislav Vorobev		
Název BP:	Termografické hodnocení kvality odporových svarových spojů		
Anglický název:	Thermographic quality evaluation of resistance spot welds		
Akademický rok:	2018/2019		
Ústav/Odbor:	Strojírenské technologie		
Vedoucí BP:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.		
Bibliografické údaje:	Počet stran:	76	
	Počet obrázků:	51	
	Počet tabulek:	13	
	Počet příloh:	9	

Klíčová slova: NDT, nedestruktivní testování, odporové bodové svařování, termografie, emisivita, kontrola kvality, termokamera

Keywords: NDT, non-destructive testing, resistance spot welding, thermography, emissivity, quality control, thermographic camera

Anotace: V dnešní době jsou automobily důležitou součástí každodenního života člověka. Bezpečnost řidiče a cestujících během jízdy v neposlední řadě zajišťuje pevná a lehká karoserie automobilu, vyrobená z jednotlivých profilů a plechů, spojených mezi sebou odporovým bodovým svařováním. Průběžná kontrola těchto svařovaných spojů během výroby je nezbytný proces kontroly kvality celého automobilu. Jednou z nedestruktivních a moderních metod kontroly bodových spojů je termografické hodnocení, čím se zabývá tato bakalářská práce. Praktická část bakalářské práce se věnuje především měření změny emisivity základního materiálu, svaru a elektrod v závislosti na teplotě.

Abstract: Nowadays, cars are an important part of everyday life. The safety of the driver and passengers during the ride is also ensured by a strong and light body of a car, made of different profiles and sheets, connected by resistance spot welding. Continuous control of these weld joints during manufacturing is a necessary process of quality control of the whole car. One of the non-destructive and modern methods for spot welds control is thermographic inspection, which this bachelor thesis deals with. The practical part of bachelor thesis is mainly focused on measuring the change of emissivity of the the base material, the weld and the electrodes with temperature.

Obsah

1	Cíl práce	8
2	Odporové svařování	9
2.1	Odporové bodové svařování.....	9
2.1.1	Parametry svařování	10
2.1.2	Princip bodového odporového svařování	12
2.1.3	Obecná schéma tvorby spoje pro bodové svařování	14
2.1.4	Elektrody pro odporové svařování	15
2.1.5	Opotřebením elektrod.....	17
2.1.6	Svařovací stroje pro bodové svařování	18
2.1.7	Vady bodových svarových spojů	20
3	Kontrola kvality odporových bodových svarů	24
3.1	Destruktivní metody	24
3.2	Nedestruktivní metody (NDT)	25
3.2.1	Vizuální kontrola (VT).....	26
3.2.2	Ultrazvuková zkouška (UT)	27
3.2.3	Infračervená termografie (IRT).....	29
3.2.4	Základy IRT	29
4	Materiály používané v automobilovém průmyslu	39
4.1	Oceli pro automobilový průmysl.....	39
4.2	Slitiny hliníku pro automobilový průmysl	41
4.3	Trendy v použití materiálů pro automobilový průmysl.....	43
5	Experimentální část.....	45
5.1	Vlastnosti použitého materiálu.....	45
5.2	Vlastnosti elektrodové čepičky	46
5.3	Svařovací zařízení	47
5.4	Termokamera	48
6	Provedení experimentu	49
6.1	Optimalizace svařovacích parametrů	49
6.2	Kontrola kvality spoje DC05.....	51
6.3	Návrh potstupu měření emisivity	52
6.4	Měření emisivity vzorku DC05	53
6.5	Měření emisivity neopotřebené svarové čepičky	56
6.6	Měření emisivity opotřebených svarových čepiček	57

7	Závěr.....	62
8	Seznam použité literatury.....	63
9	Přílohy	69

1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je nejenom popsání současného stavu v oblasti termografické kontroly odporových bodových spojů v automobilovém průmyslu. Ale také určení a vyhodnocení, jak probíhá změna emisivity svařovaného materiálu DC05, samotného odporového bodového svaru a tepelně ovlivněné oblasti svaru v závislosti na teplotě a dále jestli se mění emisivita elektrodového materiálu svařovacích čepiček s opotřebením.

Bakalářské práce řeší počáteční dílčí část experimentu prováděného v rámci řešení projektu MPO TRIO č. FV10757 a souvisí s nutností dostatečně přesného stanovení tepelného záření pocházejícího z povrchu svařovací elektrody (tj. čepičky). Tato informace bude v praxi důležitá ke stanovení skutečného teplotního pole na svařovaném povrchu.

Praktické vysvětlení důležitosti tohoto měření je následující: Svařovací elektrody představují jednu z nejméně spolehlivých částí procesu svařování a jejich výměna, případně frézování, je častým zásahem do výrobního procesu. Tento zásah je navíc realizován obvykle preventivně (tj. např. po jistém počtu realizovaných svarů, případně jistého počtu kusů výrobků), nikoli prediktivně (tj. na základě skutečného opotřebením nebo jeho odhadu). Opotřebením svařovacích elektrod navíc představuje jeden z častých důvodů výsledného zhoršení realizovaných svarů, případně je zdrojem zmetkovitosti výrobků. Tedy od tohoto výzkumu autoři očekávají částečné řešení celé úlohy. Vedlejším výstupem pak může být zařízení či metoda pro prediktivní výměnu / renovaci opotřebených elektrod.

Nalezená a definovaná data, by mohli v budoucnu sloužit jako ukazatel pro tzv. on-line nedestruktivní kontrolu svařovacího procesu a pro nastavení procesních parametrů. Provozovatel Škoda Auto by mohl díky výsledkům integrovat do bodových svářeček ve výrobě termografické kamery, které by pak umožnili rychlou kontrolu již během procesu odporového bodového svařování. Tím by byl zajištěn nepřetržitý provoz a škody vznikající kontrolou pouze několika vybraných kusů výrobků by byly ve své většině eliminovány.

2 Odporové svařování

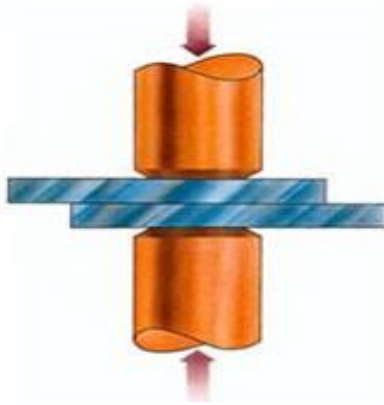
Odporové svařování je soubor svařovacích metod, které na vytvoření spoje využívají teplo vznikající průchodem svařovacího proudu svařovanými materiály a současného působení přitlačné síly. Mezi tyto metody patří bodové a švové svařování, svařování výstupkové (bradavkové) a stykové svařování stlačením a odtavením. Odporově se svařují prakticky všechny druhy ocelí, a to i pozinkované nebo jinak pokovené, které se používají např. na: karosérie automobilů, plechovky konzerv nebo drátěná pletiva. Svařovat lze i plechy z hliníku a jeho slitin, ale i materiály méně používané, jako titan nebo v jaderných aplikacích zirkon. [1]

Hlavní druhy odporového svařování jsou:

- bodové svařování,
- výstupkové svařování,
- švové svařování,
- stykové odporové svařování stlačením,
- svařování natupo odtavením.

2.1 Odporové bodové svařování

Odporové bodové svařování je nejznámějším a nejvíce používaným druhem odporového svařování. Spoj přeplátovaných plechů je tvořen jedním nebo několika bodovými svary. Pro svařování se používají válcové duté elektrody většinou s vyměnitelnou čepičkou. Ke svaření materiálů dojde po sepnutí zdroje spínačem na dobu t . Svařovanými materiály začne procházet elektrický proud I o velké intenzitě (hodnoty řádově v kA), který v místě jejich styku materiály nataví. Současně musí dojít k silnému stlačení ramen svařovacího stroje. Proto se jedná o metodu zařazenou do skupiny „tlakového svařování“. V místě styku materiálů se tak vytvoří bodový svar. [2]



Obr. 1 Schéma odporového bodového svařování [2]

Odporové bodové svařování se používá na výrobu přeplátovaných spojů dílců z tenkých plechů, tloušťky běžně do cca 2,5–3 mm, i když bodově svařovat lze i tloušťky větší. Do dnešních dnů je to nejpoužívanější spojovací technologie ve výrobě automobilových karosérií. Dnes se svařuje s pomocí robotů a v tzv. tvrdém režimu. Jenom díky tomu jsou automobilky schopny vyrábět velké množství automobilů. Kromě výroby automobilů a jiných dopravních prostředků (vagóny, letecká výroba) se bodové svařování používá v mnoha jiných oblastech, např. při výrobě domácích spotřebičů, vzduchotechniky, ve výrobě plechových krytů strojních zařízení a různých krabic. Kromě plechů se bodují také kulatiny (dráty, tyče) při výrobě populárních tzv. drátěných programů (nábytkové součásti, police, apod.). [2]

2.1.1 Parametry svařování

Velký význam při všech způsobech odporového svařování mají parametry svařování.

Při bodovém odporovém svařování jsou to např.:

- svařovací proud $I_s = 10^3$ až 10^5 A
- přítláčná síla $P_s = 500$ až $10\,000$ N
- svařovací čas $t_s = 0,04$ až 2 s

Stejného množství tepla dodaného do svaru můžeme dosáhnout vysokým proudem a krátkým časem nebo nižším svařovacím proudem dodaným v delším čase. Prvá kombinace parametrů svařování se nazývá tvrdým režimem a vyžaduje současně i

vyšší přítlačnou sílu. Druhá kombinace se pak nazývá režimem měkkým a pracuje se s nižší přítlačnou silou.

Výhody měkkého režimu:

- a) nevyžaduje stroje velkého příkonu,
- b) umožňuje používat menší průřezy elektrických vodičů,
- c) je méně citlivý na odchylky odporové svařitelnosti svařovaných materiálů.

Nevýhody měkkého režimu:

- a) vyžaduje delší strojové časy (nižší produktivita),
- b) vznikají větší deformace a napětí ve svarových spojích,
- c) je doprovázen hrubozrnnou (méně pevnou) strukturou,
- d) vyžaduje častější úpravu svařovacích elektrod.

Výhody tvrdého režimu:

- a) vyžaduje krátké strojní časy,
- b) krátkodobé působení svařovací teploty (rychlé chladnutí svaru) vede k jemnozrnné struktuře svarového kovu,
- c) dává minimální napětí a deformace,
- d) snižuje spotřebu elektrické energie a elektrod (menší opotřebení elektrod = větší životnost elektrod)

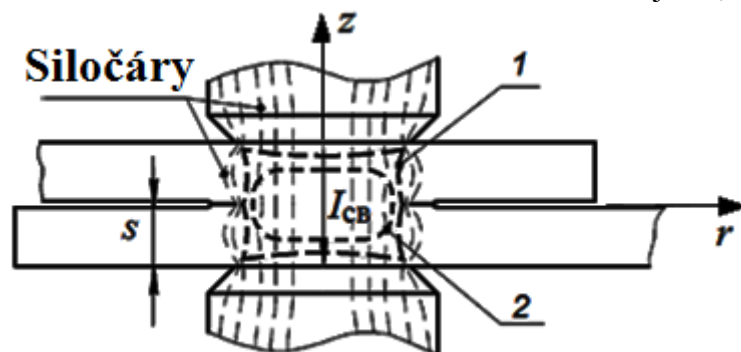
Nevýhody tvrdého režimu:

- a) vyžaduje stroje velkých příkonů a silnějších konstrukcí (např. závěsné odporové stroje musí mít vyvažovače),
- b) vyžaduje dobrou energetickou situaci v podniku.

Tab. 1 Svařovací parametry tvrdého a měkkého režimu:

	Měkký režim	Tvrdý režim
Svařovací tlak – p	do 50 N.mm ⁻² +/-	~1000 N. mm ⁻²
Svařovací síla – F	do 1000N	~2000 N
Proudová hustota	do 250 A. mm ⁻² do 5000A	~500 A. mm ⁻²
Svařovací proud - I		~10000 A
Svařovací čas (čas v periodách)	nad 0,5 s nad 25 per	~0,16 s ~8 per

V závislosti na zvoleném režimu svařování následně závisí tvar jádra, viz. obr. 2



Obr. 2 Tvar jádra pro tvrdý (1) a měkký (2) režim [3]

2.1.2 Princip bodového odporového svařování

Při svařování elektrickým odporem se nepoužívá externí zdroj tepla (jako např. elektrický oblouk), ale teplo se generuje přímo v materiálu (průchodem elektrického proudu přes svařované díly). Teplo tedy vzniká pomocí elektrického odporu v místě styku dvou svařovaných materiálů. Jedná se o tzv. přechodový odpor. Průchodem elektrického proudu (vysoké hodnoty) svařovaným místem a vznikem zmíněného odporu dojde k místnímu ohřevu materiálů. Materiály se teplem nataví a k jejich svaření dojde po silném stlačení. Zdroje pro svařování elektrickým odporem tedy musí obsahovat kromě výkonného zdroje elektrického proudu také mechanické prvky, umožňující velmi silné stlačení svařovaných materiálů, v místě svaru (obr. 7).

Množství tepla, které vzniká v místě styku dvou materiálů, lze vyjádřit Joule-Lenzovým zákonem:

$$Q = R * I^2 * t \quad (1)$$

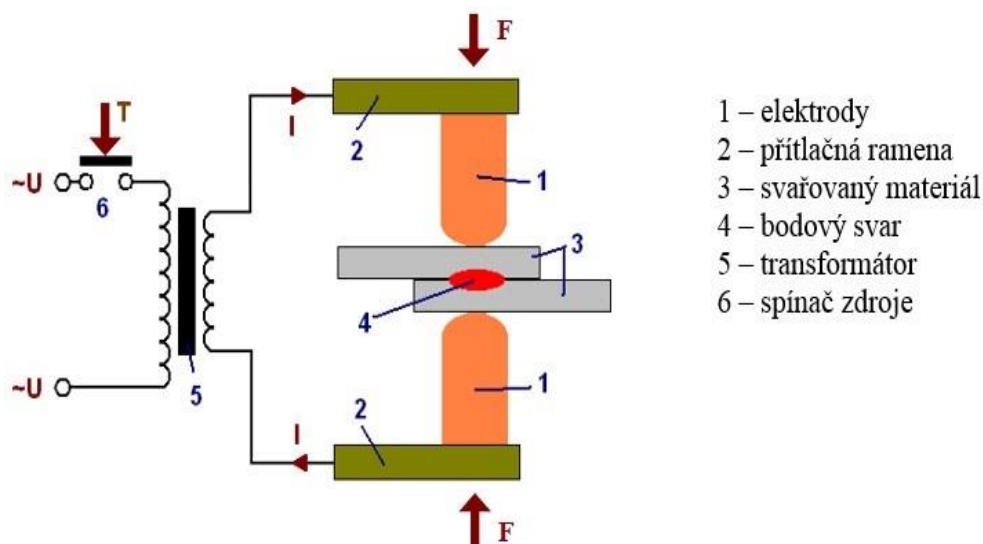
kde:

Q - je množství tepla [J]

R - elektrický odpor (ΣR - skládá se z několika složek odporu) [Ω]

I - elektrický proud [A]

t - doba průchodu proudu [s]

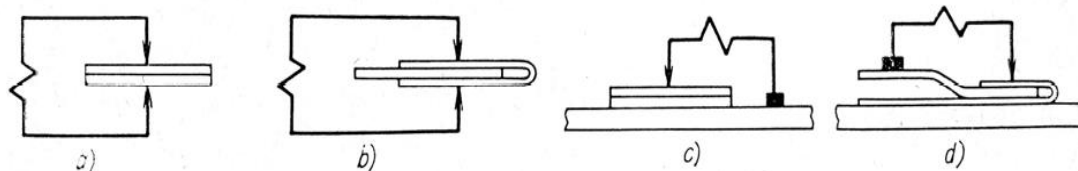


Obr. 3 Princip bodového odporového svařování

Při bodovém svařování vzniká spoj ve tvaru svařových čóček mezi přeplátovanými dílci. Podle uspořádání svařovacích elektrod se dá rozdělit na dvě hlavní skupiny:

přímé bodové svařování – vytvářejí se svary mezi elektrodami umístěnými obyčejně souose z opačných stran svařovaných dílců,

nepřímé bodové svařování – vytvářejí se svary tak, že elektrody jsou umístěny obyčejně v různých osách z jedné strany svařovaných dílců (obr. 5).

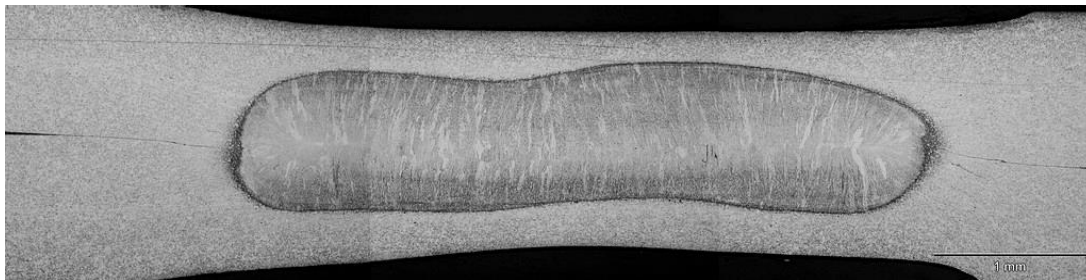


Obr. 4 Základní druhy bodového svařování

- a) přímé s bočním proudem
- b) přímé s bočním proudem
- c) nepřímé bez bočního proudu
- d) nepřímé s bočním proudem

Svařovaný materiál je sevřen mezi elektrody. Elektrody jsou upevněny na přitlačná ramena a jsou napájené ze zdroje svařovacího proudu. Zdrojem svařovacího proudu v bodových svářečkách je obvykle výkonný transformátor napájený ze sítě. Sekundární vinutí tohoto transformátoru tvoří jen pár závitů (obvykle jediný závit) silného měděného vodiče. U výkonných bodovek je sekundární závit chlazen vodou stejně jako ramena či elektrody.

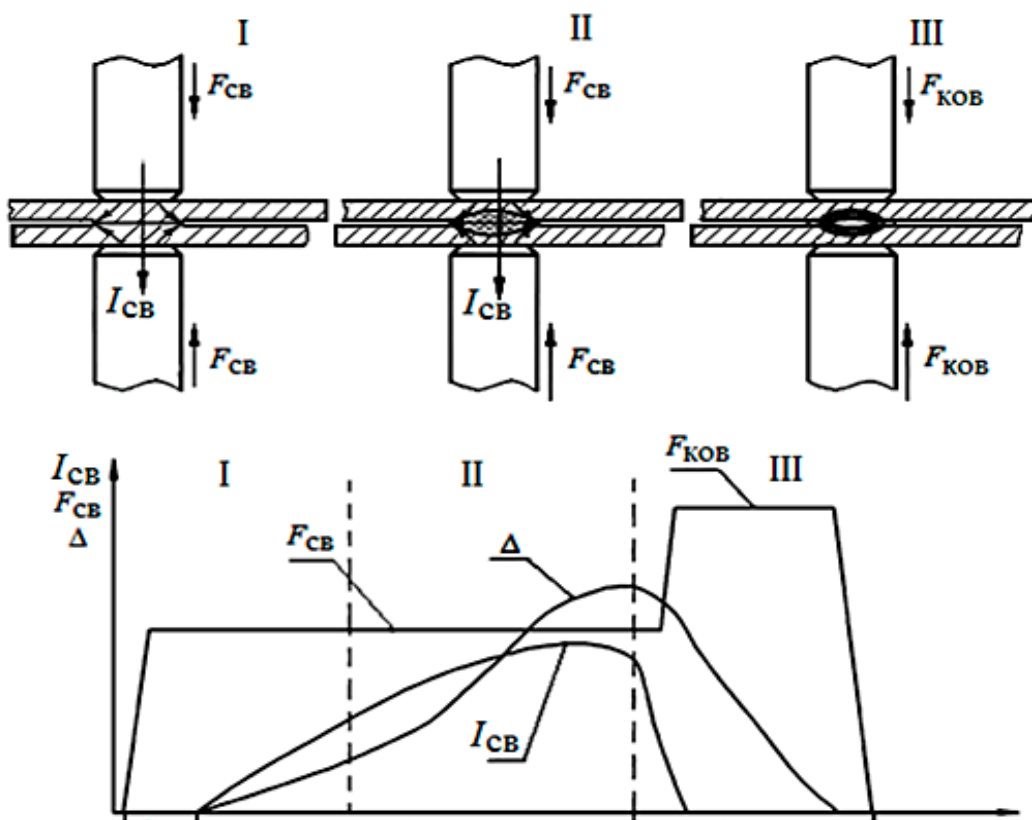
Ke svaření materiálů dojde po sepnutí zdroje spínačem na dobu t . Současně musí dojít k silnému stlačení ramen silou F . V místě styku materiálů se tak vytvoří bodový svar (obr. 5).



Obr. 5 Makrovýbrus bodového svarového spoje

2.1.3 Obecná schéma tvorby spoje pro bodové svařování

Na obrázku 6 je znázorněno obecné schéma tvorby spoje pro bodové svařování. Při odporovém bodovém způsobu svařování vzniká spoj většinou podle jediného schématu, který zahrnuje tři fáze I – III. [3]



Obr. 6 Fáze tvorby spoje pro bodové svařování [3]

I_{CB} — křivka svařovacího proudu; D — deformace; F_{CB} — svařovací síla; F_k — kovací síla.

I) První fáze

Fáze začíná od okamžiku stlačení svařovaných dílů (plechů), což způsobuje elasticko-plastickou deformaci mikronerovností dílů v místech kontaktu elektroda-svařovaný díl a místo mezi svařovanými díly, v jejímž důsledku je vytvořen počáteční kontakt. Následné spínání proudu a ohřev kovů snižuje odolnost proti plastické deformaci, což přispívá k vyrovnání mikroreliefu, zničení povrchových vrstev a vzniku elektrického kontaktu.

II) Druhá fáze

Tato fáze začíná tavením kovu. Během této fáze se vytvoří jádro tekutého kovu (tzv. svarová čočka). Průchodem proudu jádro roste do maximálně možné šířky a výšky. Během procesu tavení kovů a růstu jádra se kov promíchá, povrchové vrstvy se odstraní a vytvoří se kovové vazby v kapalně fázi. Postupy plastické deformace pokračují. Během procesu ohřevu oblasti svaru dochází k tepelné roztažnosti kovu.

III) Třetí fáze

Konečná fáze, která začíná vypnutím proudu, je charakterizována chlazením kovu v oblasti svarového spoje a krystalizací kapalného jádra (svarové čočky). Tímto je vytvořena společná svarová čočka pro oba díly, které mají být spojeny, která má charakter litého materiálu. Během chlazení v důsledku poklesu objemu kovů vznikají v oblasti svarového spoje zbytková napětí. Aby se snížila úroveň těchto napětí a zabránilo vzniku smršťovacích trhlin a dutin, vyžaduje se značné úsilí. [3]

2.1.4 Elektrody pro odporové svařování

V dnešní době nejčastějším materiálem pro výrobu elektrod pro odporové svařování je měď, respektive její slitiny. Materiály lze rozdělit do dvou základních skupin (A a B podle RWMA Resistance Welder Manufacturers Association), které se dále člení do podskupin:

- Skupina A – Měď a slitiny mědi:
 - Tepelně nezpracované slitiny mědi s vysokou elektrickou vodivostí a střední tvrdostí;
 - Tepelně zpracované/tvářené za studena slitiny mědi s vyšší tvrdostí;

- Tepelně zpracované slitiny mědi s vylepšenými mechanickými vlastnostmi, ale s menší elektrickou vodivostí než u typu 1 a typu 2;

- Speciální slitiny mědi. [4]

- Skupina B – Slinuté materiály:

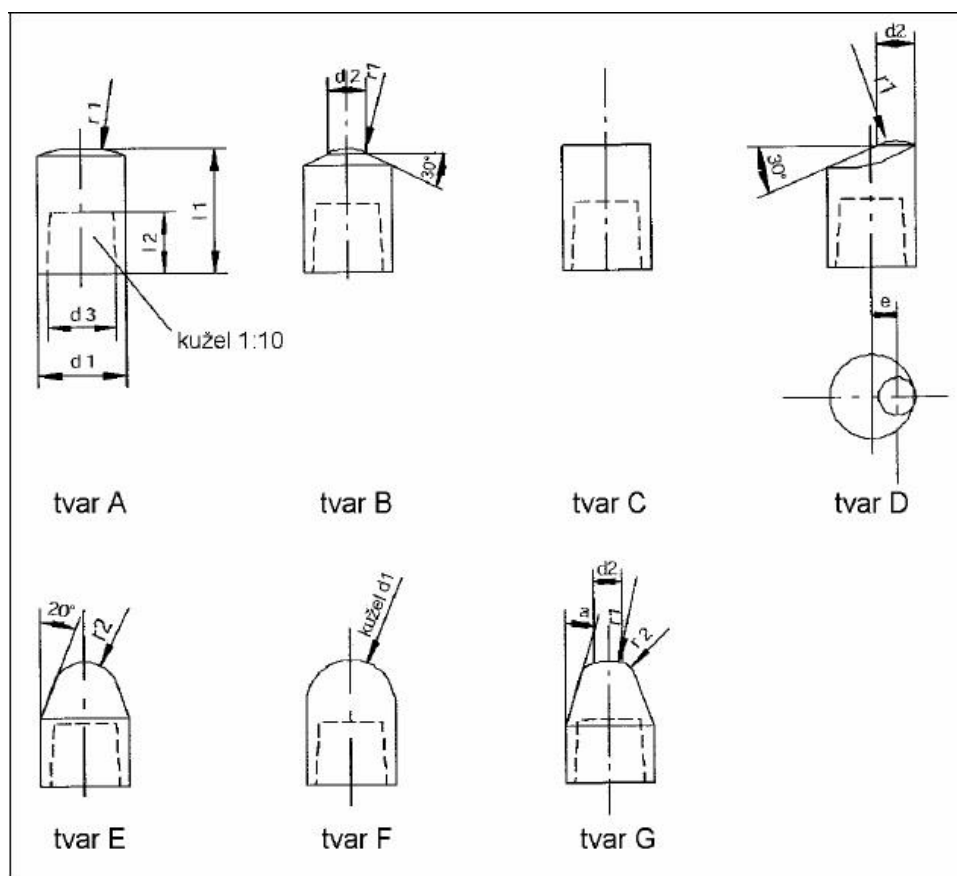
- Slinuté materiály wolframu;

- Slinuté materiály mědi a wolframu;

- Slinuté materiály wolframu a stříbra;

- Slinuté materiály molybdenu.

Norma ČSN EN ISO 5821 uvádí rozdělení elektrod pro odporové svařování podle tvaru A až G (obr. 7). Na rozdíl od elektrod tvaru A-D, elektrody tvaru E, F a G lze frézovat a tím zvýšit životnost elektrod a snížit ekonomické náklady. [5]



Obr. 7 Výměnné čepičky elektrod podle ČSN EN ISO 5821 [5]

2.1.5 Opotřebenění elektrod

Mechanismus opotřebenění elektrod při odporovém bodovém svařování je složitý proces. V důsledku elektrického, mechanického, tepelného a metalurgického namáhání dochází postupně ke změnám geometrie pracovní části elektrod, ke změně drsnosti a znečištění pracovních ploch, ke změnám mechanických i fyzikálních vlastností materiálu elektrod. Nastává také mechanické poškozování pracovní části elektrody vlivem „nalepování“ na svařovaný (tzv. základní) materiál a následného odtržení od svařovaného materiálu po skončení svařovacího procesu. Metalurgicky ovlivněná vrstva se na elektrodě vytváří velmi rychle a již po svaření několika svarů se mění podmínky pro průchod elektrického proudu. Všechny uvedené jevy mají samozřejmě vliv na měnící se kvalitu svarů. Pro výrobu nosných svarů u odporového bodového svařování je důležitým údajem počet svarů zhotovitelných elektrodami, u kterých dosáhneme vytvoření pravidelné svarové čočky větší, než určitá minimální hodnota a tím i s dostatečnou únosností. Kvalita svarů a životnost elektrod jsou tudíž vzájemně úzce svázány. Kvalita svarů s rostoucím opotřebením postupně klesá, svarová čočka se zmenšuje, svary již nejsou symetrické a nakonec se svarové čočky přestávají vytvářet. [35]

Hlavní funkcí elektrod při bodovém svařování je zabezpečit spolehlivý průchod elektrického proudu svařovanými díly. „Ideální“ elektrodový materiál by měl mít tyto vlastnosti [35]:

- vysokou elektrickou a tepelnou vodivost za normální i zvýšené teploty;
- dostatečnou mechanickou pevnost, aby se elektroda ani při vysokém svařovacím tlaku nedeformovala;
- co nejvyšší teplotu měknutí;
- co nejmenší sklon k legování svařovaným materiálem;
- velkou odolnost proti oxidaci, se zřetelem k žádoucímu malému odporu mezi elektrodou a svařovaným dílem;
- dobrou odolnost proti otěru za vyšších teplot;
- dobrou obrobiteľnosť;
- nízké výrobní náklady.

2.1.6 Svařovací stroje pro bodové svařování

Stabilní bodové svařovací zdroje – pro bodové svařování s přeplátováním, pro součásti z plechu a páskového materiálu, celkové tloušťky obvykle cca do 12 mm. Od jiných “svářeček” se liší hlavně mechanismem na vyvinutí protlačovacího tlaku elektrod, tento mechanismus bývá nožní, pneumatický, motorický nebo hydraulický (obr. 8).

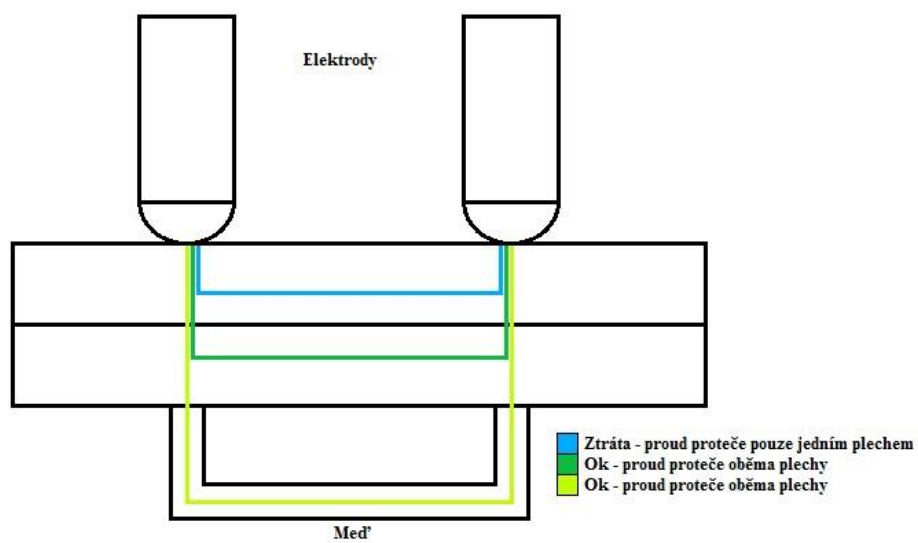
Závěsné bodovky – tato svařovací zařízení slouží hlavně k svařování velkých plechových výrobků, které se nedají snadno zvedat na stabilní svařovací stroje, např. při výrobě automobilových karosérií a vagónů, kde často bývají zakomponované do automatických výrobních linek (obr. 9).



Obr. 8 Stabilní bodová svářečka TECNA 4640 [7]; Obr. 9 Závěsná bodová svářečka TECNA 3321 [8]

Bodové svařovací zdroje speciální – bodové elektrody jsou u základních typů bodových “svářeček” uspořádány souose proti sobě a vytvářejí svar přímým působením svařovacího proudu, jako speciální typ můžeme uvést např. jednostranné bodovací kleště, které mají buď jednu přitlačnou elektrodu a ukostření z protilehlé strany nebo v některých případech mají kleště dvě stejnostranné elektrody a měděný vodič na podložení spodního plechu, proud pak protéká mezi elektrodami a plechem. Nevýhodou kleští je nemožnost vyvinout vyšší přitlačnou sílu a to může mít zvláště u tlustších plechů za následek horší kvalitu svaru. Dále dochází ke ztrátám svařovacího proudu. [9]

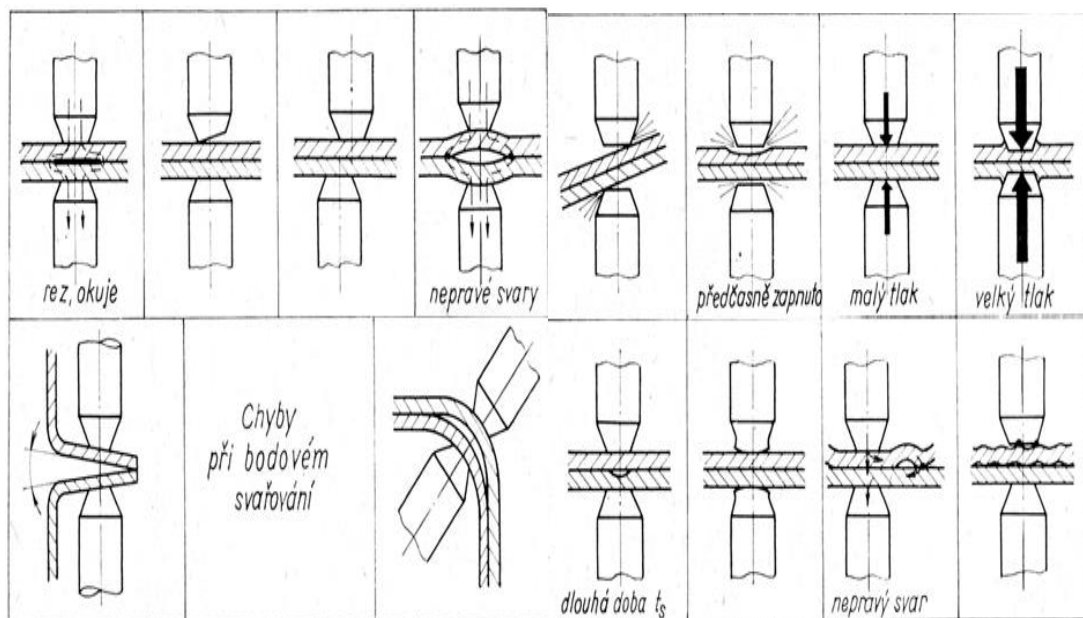
Princip funkce speciálních jednostranných kleští je znázorněn na obr. 10.



Obr. 10 Schéma průchodu proudu jednostrannými bodovacími kleštěmi
(vlastní nákres na základě použité literatury)

2.1.7 Vady bodových svarových spojů

Z obrázku 11 jsou patrné vady a možné problémy při svařování bodových svarových spojů.



Obr. 11 Vady při bodovém svařování [2]

Všechny vady, ke kterým může dojít během odporového bodového svařování, lze rozdělit na vnitřní a povrchové. [10] **Vnitřní** vady zahrnují:

- neprůvar, studený spoj;
- rozstřík (výstřík);
- vnitřní trhliny;
- dutiny.

K **povrchovým** vadám patří:

- povrchové trhliny;
- pevné vměstky;
- vady tvaru a rozměru.

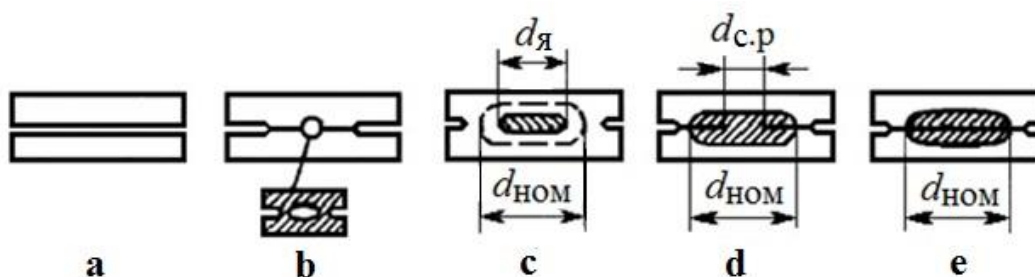
To je způsobeno nesprávně zvolenou svařovací technologií a nastavením parametrů svařovacího procesu, nesprávnou přípravou kovu pro svařování, nedostatečným chlazením elektrod při svařování, opotřebením povrchu elektrod a dalšími faktory, které nepříznivě ovlivňují kvalitu výrobku.

2.1.7.1 Neprůvar (studený spoj)

Neprůvary jsou vady vznikající v důsledku neúplného natavení základních materiálů. Mezi hlavní příčiny pro bodové odporové svařování patří především nízký svařovací proud, nízká přitlačná síla, defekty a nevhodná příprava svařovaných dílů [6]. Z hlediska pevnosti a kvality výsledného spoje, neprůvar je velmi závažnou vadou, kterou ve většině případů lze identifikovat pouze pomocí nedestruktivního zkoušení (NDT).

Možné příčiny neprůvaru:

- snížení svařovacího proudu v důsledku poklesu napětí v napájecí síti stroje;
- velké “odbočování” proudu (tzv. shuntování) v důsledku malé vzdálenosti mezi jednotlivými bodovými svary, špatné očištění povrchu svařovaných dílů, dotyk svařovaných dílů a částí stroje mimo oblast svařování (např. dotyk bočního povrchu elektrody);
- snížení el. odporu svařovaných dílů v důsledku výrazného zvýšení kontaktního povrchu elektrody nebo náhodného zvýšení síly působící na elektrody;
- zkrácení doby ohřevu v důsledku nepřesného automatického nastavení svařovacího času pro řízení svařovacího cyklu (při svařování na automatických strojích) nebo nízká kvalifikace operátora (při použití neautomatického stroje);
- náhodné zvýšení tloušťky dílu při použití nestandardního materiálu. [11]



Obr. 12 Typy neprůvarů [12]

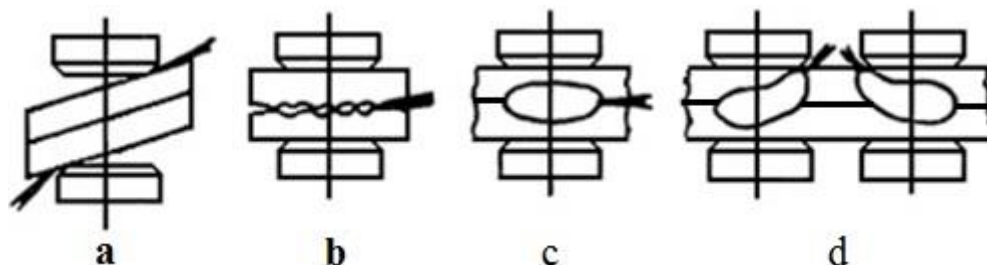
Rozdělení neprůvarů je uvedeno na obr. 12 (kde: d_{HOM} - nominální průměr jádra, $d_{\text{Я}}$ - skutečný průměr jádra, $d_{\text{c.p}}$ - průměr zóny vzájemného natavení) a obsahuje následující typy:

- a) nedošlo ke spojení;
- b) připojení na oddělených mikroreliefech;
- c) malý průměr jádra;
- d) nedostatečná oblast vzájemného natavení;
- e) žádná natavení (studený spoj).

2.1.7.2 Rozstřík (výstřík) kovu

Rozstřík vznikne vystříknutím částí roztaveného kovu, obvykle z oblasti svaru (svarové čochky).

Typy rozstříků, viz obr. 13:



Obr. 13 Typy rozstříků [3]

a) vnější;

b) vnitřní (mezi svařovanými díly);

c) počáteční (v první fázi);

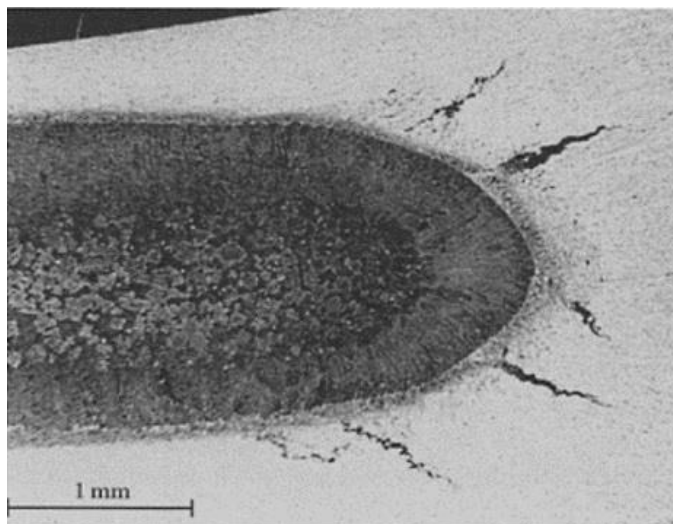
d) konečné (ve druhé fázi).

- Vnější rozstřík zhoršuje vzhled výrobků a snižuje životnost elektrod.
- Vnitřní rozstřík často brání růstu svarové čochky v důsledku zvýšeného proudu a chlazení kovů.
- Konečný rozstřík často způsobuje trhliny a hluboké promáčkliny.

Obecnou příčinou vzniku této vady je zpoždění deformace vzhledem k rychlosti ohřevu. Například počáteční rozstříky jsou způsobeny přehřátím jednotlivých míst (lokálních kontaktů) vůči poměrně malé ploše, kvůli špatně vyrovnaným elektrodám nebo kvůli špatné přípravě a očištění povrchu. [3]

2.1.7.3 Trhliny

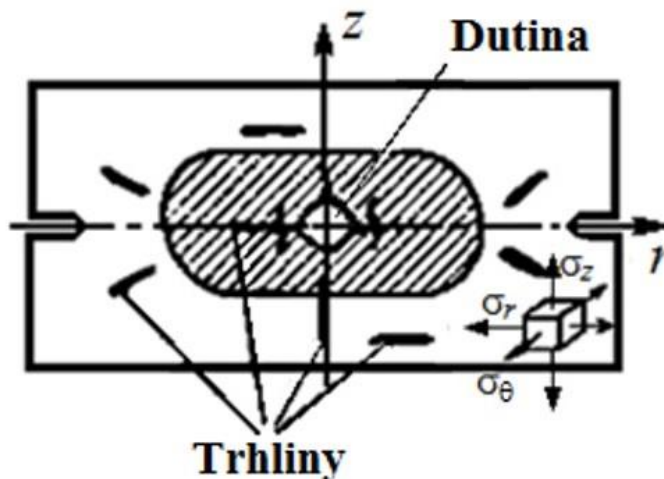
Trhliny (obr. 14) vznikají v důsledku špatné svařitelnosti materiálu, kdy dochází k jeho zakalení. Snižují únosnost spoje z hlediska dynamického namáhání. Trhliny lze potlačit použitím měkkého svařovacího režimu, nebo snížením intenzity chlazení elektrody.



Obr. 14 Ukázka trhlin [14]

2.1.7.4 Dutiny

Dutiny (obr. 15) vznikají při nevhodně zvoleném režimu svařování resp. nastavených svařovacích parametrech. Tzn. při příliš dlouhém ohřevu materiálu nebo při příliš vysoké hodnotě svařovacího proudu. Často jsou tyto vady spojené s výstřikem materiálu a to buď mezi svařovanými plechy nebo pod elektrodou. Vzniku dutin se zamezí správně zvolenou kovací silou. [13]

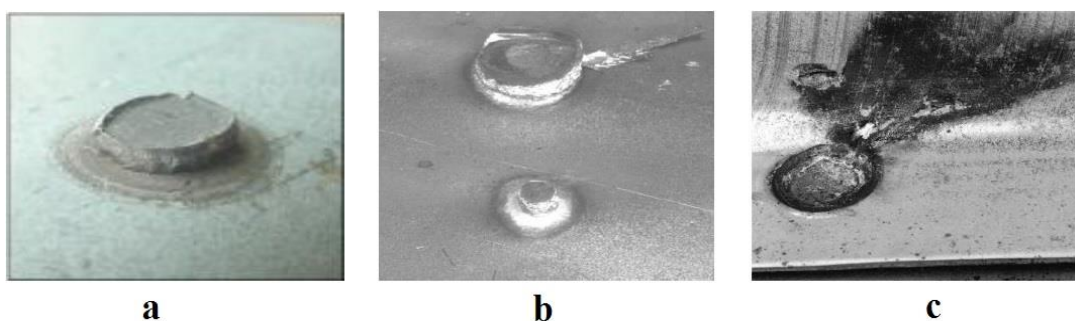


Obr. 15 Vznik trhlin a dutin [3]

3 Kontrola kvality odporových bodových svarů

Bodové svařování je jedním ze způsobů spojování kovových plechů. Stejně jako u ostatních způsobů spojování materiálů je i zde nutné kontrolovat, zda svařené díly splňují všechny požadavky nutné pro správnou funkci spoje. Pro posuzování kvality svarů se v technické praxi užívá řada zkoušek, které lze rozdělit do dvou základních kategorií na zkoušky **destruktivní** a **nedestruktivní** (Non Destructive Testing, dále jen **NDT**).

Na obr. 16 je znázorněno jak vypadá: **a)** vyhovující bodový spoj, **b)** neprůvar, **c)** rozstřík materiálu spoje (resp. svarová čočka po sekáčové resp. odlupovací zkoušce). Proto, abychom mohli ověřit kvalitu spoje se používají zkušební metody, které jsou popsány dále.

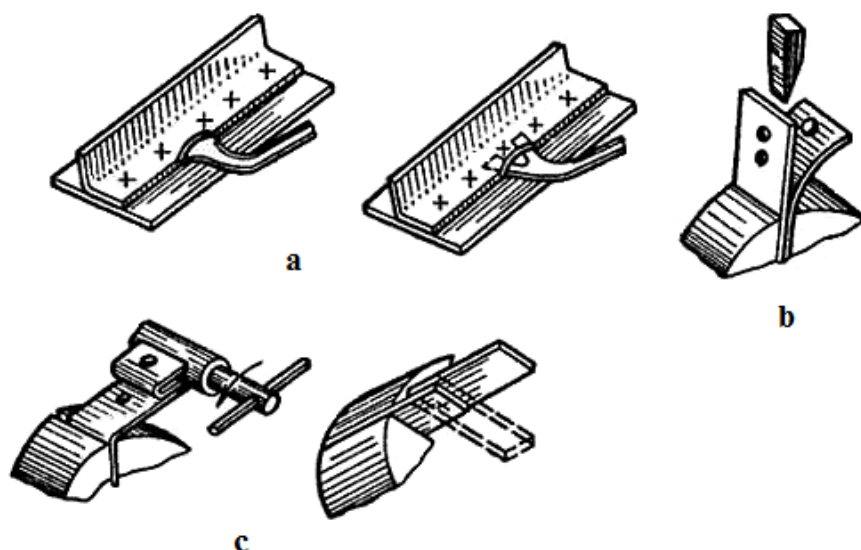


Obr. 16 Vyhovující a nevyhovující bodové spoje v závislosti na podobě svarové čočky [23]

3.1 Destruktivní metody

Destruktivní zkoušky mají nezastupitelnou roli při testování kvality svarů, protože pouze pomocí destruktivních zkoušek je možné kvantitativně určit vlastnosti svaru jako jeho rozměry, hloubku provaření a mechanické vlastnosti. Destruktivních zkoušek se využívá jak pro ověřování vlastností svarů v počáteční fázi zavádění sériové výroby nového dílu, tak i pro ověřování kvality dílů při další produkci. Mezi tyto zkoušky patří jednoduché metody pro testování přímo ve výrobě jako např. sekáčová zkouška, odlupovací zkouška a zkouška tahem. Destruktivní metody zkoušení pro bodové svařování jsou ukázané na obr. 17, kde:

- a) Zkouška roztržením;
- b) Sekáčová zkouška;
- c) Odlupovací zkouška.



Obr. 17 Destruktivní metody kontroly kvality [3]

Další významné metody nedestruktivní kontroly jsou:

- d) Zkouška stříhem;
- e) Zkouška tahem.

Všechny tyto zkoušky jsou popsány v normách včetně velikostí zkušebních těles, způsobů provádění a vyhodnocování zkoušek. Tyto normy jsou zařazené do systému ČSN EN ISO: ČSN EN ISO 10 447 - pro odlupovací a sekáčovou zkoušku, ČSN EN ISO 14272 - pro zkoušku tahem, ČSN EN ISO 14273 - pro zkoušku stříhem.

Destruktivní zkoušky jsou jednoduché a nepotřebují často speciální vybavení a složité nářadí (např. sekáčová a odlupovací zkouška), ale u dražších výrobků, jaké v našem případě jsou karoserie vozů, destruktivní metody pro sériovou výrobu znamenají obrovskou ztrátu peněžních prostředků bez možnosti nepřetržitého provozu linek. Proto v běžném automobilovém průmyslu se přednostně používají zkoušky NDT, po kterých výrobek je stále použitelný.

3.2 Nedestruktivní metody (NDT)

Základní NDT metody pro bodové svary jsou:

- **Vizuální (VT);**
- **Ultrazvuková (UT);**
- **Infračervená termografie (IRT).**

NDT je, s výjimkou vizuální metody, vždy metoda nepřímá, to znamená, že se interpretují a hodnotí zkoušením získané indikace.

Úspěšné provádění destruktivních zkoušek je kromě vybavení (přístroje, prostředky, pomůcky) závislé také na kvalifikace NDT personálu a na kvalitě standardů, procedur, postupů a instrukcí podle kterých se NDT provádí. [24]

3.2.1 Vizualní kontrola (VT)

Vizuální kontrola je prováděna na připraveném (očistěném, odmaštěném a vysušeném) zkoušeném povrchu součásti. Kvalita této přípravy v důsledku ovlivňuje dosažitelnou citlivost zkoušky - identifikovatelnost vad. Úspěšnost zkoušky je závislá na splnění základních atributů, kterými jsou:

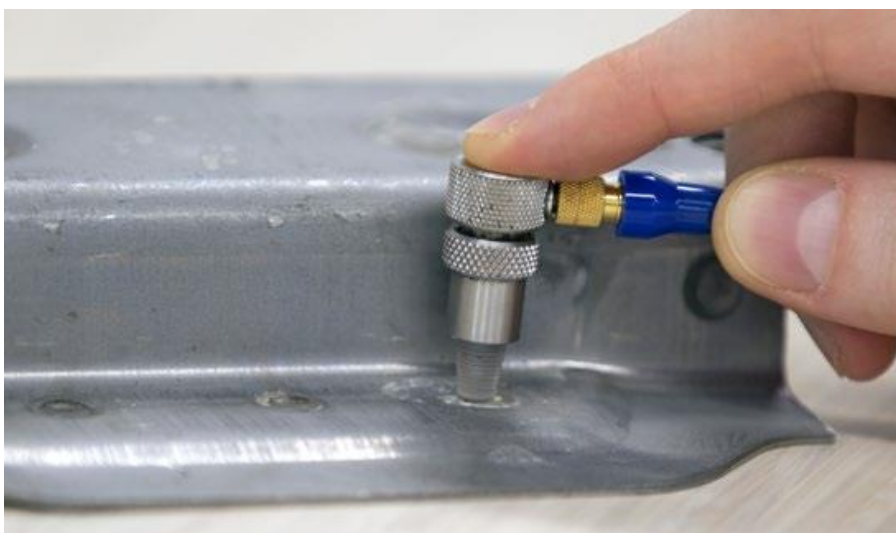
- zraková způsobilost pracovníka provádějícího zkoušky;
- podmínka dostatečného osvětlení zkoušeného povrchu a dostatečného přístupu k prohlížené součásti;
- odborná způsobilost - znalosti a praktické dovednosti pracovníka provádějícího VT zkoušky;

Kontrola může být prováděna přímo zrakem bez pomůcek, dále s využitím základních pomůcek jako jsou zrcátka, měřky, měřidla, lupy, atd. (přímá metoda), případně pomocí endoskopů a dalších speciálních zařízení. V posledních letech se stále významněji vyskytuje požadavek na provádění vizuálních zkoušek pomocí endoskopů (boroskopů, fibroskopů, videoskopů - nepřímá metoda). Typické aplikace se objevují zejména v oblasti letectví (při provozních inspekcích), v energetice (kontrola zásobníků, výměníků, potrubí, ..), ale i při standardní strojírenské výrobě - např. svařované rámy, uzavřené profily apod. [25] Stejně tak se jako základní kontrolní metoda dá využít VT zkouška I pro kontrolu bodových odporových svarů. Nicméně ani 100% vyhovující VT není schopna zaručit bezproblémový svar. Proto je nutné tuto metodu kombinovat s ostatními kontrolními metodami.

3.2.2 Ultrazvuková zkouška (UT)

Další z významných metod nedestruktivního zkoušení je kontrola ultrazvukem. Ultrazvuk je vlastně mechanické kmitání částic prostředí s frekvencí nad 20 000 Hz. Ultrazvukovou metodou lze zjišťovat vnitřní vady svarů a materiálu plošného charakteru (trhliny, studené spoje apod.). Touto metodou lze získat informace rovněž o poloze a velikosti vady. [26]

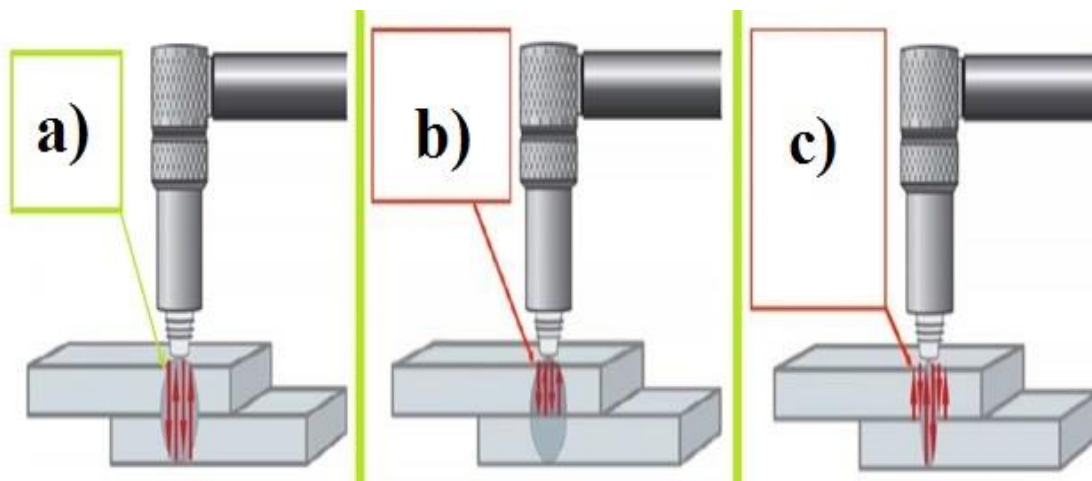
Během zkoušky je svar testován přístrojem s ultrazvukovou sondou, která je těsně přiložená k testovanému svaru a vydává ultrazvukové signály o konkrétní frekvenci (obr.18). Odražený signál je zpracován a výsledek je porovnán se vzorem signálu změřeném na referenčním svaru. Zařízení pro ultrazvukovou zkoušku tedy musí obsahovat databázi referenčních vzorů, pokud jde o digitální přístroj. Pomocí této metody je možné vyhodnotit, zda je svar vyhovující nebo obsahuje vady, a také změřit rozměr svarové čochy, kvalitu průvaru a další potřebné parametry. [27]



Obr. 18 Ukázka ultrazvukové zkoušky [28]

Na obr. 19 jsou ukázány případy, jak vypadá ultrazvuková zkouška pro 3 případy svarů:

- a) Vyhovující svar;
- b) Neprůvar;
- c) Nedostatečný (příliš malý) spoj.



Obr. 19 Průběh ultrazvukových vln přes různé případy odporového bodového svaru [28]

a) V případě vyhovujícího svaru (obr. 19a) vzdálenost pro každý svazek odraženého signálu bude odpovídat tloušťce svaru a rychlost útlumu bude propojena s útlumem v jádře bodu svaru.

b) Pokud jde o neprůvar (studený spoj) (obr. 19b), vysílané signály jsou odražené přímo od středu a jsou umístěné blíže k sobě a signál se vrací v kratších časových periodách.

c) Pro nedostatečný svar (obr. 19c), pouze část vysílaných signálů je odražena od konce celé tloušťky spoje, druhá část vysílaných signálů je odražena od poloviny spoje, to znamená od cca středu celkové vzdálenosti. [28]

Vysílaný i odražený signál je graficky monitorován na obrazovce ultrazvukového přístroje a vyhodnocen.

Velkou nevýhodou ultrazvukové metody je cena samotného zařízení a nutnost kvalifikovaného personálu. Zkouška je však nedestruktivní a v případě, že je prováděna správným způsobem přináší výsledky v některých případech lepší než destruktivní zkoušky, protože dokáže vyloučit vnitřní vady materiálu a vyrobený díl nebude během zkoušky zničen. Avšak zkouška trvá poměrně dlouho ve srovnání s ostatními metodami a nedá se vždy použít u automatických linek bez přítomnosti kvalifikované obsluhy, protože nedokáže nalézt a vyhodnotit povrchové vady, např. rozstřík.

3.2.3 Infračervená termografie (IRT)

Infračervená termografie (IRT – Infra Red Thermography) je nedestruktivní bezkontaktní defektoskopická metoda, která se zabývá analýzou rozložení teplotního pole na povrchu tělesa bezkontaktním způsobem. Její princip je založen na detekci tepelného záření povrchu měřeného objektu. Současné infračervené termografické metody lze rozdělit na dvě základní skupiny - pasivní a aktivní termografie.

Termografie umožňuje detekci plošných i objemových vad, které leží na povrchu, či pod povrchem (maximální hloubka, ve které je necelistvost ještě možné detekovat závisí na zkoušeném materiálu a na použité technice zkoušení). Podobný detekční dosah má například metoda magnetická prášková, nebo metoda vířivých proudů. Termografie ale na rozdíl od těchto metod, umožňuje získat rychlý přehled o stavu velké plochy (řádově v m²). [29]

3.2.4 Základy IRT

Samotný základ termografie je postaven na faktu, že každé těleso je schopno vyzařovat energii v podobě infračerveného záření (IR = infra red). Toto záření jsme schopni detekovat za pomoci speciálně upravených kamer, tzv. termokamer (IR kamer). Termokamery umožňují zobrazení povrchových teplot na zkoumaných objektech. [30]

3.2.4.1 Teplo, teplota, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita

Teplo Q je jednou z forem vnitřní energie materiálu. První termodynamický zákon zní: *Přírůstek vnitřní energie soustavy (ΔU) je roven součtu práce (W) vykonané okolními tělesy působící na soustavu a tepla (Q) odevzdaného okolními tělesy soustavě.* [31]

$$\Delta U = Q + W \quad (2)$$

kde:

ΔU = změna vnitřní energie [J], Q = teplo [J], W = práce [J].

Teplota T je charakteristika stavu hmoty. Je to fyzikální veličina, kterou je člověk schopen vnímat, popsat (teplé, studené, atd.) a také měřit. Základní jednotkou SI pro měření teploty je Kelvin [K]. [29]

Tepelná vodivost - fyzikální veličina, charakterizující schopnost látky vést, přenášet teplo. Představuje rychlost, jakou se teplo šíří a přenáší z jedné teplejší části materiálů do jiné chladnější. Každý materiál má svoji tepelnou vodivost, teda svůj součinitel tepelné vodivosti (tab. 2).

Tab. 2 Příklady tepelné vodivosti vybraných látek (při 20°C) [32]:

Látka	Tepelná vodivost [W/m.K]
vzduch	0,026
voda	0,6
železo	73
hliník	229
měď	395

Měrná tepelná kapacita c [J/kg*K] vyjadřuje množství tepla, které je potřeba dodat materiálu o hmotnosti 1 kg, aby se jeho teplota zvýšila o jeden Kelvin. Látky s vysokou měrnou tepelnou kapacitou jsou schopny absorbovat velké množství tepla při relativně malém zvýšení teploty. [29]

Tab. 3 Příklady měrné tepelné kapacity pro různé materiály [29]:

Látka	Měrná tepelná kapacita [J/kg*K]
měď	386
hliník	237
železo	80,2
led	2,2
voda	0,6062

3.2.4.2 Přenos tepla

Teplo se může přenášet pouze z teplejšího místa do místa chladnějšího. Přenos tepla je možné realizovat třemi způsoby:

- **Vedením;**
- **Prouděním;**
- **Zářením.**

Z hlediska IRT jsou významné všechny tři uvedené způsoby.

- **Přenos tepla vedením (kondukcí)**

Přenos tepla vedením (kondukcí) probíhá prostřednictvím přímých srážek molekul. Z oblasti s vyšší kinetickou energií se tepelná energie přenáší do oblasti s nižší kinetickou energií. Částice s vyšší rychlostí se srážejí s částicemi s nižší rychlostí. V důsledku toho se zvýší kinetická energie pomalejších částic. Vedení je nejčastějším způsobem přenosu tepla a dochází k němu prostřednictvím fyzického kontaktu. Příkladem je, když si sáhnete na okno nebo vložíte kus kovu do otevřeného plamene. [33]

- **Přenos tepla prouděním (konvekcí)**

Když se ohřeje tekutina, jako je vzduch nebo kapalina, a pak proudí od zdroje, nese s sebou tepelnou energii. Tento druh přenosu tepla se nazývá prouděním (konvekcí). Tekutina se nad horkým povrchem rozpíná, získává nižší hustotu a stoupá. [33]

- **Přenos tepla zářením (radiací)**

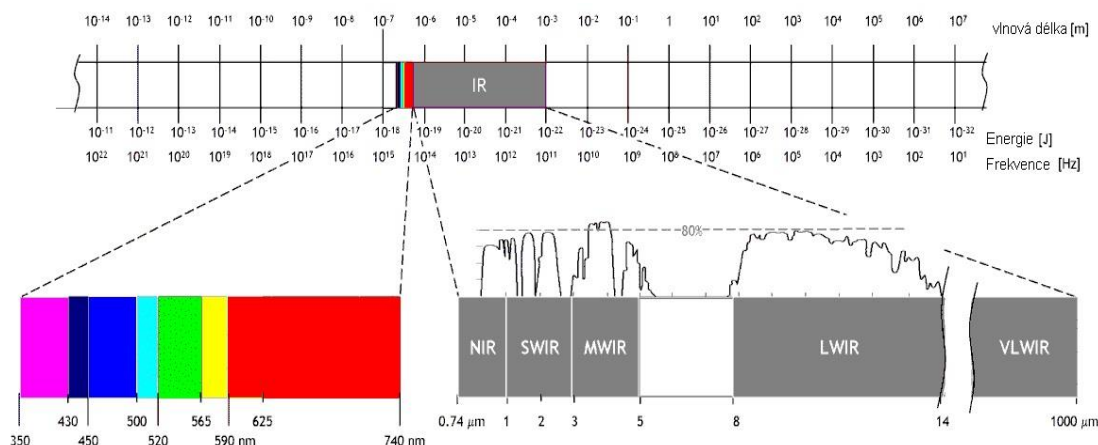
Každé těleso mající teplotu vyšší, než 0K vyzařuje teplo. Přenos tepla zářením se může uplatnit skrze hmotné prostředí i skrze vakuum. Na rozdíl od předešlých mechanismů se totiž nerealizuje s pomocí hmotných částic, ale díky elektromagnetickému vlnění. Přenos zářením je pro termografii nejdůležitější. Umožňuje bezkontaktní mapování rozložení teploty na povrchu zkoumané součásti. [29]

3.2.4.3 Elektromagnetické záření a emisivita

Elektromagnetické záření je souhrnný název pro záření o různých vlnových délkách. Podle vlnových délek lze rozlišovat jednotlivé druhy elektromagnetického záření, které tvoří celé spektrum. Hlavní oblasti jsou: radiové vlny, mikrovlny, infračervené záření, viditelné světlo, ultrafialové záření, RTG a gama záření. [29]

Infračervené záření se dělí na tři základní segmenty podle vlnové délky měřené v mikronech [34]:

- blízké (near) infračervené záření (0,74–1,4 mikrometru),
- střední (middle) infračervené záření (1,4-8 mikrometrů),
- dlouhé (far) infračervené záření (8 mikrometrů –1 mm).

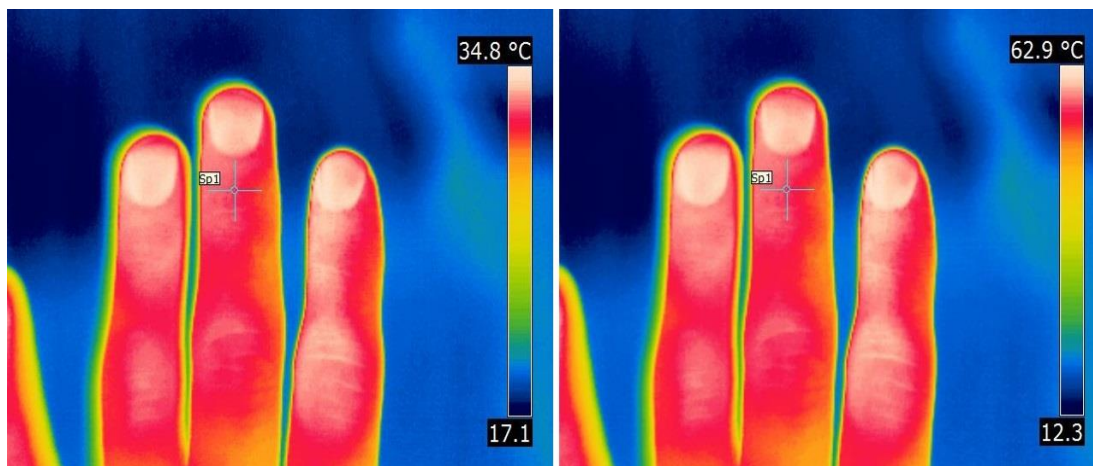


Obr. 20 Pásma IR záření dle ISO 20473 [29]

Tab. 4 Rozdělení na pásma IR záření dle ISO 20473 [29]:

Zkratka	Vlnová délka [μm]	Popis
NIR	0,74 ÷ 1,4	blízké IR záření
SWIR	1,4 ÷ 3	záření IR s krátkou vlnovou délkou
MWIR	3 ÷ 8	záření IR o středních vlnových délkách
LWIR	8 ÷ 15	záření IR dlouhé vlnové délky
VLWIR	15 ÷ 1000	záření IR velmi dlouhých vlnových délek

Emisivita látek (ϵ) je bezrozměrnou veličinou udávající poměr vyzářené energie infračervené části spektra elektromagnetického záření skutečného reálného tělesa vůči tělesu ideálnímu při stejné teplotě a stejném spektrálním rozsahu. Nabývá hodnot od 0 do 1. Je podstatným parametrem termografických měření a jeho hodnota musí být pro věrohodnost výsledku měření známa, bez správného stanovení parametrů není kvantitativní měření vůbec možné (obr. 21). [36]



Obr. 21 Ukázka závislosti měření na nastavené hodnotě emisivity [37]

Tab. 5 Naměřené hodnoty pro různé nastavení emisivity [37]:

Měřicí bod	[°C]
Obr. 21 vlevo ($\epsilon = 0,95$)	32,3
Obr. 21 vpravo ($\epsilon = 0,30$)	56,5

Emisivita je závislá na teplotě a typu povrchu materiálů. V tab. 6 jsou příklady emisivity vybraných materiálů nejvíce používaných ve strojírenství.

Tab. 6 Příklady emisivity běžných materiálů [38]:

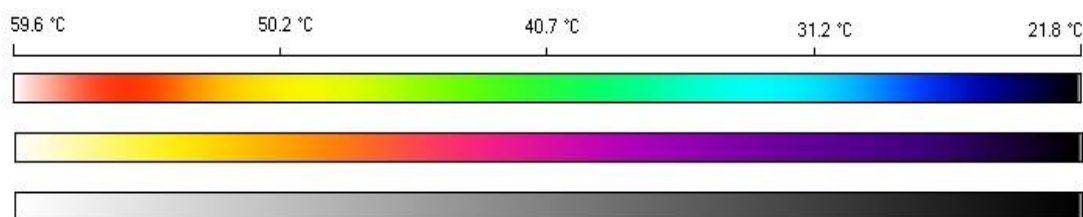
Materiál povrchu	Emisivita ϵ
Hliník, silně oxidovaný (93°C)	0,2
Hliník, leštěný (100°C)	0,09
Hliník, neoxidovaný (25°C)	0,02
Chrom (40°C)	0,08
Měď, oxidovaná (130°C)	0,76
Měď, leštěná (40°C)	0,03
Měď, válcovaný plát (40°C)	0,64
Měď, zaškrábaná (20°C)	0,04

Ocel, válcovaná za studena (93°C)	0,75-0,85
Ocel, tepelně opracovaná (200°C)	0,52
Železo, válcované za tepla (20°C)	0,77
Dřevo (70°C)	0,94

3.2.4.4 Termogram

Termokamera umožňuje zobrazit a zaznamenat rozložení teploty na povrchu pozorovaného předmětu - zobrazit tzv. termogram, složený z jednotlivých obrazových bodů, tzv. pixelů. Každý pixel má po celé své ploše stejnou barvu. Každému pixelu odpovídá určitá část zobrazované plochy. Pokud je rozlišovací schopnost kamery 320×240 obrazových bodů a na snímku je zobrazena plocha $10 \times 7,5$ m, pak každý pixel reprezentuje plochu $31,25 \times 31,25$ mm. Pixel pak zobrazí průměrnou teplotu všech dílčích teplot na ploše, kterou reprezentuje.

Teplota každého pixelu je popsána číslem. Na termogramu jsou pixely se stejnou teplotou zobrazovány stejnou barvou. Pro celou škálu teplot jsou k dispozici různé barevné palety, viz obr. 22. [29]

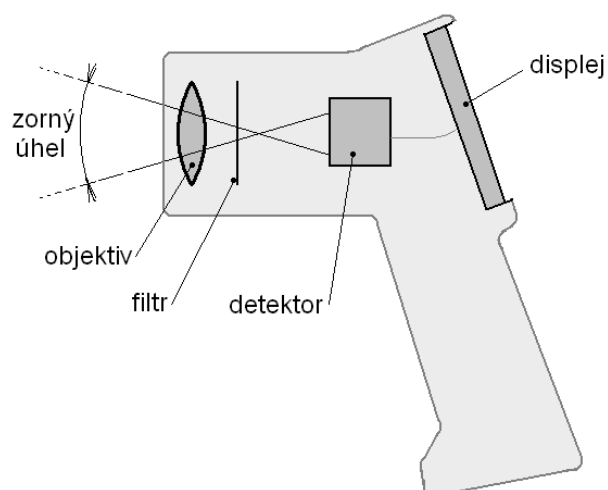


Obr. 22 Barevné palety [29]

Termogram nese v sobě informaci nejen o stavu vnitřní energie objektu (teplota), ale i o povrchových vlastnostech ovlivňujících schopnost vyzařování IR záření (emisivita) a okolních podmínkách (vliv atmosféry a projev tzv. odražené zdánlivé teploty).

3.2.4.5 Měření termokamerou

Termokamera je velice podobná klasické kameře. Hlavními součástmi jsou objektiv a detektor, mezi další součásti pak může patřit spektrální filtr, displej, skenovací optika (v případě, že detektor není plošný), nebo elektronické zpracování obrazu (obr. 23).



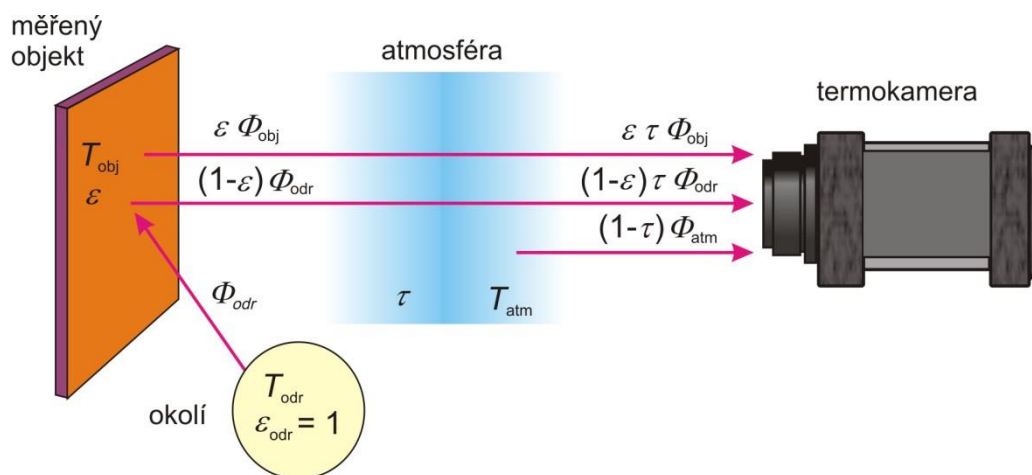
Obr. 23 Schéma termokamery [29]

Termokamera neměří teplotu přímo, ale teplota je stanovena na základě měření stanovené intenzity tepelného záření ze snímaného povrchu a zadaných parametrů měření, tj. emisivity, odražené zdánlivé teploty a parametrů korigujících vliv atmosféry.

Měření termokamerou má několik ovlivňujících faktorů a může dojít k řadě chyb, které mohou způsobit chybně naměřené údaje. Ovlivňující faktory měření [29]:

- chyba termokamery (udávána výrobcem);
- správné stanovení emisivity (která je proměnná s teplotou);
- odražená a zdánlivá teplota a vlastní vyzařování atmosféry;
- dodržení správného postupu měření;
- znalost informací o měřeném objektu.

Největším problémem při stanovení teploty za použití termografické metody jsou radiační procesy a jejich parametry, které ovlivňují radiační tok od měřeného objektu k detektorům kamery. Parametrem udávajícím množství vyzářené energie z povrchu měřeného objektu je emisivita, jejíž znalost je klíčová. Parametr propustnosti prostředí, kterým záření prochází na cestě od objektu k detektorům (atmosféra, propustné okno), projevuje jako snížení. Mezi nejdůležitější radiační procesy ovlivňující měření patří vyzařování okolních předmětů, které se od měřeného objektu odráží do kamery, dále pak vlastní vyzařování prostředí mezi měřeným objektem a kamerou a působení intenzivních zdrojů záření.



Obr. 24 Schematický průběh termografického měření [37]

Jednotlivé složky zářivého toku přijaté detektorem termokamery jsou [37]:

- Zářivý tok z objektu zeslabený průchodem atmosférou: $\varepsilon \tau \Phi_{obj}$ (teplota objektu je T_{obj});
- Odražený zářivý tok z okolních zdrojů: $(1-\varepsilon) \tau \Phi_{odr}$, kde $(1-\varepsilon)$ vyjadřuje odrazivost objektu; (Předpokládáme, že záření přicházející z okolí představuje záření z povrchů v myšlené polokouli, které mají emisivitu = 1 a stejnou teplotou T_{odr}). *Zdánlivá odražená teplota* T_{odr} je zdánlivá teplota jiných objektů, jejichž záření se odráží od povrchu měřeného objektu do termokamery;
- Zářivý tok emitovaný atmosférou: $(1-\tau) \Phi_{atm}$, kde $(1-\tau)$ vyjadřuje emisivitu atmosféry, jejíž teplota je T_{atm} ;
- Uvažuje se plná transparentnost optiky termokamery a zářivý tok optických komponent se považuje za zanedbatelný.

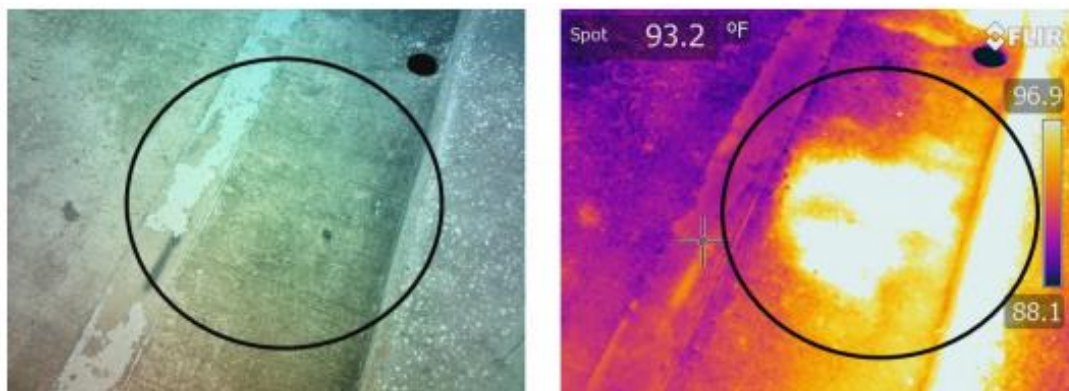
Z toho vyplývá rovnice, známá jako „rovnice termografie“, pro celkový zářivý tok, který dopadá na detektor termokamery:

$$\Phi_{celk} = \varepsilon \tau \Phi_{obj} + (1 - \varepsilon) \tau \Phi_{odr} + (1 - \tau) \Phi_{atm}. \quad (3)$$

Uživatel termokamery musí proto zadat parametry měření: emisivitu objektu ε , zdánlivou odraženou teplotu T_{odr} , teplotu atmosféry T_{atm} a propustnost atmosféry τ (místo propustnosti atmosféry se obvykle zadává relativní vlhkost a vzdálenost termokamery od objektu). Parametry měření jsou u termokamery přednastaveny na určité hodnoty, pro správné vyhodnocení měřené teploty je nutno tyto parametry korigovat podle skutečné situace.

3.2.4.6 Termografická kontrola svarových spojů

Termografická kontrola svarových spojů je moderní způsob, který by mohl za určitých podmínek vhodně doplnit nebo částečně nahradit současné NDT metody. Měření teplot, které je prováděno přímo během procesu svařování, může sloužit nejenom jako kontrola kvality dílů, ale navíc i jako zpětná vazba např. pro nastavení procesních parametrů. Vyhodnotit se dají jak malé výrobky, tak například i svařovaná konstrukce mostu, viz obr. 25.



Obr. 25 Skutečný obrázek (zleva) a obrázek z termokamery (zprava) detekující podpovrchovou vadu svařované konstrukce mostu [44]

Častěji je zatím termografie v oblasti svařování používána právě pro určení tepelného ovlivnění materiálu, tzv. teplotního pole (souhrn okamžitých hodnot teplot v bodech sledovaného prostoru), které většinou slouží pro určení teplotního zdroje. Např. jako vstupní údaje pro numerické simulace procesu svařování [39]

Výhodou termografické kontroly je možnost bezdotykového měření, vysoká produktivita a možnost provozu automatizovaných systémů pro sledování a řízení technologických procesů. Nevýhody termografické kontroly jsou náročné požadavky na čistotu prostředí a kvalitu přípravy povrchů. Například v automobilovém průmyslu systém sleduje svařovací robot a zaznamenává vady svařování. [40]

Již během svařovacího procesu, je díky této technologii možné vyhodnotit, zda svarový spoj bude vyhovující (porovnáním a vyhodnocením předem nahraných dat v zařízení). Celá oblast svaru je zobrazena, to umožňuje velmi snadnou a rychlou kontrolu.



Obr. 26 Roboty kontrolují karoserii sportovního vozu Panamera v továrně Porsche [45]

On-line nedestruktivní termografická kontrola umožňuje zkoušení až 100% všech výrobních dílů v reálném čase se schopností okamžitě identifikovat vady. Doby cyklů v automobilovém průmyslu obvykle trvají zhruba 15 až 20 sekund a načítání a analýza NDT v reálném čase musí probíhat dostatečně rychle, aby se v tomto časovém rozmezí bylo možné rozhodnout jestli díl je vyhovující nebo nevyhovující. Je to hlavní výzvou pro používání on-line termografické kontroly v automobilovém průmyslu. [41]

IR termografie může být použita pro detekci defektů u svarových spojů jako jsou například póry nebo trhliny. Tyto vady mají mnohem vyšší tepelný odpor než okolní materiál. [41] Tato metoda pro detekci povrchových trhlin je vhodná pro materiály s nízkou emisivitou povrchu, což poskytuje dobrý kontrast ve srovnání s vysokou emisivitou trhliny. Některé kovy, například hliník, se těžko kontrolují kvůli vysoké odrazivosti. [42]

Termografie, vzhledem k tomu, že používá infračervenou technologii, nedokáže působit do větších hloubek materiálů (pouze několik mm), což je jednou z hlavních nevýhod této metody. Ale daný rozsah měření bohatě stačí pro tloušťky materiálů používaných v automobilovém průmyslu (0,6 až 0,9 mm). [43]

Termografie je použitelná i pro technologie, kdy vytvoření svarového spoje trvá velmi krátký okamžik (1-2 s), například u bodového odporového svařování. Řešení těchto aplikací je v současnosti velmi aktuální téma, to má za následek vznik různých výzkumů, které intenzivně probíhají. [39]

4 Materiály používané v automobilovém průmyslu

Na materiály používané při výrobě automobilových karoserií jsou kladeny rozmanité a mnohdy protichůdné požadavky. Vnitřní díly karoserie musejí zajistit pevnost vnitřního skeletu vozu, vysokou korozní odolnost i únavové namáhání, zatímco pro vnější díly jsou charakteristické náročné designové tvary, a tedy i vysoké nároky na dostatečnou plasticitu. Nejčastěji se používají ocelové plechy, pozinkované ocelové plechy, hliníkové plechy a plasty. Výběr materiálu tak výrazně ovlivňuje především cena a měrná hmotnost materiálu. Hliníková karoserie je sice ekonomicky méně výhodná, technologicky náročnější na zpracování, ale je stále až o 43 % lehčí než karoserie ocelová. I proto se vyvíjejí moderní vysokopevnostní ocelové materiály, aby automobilová karoserie měla co nejnižší možnou hmotnost a mohla konkurovat karoserii hliníkové. Na svařitelnost mají také vliv různé povrchové úpravy, konverzní povlaky i různé typy procesních maziv, která ve svarovém kovu vytvářejí póry v důsledku vypařování, takže svařovací proces je nutné vhodným způsobem upravit. [15]

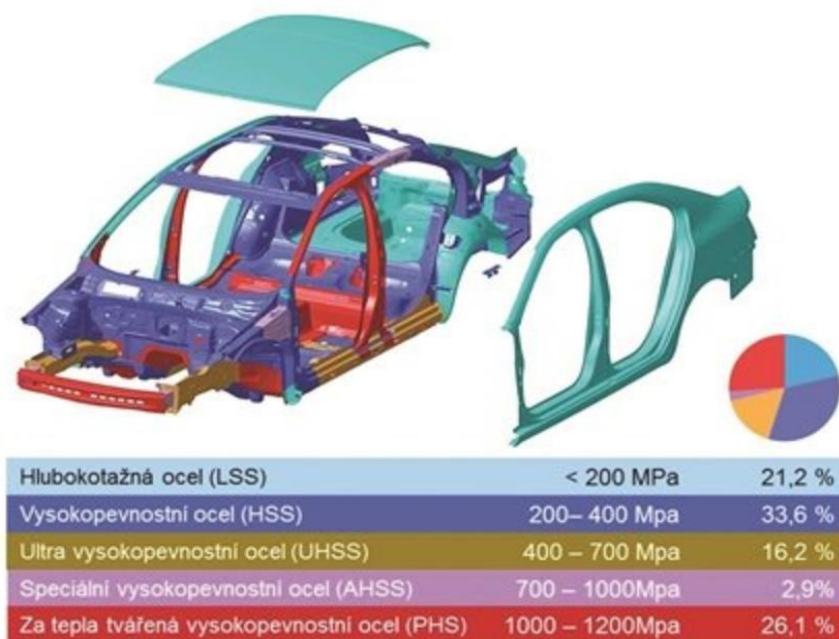
4.1 Oceli pro automobilový průmysl

Oceli pro automobilový průmysl můžeme rozdělit na 4 základní skupiny [15], [16], [17].

Tab. 7 Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl:

Skupina	Druh oceli
Měkké oceli (Mild steels)	<ul style="list-style-type: none">• Ocel běžné kvality (Commercial steel, CS)• Tažná ocel (Drawing/Forming steel, DS/FS)• Hlubokotažná ocel (Deep drawing steel, DDS)• Zvlášť hlubokotažná ocel (Extra-deep drawing steel, EDDS)• Zvlášť hlubokotažná ocel plus (Extra-deep drawing steel Plus, EDDS+)

<p>Vysokopevnostní oceli (High-strength steels, HSS)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Oceli vysokopevnostní bez intersticiálních prvků (Interstitial-free high-strength steel, IF-HS) • Bake-hardening oceli (Bake-hardening steels, BH) • Vysokopevnostní nízkolegované oceli (High-strength low-alloy steels, HSLA)
<p>Oceli velmi vysokých pevností (Very-high-strength steels, VHSS)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Oceli s plasticitou vyvolanou transformací (Transformation-induced plasticity steels, TRIP) • Dvoufázové oceli (Dual-phase steels, DP) • Vícefázové oceli (Complex-phase steels, CP) • Feriticko-bainitické oceli (Ferritic-bainitic steels, FB)
<p>Ultravysokopevnostní oceli (Ultra-high-strength steels, UHSS)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Martenzitické oceli (Martensitic steel, MART) • Pokročilé vysokopevnostní borové oceli (Advanced High-Strength Steels, AHSS)



Obr. 27 Materiálový koncept karoserie modelu ŠKODA Octavia [15]

4.2 Slitiny hliníku pro automobilový průmysl

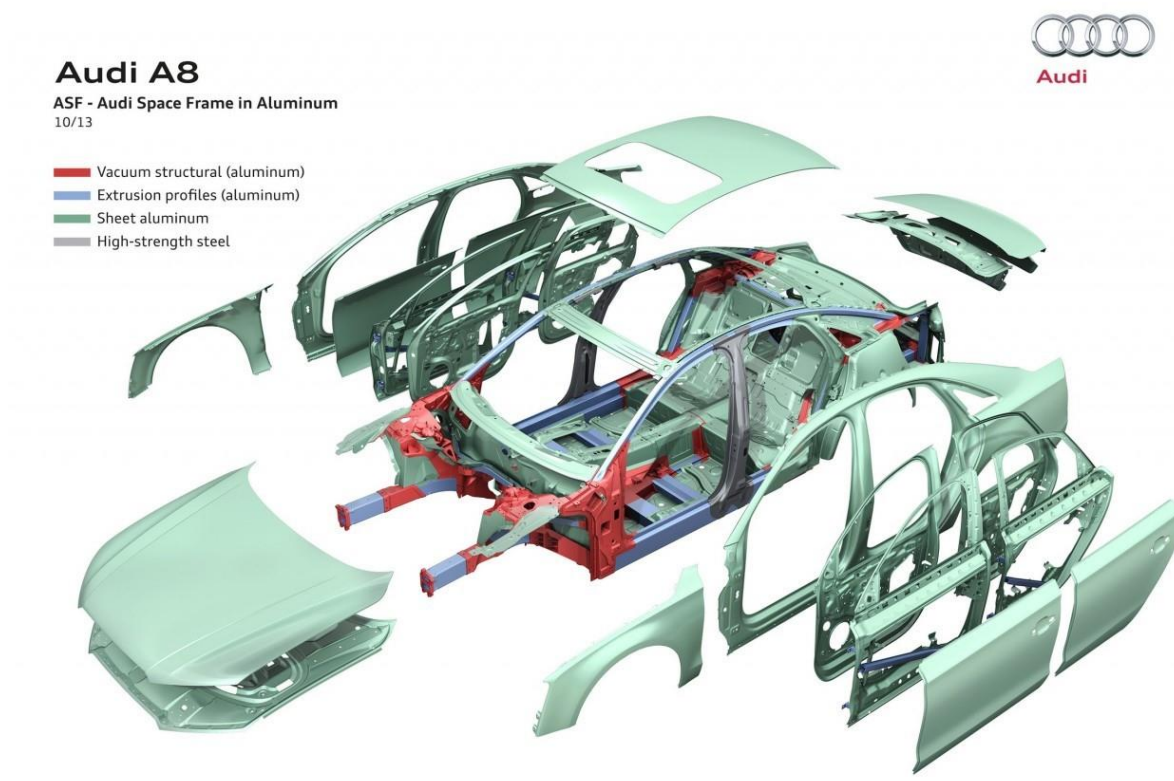
Snižování spotřeby paliva žádá stále lehčí konstrukce. Úspora 100 kg hmotnosti sníží spotřebu paliva o 0,31 l a o 7,2 g emisí CO₂ na 100 km. Proto slitiny hliníku často nahrazují oceli při stavbě karoserie.

Tab. 8 Rozdělení slitin hliníku pro automobilový průmysl [18]:

Mezinárodní označení podle ČSN EN 573	Specifické vlastnosti materiálu
EN AW-2014	zvýšené pevnostní vlastnosti
EN AW-2618A	zvýšené vlastnosti tepelné odolnosti
EN AW-5754	dobré anodizační vlastnosti, dobrá svařitelnost
EN AW-6401	odolná vůči korozi, elektro-chemicky lze upravit do lesku a anodizovat, pro nejvyšší dekorativní nároky
EN AW-6060/6063	výborné vlastnosti tváření, svařitelná, odolná vůči korozi, elektro-chemicky lze upravit do lesku a anodizovat, pro nejvyšší dekorativní nároky
EN AW-6061	dobrá statická a dynamická odolnost vůči zátěži, i pro dekorativní nároky při zvýšené pevnosti
EN AW-6082	dobrá statická a dynamická odolnost vůči zátěži, dobrá odolnost vůči korozi, vhodná pro třískové obrábění
EN AW-6110A	zvýšené pevnostní vlastnosti, vhodná pro třískové obrábění, zvýšená statická a dynamická odolnost vůči zátěži
EN AW 6066	zvýšené pevnostní vlastnosti, vhodná pro třískové obrábění, zvýšená statická a dynamická odolnost vůči zátěži
EN AW-7020	dobrá svařitelnost

EN AW 7018	zvýšené pevnostní vlastnosti, dobrá svařitelnost
EN AW-7075	extrémně vysoké pevnostní vlastnosti / nejvyšší odolnost proti korozi trhlin z napětí

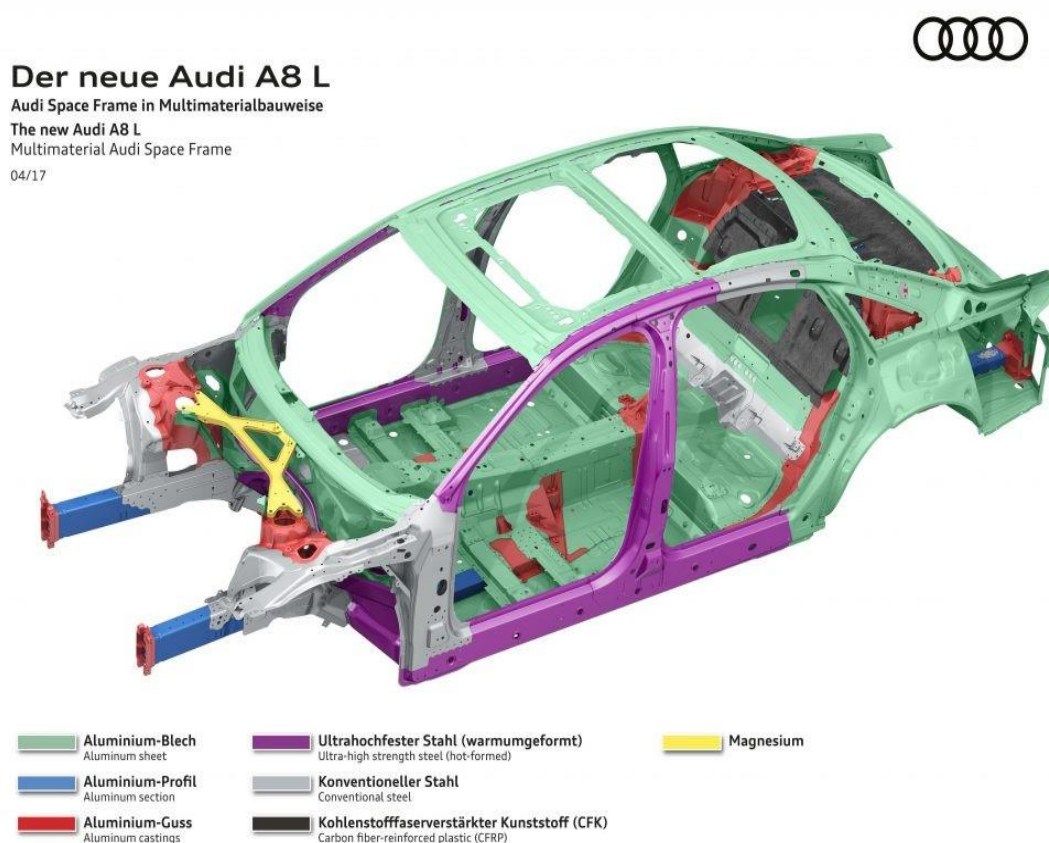
Na obr. 28 je ukázka výrazného použití materiálu ze slitin hliníku při konstrukci karoserie vozu Audi A8 z roku 2013.



Obr. 28 Konstrukce karoserie Audi A8, 2013 [19]

4.3 Trendy v použití materiálů pro automobilový průmysl

V šedesátých letech XX. století většina dílů karoserie vozu byla vyrobena z oceli. Pak výrobci automobilů začali vyměňovat těžké díly z oceli za lehčí díly ze slitin hliníku. Na začátku roku 2010 se myslelo, že budoucnost v automobilovém průmyslu patří automobilům stavěným pouze pomocí nejmodernějších řešení ze slitin hliníku. Ale pak se ukázalo, že lehký materiál neznamená bezpečný a v dnešní době řada automobile realizuje návrat dílů karoserie z pokročilých vysokopevnostních ocelí (AHSS) a ultravysokopevnostní ocelí (UHSS), které jsou zároveň velice tenké, lehké a pevné. Tuto tendenci můžeme pozorovat v koncepci karoserie Audi A8 z roku 2017. Na rozdíl od koncepce z roku 2013 (obr. 28), bezpečnostní díly chránící řidiče v případě dopravní nehody jsou převážně vyrobené z ultravysokopevnostních ocelí (UHSS), označených na obr. 29 fialovou barvou, které ještě před 4 lety byly vyrobené z hliníkových profilů, označených na obr. 28 modrou barvou.



Obr. 29 Konstrukce karoserie Audi A8 L, 2017 [20]

V tab. 9 výrobce Audi A8 uvádí změnu použití různých materiálů v konstrukci karoserie vozu za posledních 10 let.

Tab. 9 Procentuální změna použití oceli a hliníku v konstrukci karoserie Audi A8 [21]:

	Old A8 D ₄ (2009)	New A8 D ₅	Change
Steel	8%	40.5% (17% PHS)	+32.5%
Aluminium	92%	58%	-34.0%
Other materials	-	1.5%	+1.5%

Moderní a "čerstvou" ukázkou narůstajícího použití vysokopevnostních plechů z oceli a výrazně menšího použití hliníkových plechů v automobilovém průmyslu slouží model **Volvo XC40** (obr.30), který byl jmenován Evropským autem roku 2018 na autosalonu v Ženevě. Auto využívá pokročilé oceli s vysokou pevností (AHSS), legované bórem, což je dnes nejpevnější automobilová ocel.



Obr. 30 Konstrukce karoserie Volvo XC40, 2018 [22]

Bezpečnostní karoserie XC40 se spoléhá na AHSS, které poskytují maximální bezpečnost cestujících u všech typů nehod. Bórové oceli představuje až 20 procent celkové hmotnosti karoserie vozu. Použití vysoce bórové oceli s vysokou pevností v modelu XC40 je součástí celkového závazku společnosti Volvo k bezpečnosti. To je nastíněno v prohlášení společnosti Vision 2020, že od roku 2020 by nikdo neměl být v novém automobilu Volvo zabit nebo vážně zraněn. [22]

5 Experimentální část

5.1 Vlastnosti použitého materiálu

Pro experiment byla použita hlubokotažná ocel **DC05+ZE** (EN 10152) elektrolyticky povlakovaná Zn s celkovou tloušťkou $h = 0,7$ mm a tloušťkou zinkového povlaku $4,5 \mu\text{m}$. Chemické složení a mechanické vlastnosti této oceli jsou uvedeny v Tab. 10 a 11.

Tab. 10 Chemické složení oceli DC05+ZE [46]:

	min. [%]	max. [%]
C (uhlík)	-	0,06
P (fosfor)	-	0,025
S (síra)	-	0,025
Mn (mangan)	-	0,35

Tab. 11 Mechanické vlastnosti oceli DC05+ZE [47]:

	Hodnota
Mez kluzu R_e max. [MPa]	200
Mez pevnosti - R_m min./max. [MPa]	270-330
Tažnost - A_{80} min. [%]	39

Obecné použití: mnohostranný materiál využívaný především pro svoji korozní odolnost na výrobu dílů strojů, průmyslových zařízení, karosérií, krytin střech, v domácnostech na výrobu praček ledniček a jiných spotřebičů. Je snadno tvarovatelný a přitom pevný. Vzhledem k velmi tenké vrstvě zinku se díly z tohoto plechu dále povrchově upravují lakováním. Elektrolyticky pozinkovaná ocel zajišťuje vysokou chemickou čistotu povlakové vrstvy a rovnoměrnou kontrolovatelnou tloušťku povlaku. [47]

5.2 Vlastnosti elektrodové čepičky

V průběhu experimentu byly používány kované elektrodové čepičky pro odporové bodové svařování typ **39D 1978-2** s průměrem upínací části $\varnothing 16$ mm a s průměrem styčné plochy 5 mm, z materiálu A2/2 - CuCr1Zr, viz obr. 31.



Obr. 31 Výkres elektrodové čepičky typ 39D 1978-2, $\varnothing 5$ mm [48]

Tab. 12 Chemické složení elektrodové čepičky typ 39D 1978-1 [48]:

	Hodnota [%]
Cu (měď)	98,98
Cr (chrom)	0,9
Zr (zirkonium)	0,12

5.3 Svařovací zařízení

Pro provedení experimentu a vytváření svarových spojů byl použit svařovací odporový svařovací lis DALEX PMS 11-4 se středofrekvenční řídicí jednotkou SER Mega 2 MF, umístěný v laboratoři výuky svářečské technologií na ČVUT v Praze (obr. 32).



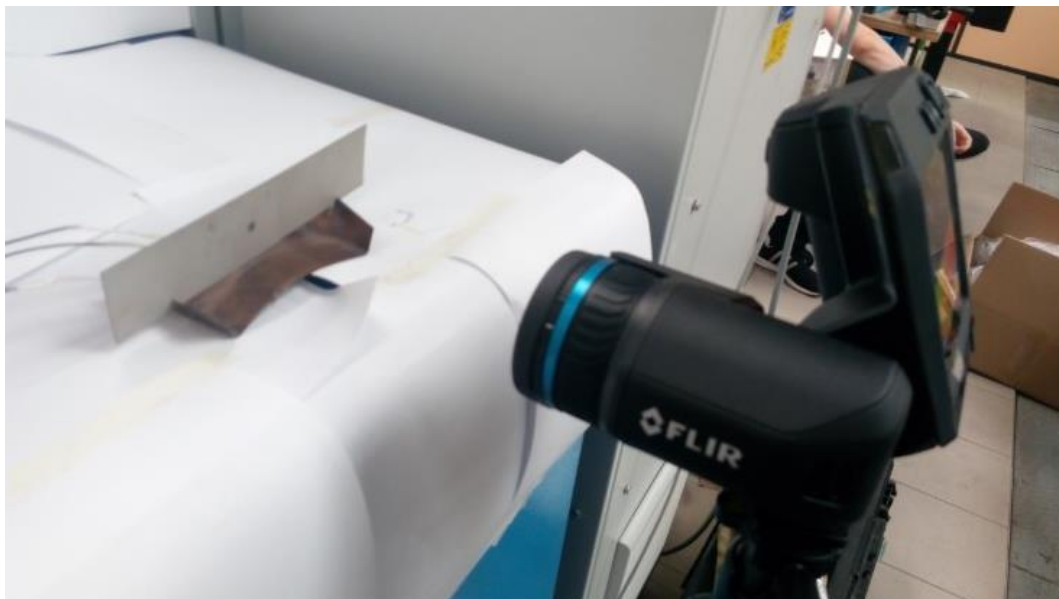
Obr. 32 Svařovací lis DALEX PMS 11-4 [37]

Tab. 12 Technické údaje svařovacího lisu DALEX PMS 11-4 [37]:

Svařovací poloha	Vertikální
Maximální svařovací výkon [kVA]	246
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 [daN]	20 - 600
Délka výložníku ramen [mm]	550
Šířka / hloubka / výška [mm]	780/1253/1636
Hmotnost (stroj / řídicí skříň) [kg]	485/65

5.4 Termokamera

Proces experimentu byl monitorován termokamerou **FLIR T540**, viz. obr. 33.



Obr. 33 Termokamera FLIR T540

Tab. 13 Technické parametry termokamery FLIR T540 [49], [50]:

Parametr	Hodnota
Rozlišení	464 x 348 pixelů
Rozlišení s funkcí UltraMax	645,888 pixelů
Teplotní rozsahy	-20 až 120°C 0 až 650°C 300 až 1500°C
Zoom (digitální)	1-6x kontinuální
Typ detektoru	Nechlazený mikrobolometr
Teplotní citlivost/NETD	<30mK @30°C
Spektrální rozsah	7.5 až 14.0μm
Obrazová frekvence	30Hz
Accuracy	±2°C nebo ±2% z naměřené hodnoty
Záznamové médium	Vyměnitelná SD karta
Formát obrazových dat	radiometrické .jpg snímky

6 Provedení experimentu

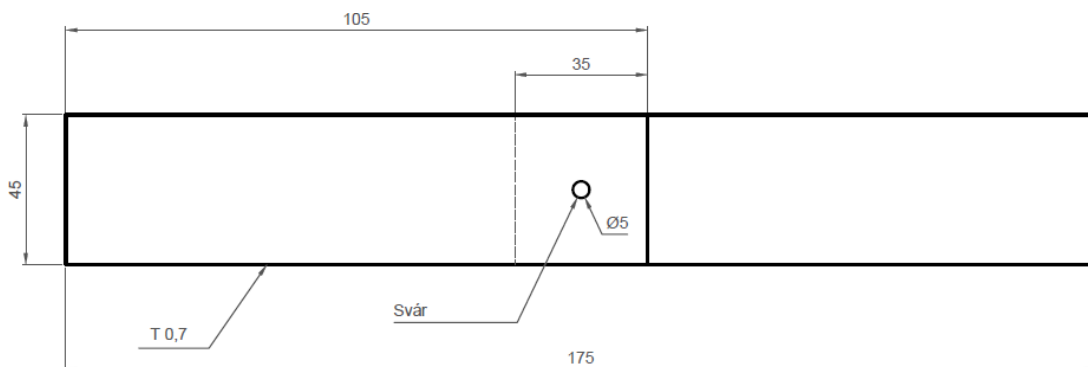
6.1 Optimalizace svařovacích parametrů

Nejdřív byla provedena optimalizace svařovacích parametrů lisu DALEX PMS 11-4 pro odporové bodové svařování podle normy ČSN EN ISO 14 373 na experimentálním materiálu (DC05+ZE). Přičemž minimální průměr svaru by měl být 2,9 mm (vychází ze vztahu $d = \sqrt{3,5 \cdot t}$, kde t = tloušťka plechu) a tvar svaru (svarové čočky) by měl být co nejvíce symetrický. Otisky elektrod mají být mělké a pravidelné, nesmí být větší než 20 % tloušťky plechu. Průvary svarové čočky do každého plechů musí být v rozmezí mezi 20 a 80 % tloušťky plechu.

Doba svařování a elektrodová síla byly přednastavené: $t = 200 \text{ ms}$, $F = 2,0 \text{ kN}$. Následně byl svařovací proud postupně volen tak, aby došlo k vytvoření vyhovujících i nevyhovujících svarových spojů. Celkem bylo vyhotoveno 42 svarů (21 učících a 21 dobrých) pro 6 různých nastavených parametrů svařovacího proudu. Použité svařovací parametry jednotlivých vzorků jsou uvedeny v příloze 1.

Pomocí destruktivní kontroly odlupovací metodou a zároveň pomocí vizuální kontroly byly změřeny průměry svarových čoček a bylo zkontrolováno zda byl vytvořen vyhovující spoj podle normy ČSN EN ISO 14 373. Nej kvalitnější svarový spoj byl docílen při svařovacím proudu $I = 6,5 \text{ kA}$, svarové čočky byly skoro symetrické, došlo k průvarů a zároveň nedošlo k rozstříku materiálů dílů.

Po optimalizaci svařovacích parametrů byl svařen vzorek o rozměrech 45 x 175 mm pro následující termografické měření (obr. 34), kdy byla zjišťována závislost emissivity na teplotě pro základní material, svarový spoj a tepelně ovlivněnou oblast svaru (TOO).



Obr. 34 Výkres zkušební vzorku

Následně byla vyrobena sada opotřeбенých elektrodových čepiček, s definovaným opotřeбенím. Každou dvojicí čepiček (horní a dolní elektroda) byl vytvořen různý počet svarů, opakujícími se parametry (které byly zvoleny podle předchozí optimalizace). Zvolené počty svarů pro opotřeбенí byly: **10, 25, 50, 75, 100, 150, 200** (obr. 35).

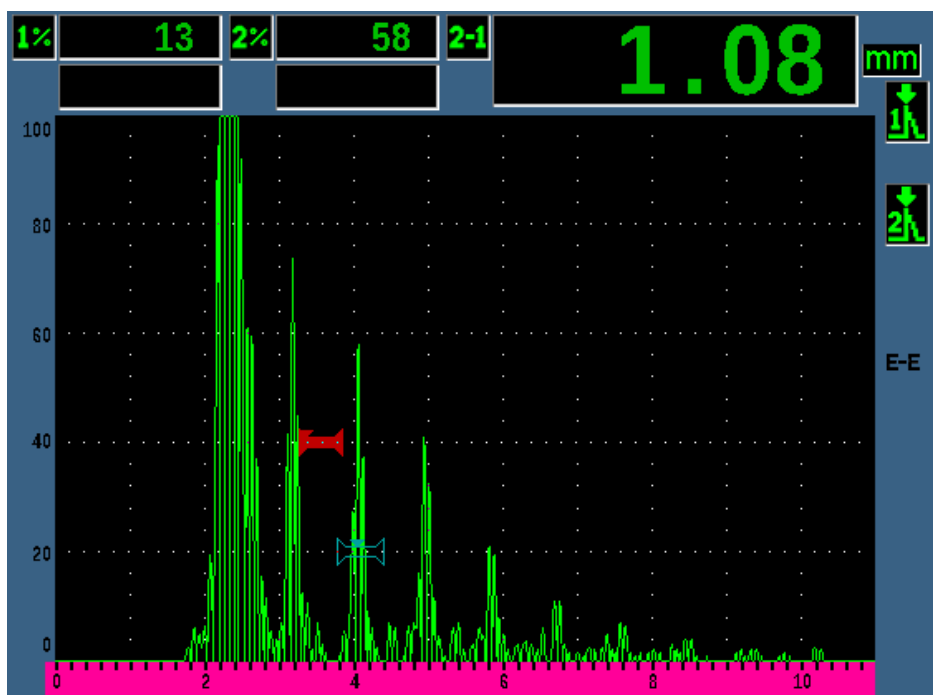
Důležité je, že různé výrobce v průmyslové praxi, definují určité množství svarů, po kterých by měla být geometrie stykové plochy elektrodové čepičky znovu upravena (obvykle frézováním), např. v běžné výrobě Škoda Auto se preventivně frézují opotřeбенé elektrodové čepičky po vytvoření 150 svarů.



Obr. 35 Vyrobené opotřeбенé elektrodové čepičky

6.2 Kontrola kvality spoje DC05

Výsledná kvalita spoje byla zkontrolována pomocí ultrazvuku na přítomnost vnitřních či strukturních vad. Pro UT byl použit ultrazvukový přístroj od firmy Olympus řady Epoch 650 se sondou V2450 na bodové svary s vodní předsádkou o frekvenci 20 MHz, průměr měniče 4 mm. Echogram vzorku vykazoval lineárně klesající tendenci koncových ech s dostatečným počtem ech, které reprezentují vyhovující svarový spoj, viz. obr. 36.



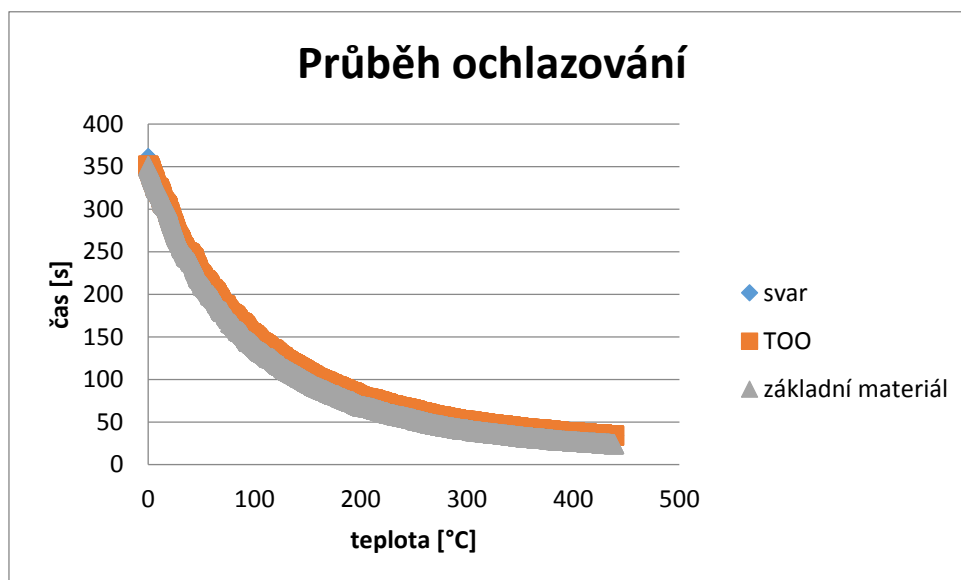
Obr. 36 Vyhovující echogram vzorku DC05

6.3 Návrh postupu měření emisivity

- 1) Připojení **termočlánků** typu **K** pomocí kondenzátorového svařovacího zdroje na odporový bodový svar, TOO a základní materiál vzorku a zapojení k měřicí stanici **Ahlborn Almemo 5690**. Umístění termočlánků musí být z druhé strany plechu, než bude snímaná plocha termokamerou.
- 2) Nastavení tepelného cyklu pece **LAC typu LE** – ohřev na 350°C, výdrž na teplotě.
- 3) Nastavení termokamery do stabilní polohy, tak aby v zorném poli termokamery nebyly další ohřáté předměty či zdroje teploty.
- 4) Nastavení teplotního rozsahu termokamery od 0°C do 650°C a nastavení emisivity měření na hodnotu „1“.
- 5) Synchronizace času termokamery a měřicí stanice, aby následně bylo možné porovnat hodnoty ve stejném čase.
- 6) Měření odražené teploty na připravené pozici pomocí přípravku z alobalu na papírové desce.
- 7) Ohřev vzorku na cca 400°C v peci (měření bude zahájeno po vyjmutí z pece při klesnutí na teplotu 350°C).
- 8) Vyjmutí ohřátého vzorku z pece a umístění na připravené místo před termokamerou ve vzdálenosti cca 0,4m.
- 9) Provedení měření – pořizování jednotlivých termografických snímků souběžně s načítáním teploty plechů pomocí termočlánků na měřicí stanice do doby až zkoušený vzorek bude ochlazen na cca teplotu okolí.
- 10) Opakování měření.
- 11) Vyhodnocení naměřených dat:
 - změřit odraženou teplotu a přenastavit ve vyhodnocovacím SW **FLIR Tools**;
 - poté pro jednotlivé termografické snímky nalézt teplotu naměřenou termočlánky ve stejném čase, kdy byl zachycen termografický snímek;
 - v SW postupnými iteracemi měnit hodnotu emisivity, dokud zobrazovaná velikost teploty nesouhlasí s hodnotou zjištěnou termočlánky.
 - zaznamenání nalezené hodnoty emisivity k naměřené teplotě a sestavení grafické závislosti změny emissivity na teplotě.

6.4 Měření emisivity vzorku DC05

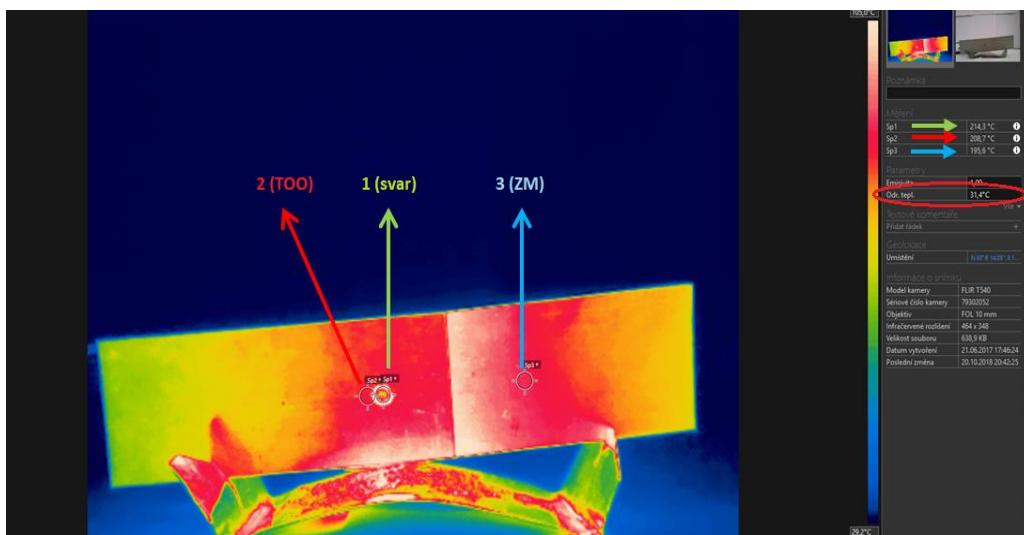
Na obr. 37 je vidět postupné ochlazování vzorku po ohřátí na počáteční měřenou teplotu (350°C), kde nebyly zaznamenány významné odchylky v rychlosti ochlazování ve všech 3 sledovaných oblastech.



Obr. 37 Průběh ochlazování vzorku změřený pomocí termočlánků připojených v jednotlivých sledovaných oblastech

Před vyhodnocením bylo nutné zjistit vliv radiačních procesů okolí, které ovlivňují výslednou hodnotu teploty a emisivity. Provádí se nasnímáním desky s vrstvou hliníkové folie, která má vysokou odrazivost. Při teplotě okolí 23°C, byla zjištěna odražená teplota 29,7°C která musí být vždy zohledněna u dalšího vyhodnocování teplot a emisivit.

Na obr. 38 je termogram zobrazen v SW FLIR Tools. Je zde ukázán princip měření emisivity, kdy se nejprve změní hodnota odraženého tepla na změřenou hodnotu 29,7 °C. Dále se označí měřená místa a mění se hodnota emisivity z nastavené $\varepsilon = 1$ postupným přiblížením tak dlouho dokud se teplota nerovná teplotě změřené pomocí termočlánků. Což je výsledná správná hodnota emisivity vzorku.

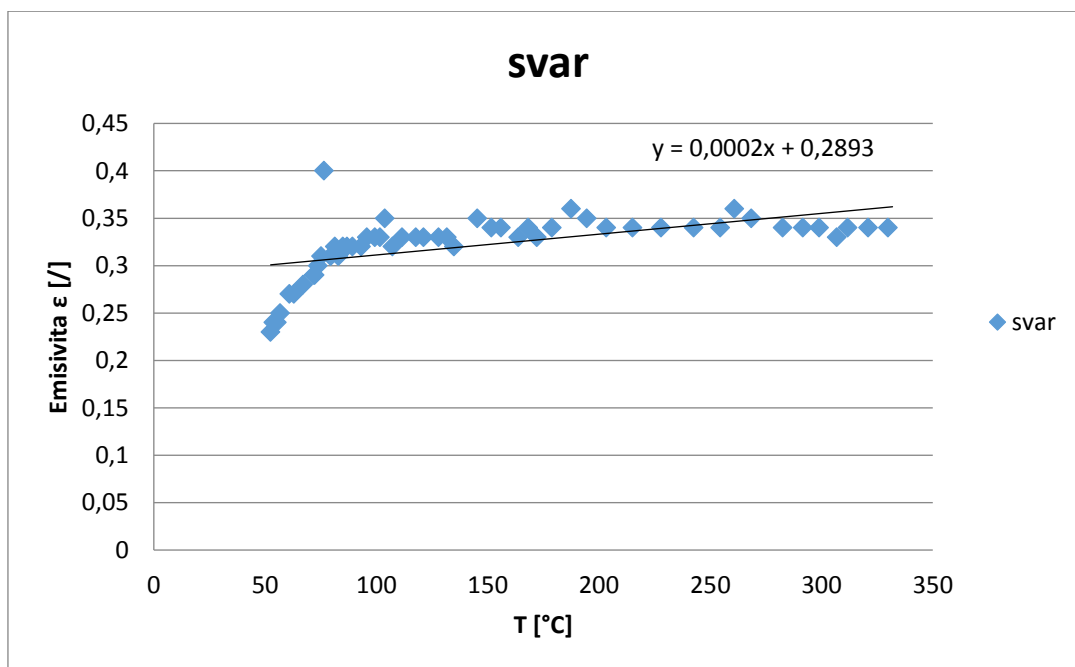


Obr. 38 Princip určování emisivity vzorku ve SW FLIR Tools

V příloze 2 jsou uvedeny časy snímání vzorku termokamerou s naměřenými teplotami termočlánky a emisivita určená v SW FLIR Tools.

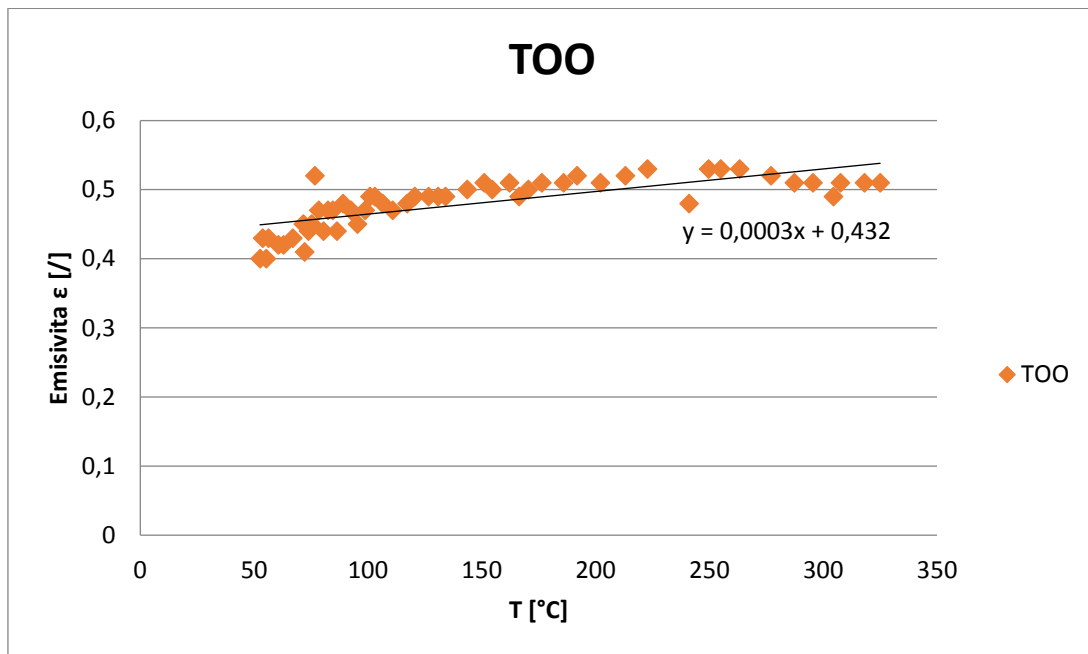
Po změření všech dat a zjištění hodnot emisivit z termogramů byly vytvořeny grafy zobrazené na obr. 39 - 42, které znázorňují závislost emisivity na teplotě.

Na obr. 39 je vidět že průměrná hodnota emisivity měřená přímo na svarové čočce se snižující se teplotou se snižuje z 0,36 na 0,25 (podle matematického vztahu $y = 0,0002x + 0,2893$). Odchytky mohou být způsobeny především otlakem od elektrody a tím způsobenou rozdílnou rychlostí chladnutí.



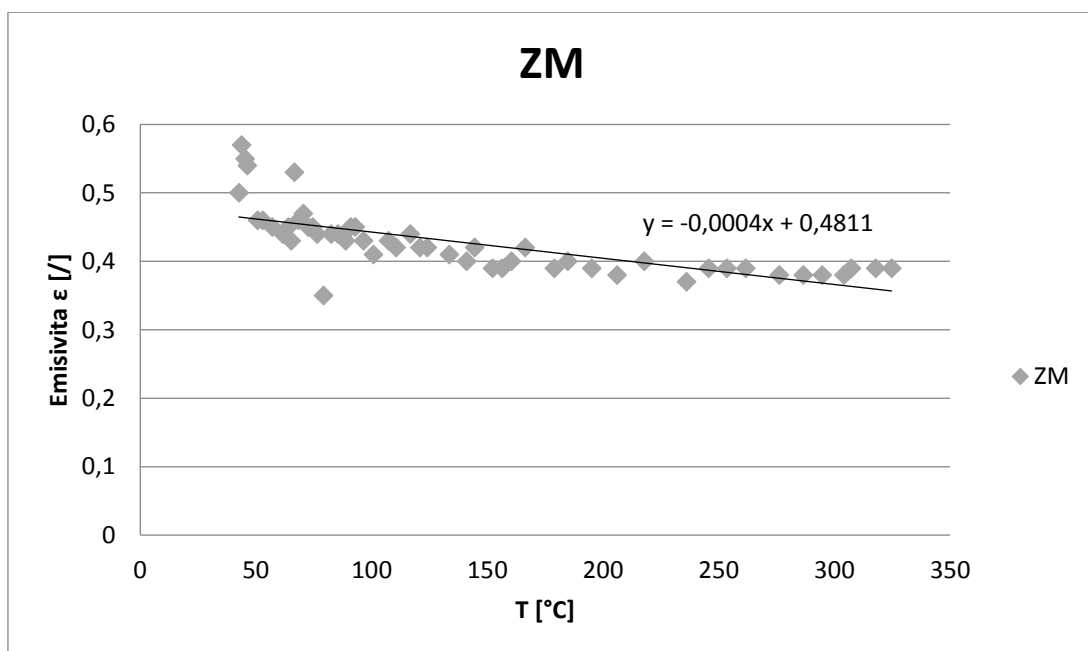
Obr. 39 Závislost emisivity na teplotě v místě svarové čočky

Na obr. 40 je zobrazena emisivita TOO, která se snižující se teplotou se snižuje od průměrné hodnoty 0,53 do hodnoty 0,45 (podle vztahu $y = -0,0003x + 0,432$). TOO není u bodových svarů dobře viditelná, proto byla určena oblast měření 3 mm od okraje svarové čočky.

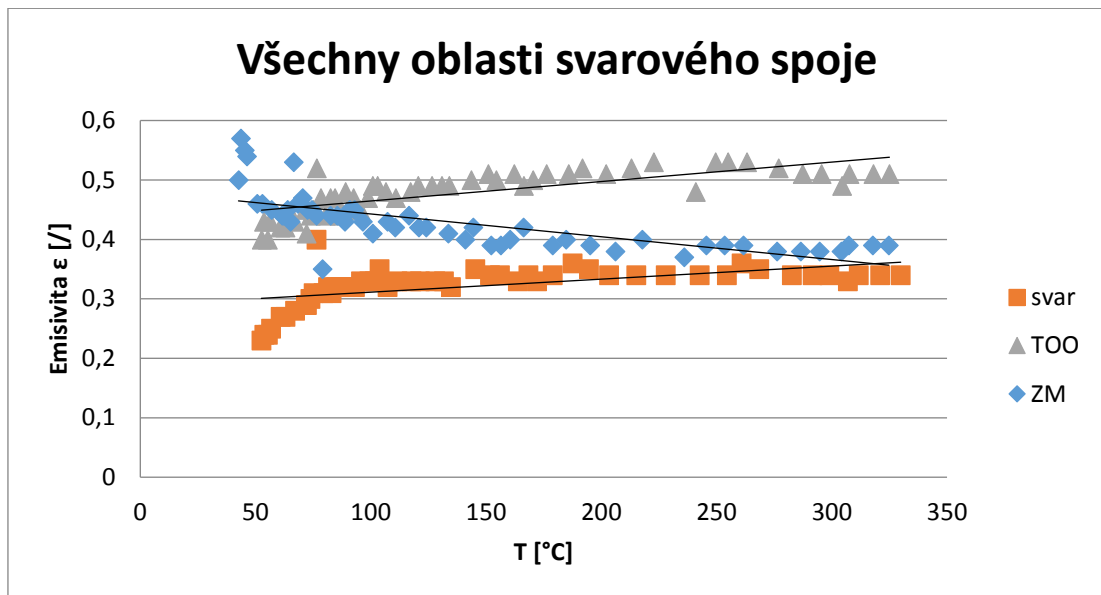


Obr. 40 Závislost emisivity na teplotě v místě TOO

Na obr. 41 je vidět že emisivita základního tepelně neovlivněného materiálu se snižující se teplotou se zvyšuje od průměrné hodnoty 0,35 do hodnoty 0,54. Emisivita se měnila podle matematického vztahu $y = -0,0004x + 0,4811$.



Obr. 41 Závislost emisivity na teplotě v místě základního materiálu

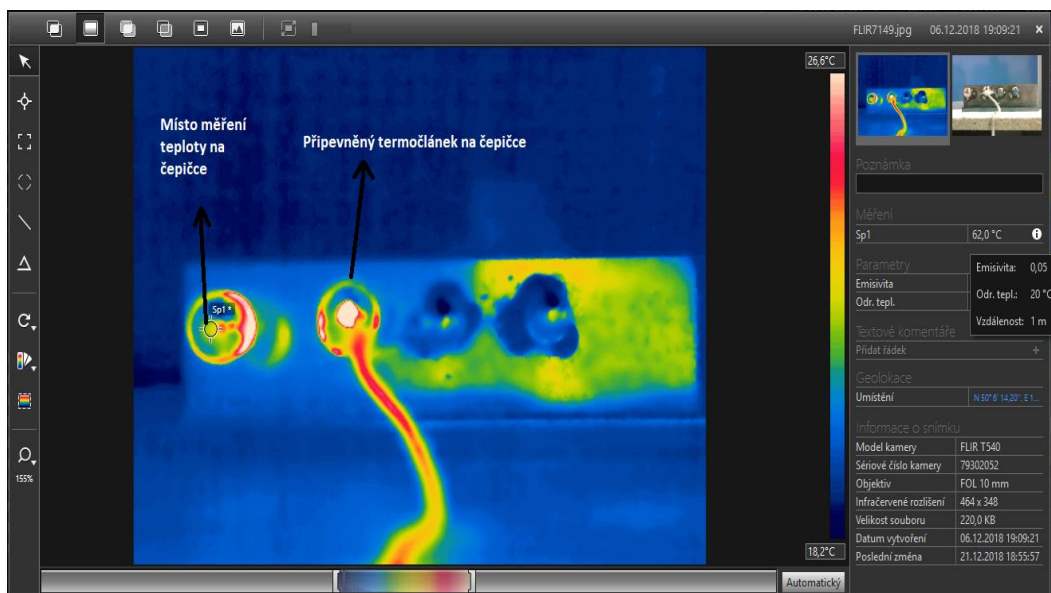


Obr. 42 Závislost emisivity na teplotě, porovnání všech 3 oblastí na vzorku

6.5 Měření emisivity neopotřebené svarové čepičky

Postup měření emisivity na svarové čepičce byl podobný jako u plechu DC05. Na přípravek byly umístěny 2 čepičky, na jedné byl upevněn termočlánek typu K, druhá byla bez termočlátku, aby na ní bylo možné v SW FLIR Tools měřit teplotu a stanovit hodnotu emisivity. Reálná teplota ohřevu a ochlazování byla monitorována měřicí stanicí Ahlborn Almemo 5690. Čepičky byly ohřáté v peci LAC typu LE na 80°C a ochlazované na 50°C.

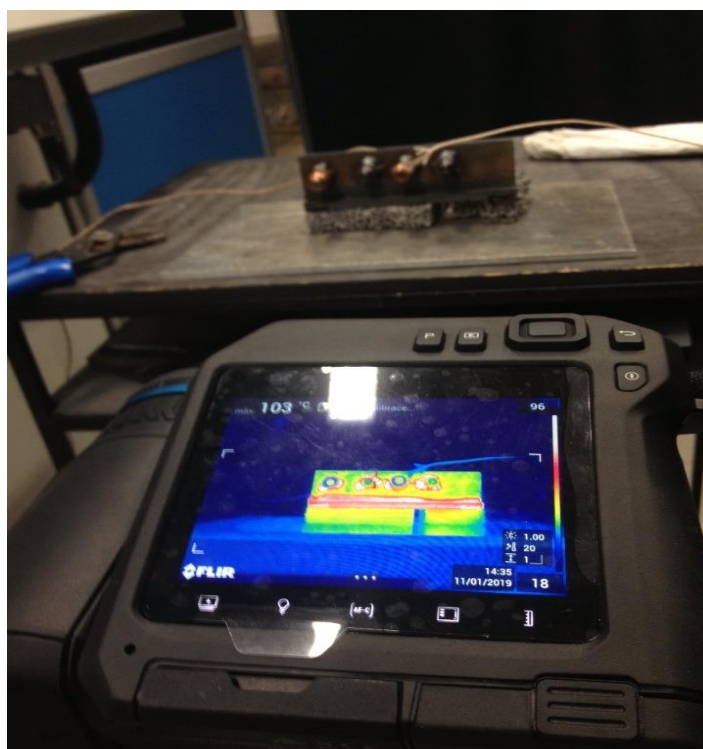
Změnou emisivity v SW Flir tools byla zjištěna emisivita čepiček (tzn. materiálu CuCrZr) $\varepsilon = 0,05$.



Obr. 43 Princip měření emisivity na čepičce

6.6 Měření emisivity opotřebených svarových čepiček

Postup měření emisivity pro opotřebené čepičky je podobný jako pro neopotřebené. Rozdíl spočívá v tom, že pouze ocelový přípravek byl ohřát v peci LAC typu LE na teplotu od **150°C do 200°C**. A po vyjmutí přípravku z pece, byly na přípravek hned umístěny 2 čepičky, na jedné byl upevněn termočlánek typu K, druhá byla bez termočláneků. Čepičky byly ohřívány přestupem tepla z přípravku do té doby, až hodnota teploty čepičky podle měřicí stanice Ahlborn Almemo 5690 nezačala klesat. Proces ohřevu čepiček probíhal od cca 30°C do cca 85°C (obr. 44). Při teplotě okolí 18°C, byla zjištěna odražená teplota 20°C. Tento postup se osvědčil lépe, než přímý ohřev čepiček z měděné slitiny (měď je při vyšších teplotách velmi náchylná na oxidaci, která velkou měrou ovlivňuje povrchové vlastnosti čepičky).



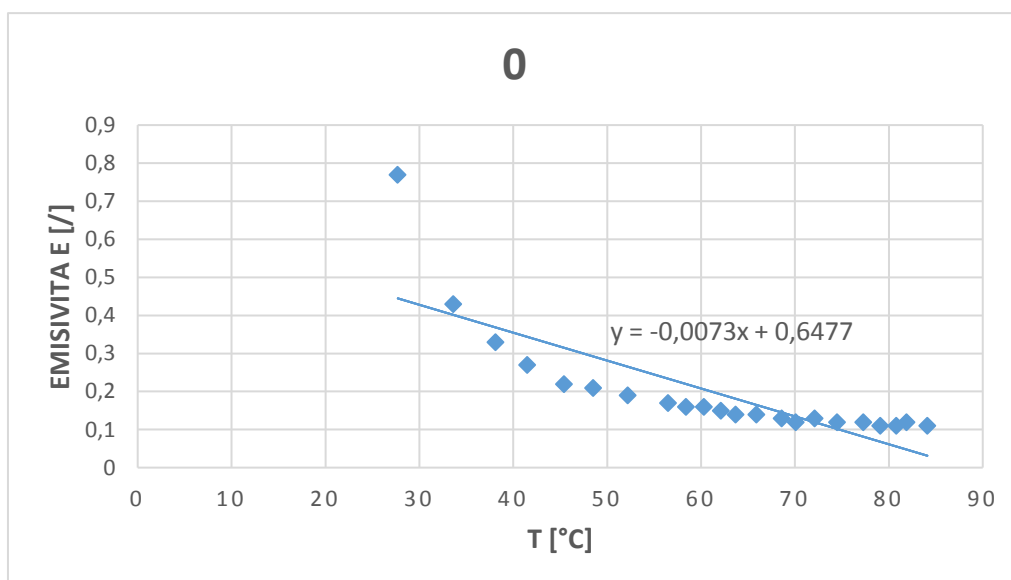
Obr. 44 Průběh termografického hodnocení pro opotřebené čepičky

Pak změnou emisivity v SW FLIR Tools byla zjištěna závislost emisivity čepiček na opotřebení a teplotě.

V přílohách 3 až 9 jsou uvedeny časy snímání různě opotřebených čepiček termokamerou s naměřenými teplotami termočláneků a emisivitou vyhodnocenou v SW FLIR Tools.

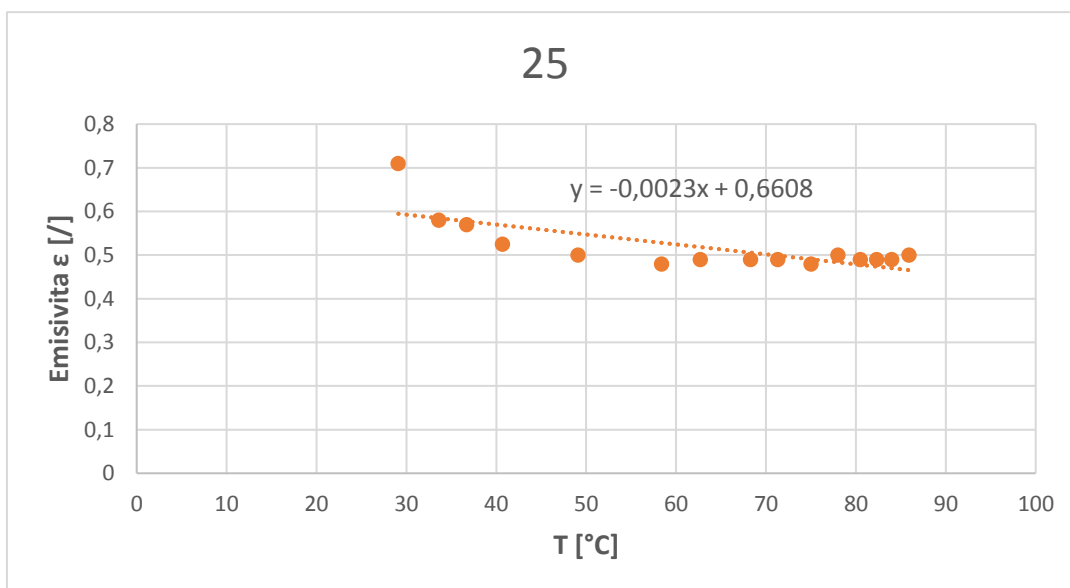
U všech zkušebních čepiček byla neměřena příliš vysoká emisivita za okolní teploty. Jeden z důvodů daného chování je, že na začátku měření materiál ještě nedokázal rovnoměrně a důkladně prohřát a termokamera ještě není schopná identifikovat dobře viditelný kontrast vůči okolní teplotě (pro správné měření by rozdíl teplot měl být min 20°C, tedy při teplotě okolí 18°C jsou relevantní hodnoty emissivity od cca 38°C).

Na obr. 45 je vidět že emisivita neopotřeбенé čepičky se zvyšující se teplotou se zmenšuje od průměrné hodnoty 0,17 až do hodnoty 0,11. Emisivita se měnila podle matematického vztahu $y = -0,0073x + 0,6477$. Na rozdíl od emisivity, změřené dřív jiným způsobem, v daném případě můžeme pozorovat větší hodnoty $\varepsilon = 0,12$.



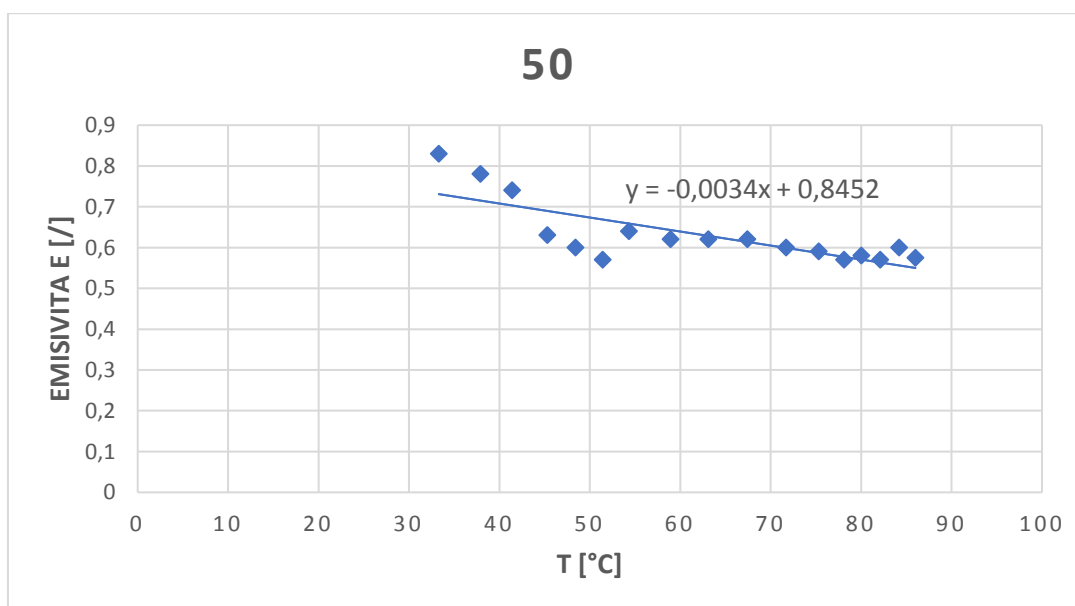
Obr. 45 Závislost emisivity materiálu čepičky na teplotě, počet svarů = 0

Na obr. 46 je vidět, že již po prvních 25 svarech, hodnota emisivity materiálu čepičky se zvýšila skoro dvojnásobně a činí cca $\epsilon = 0,5$ (matematický vztah $y = -0,0023x + 0,6608$).

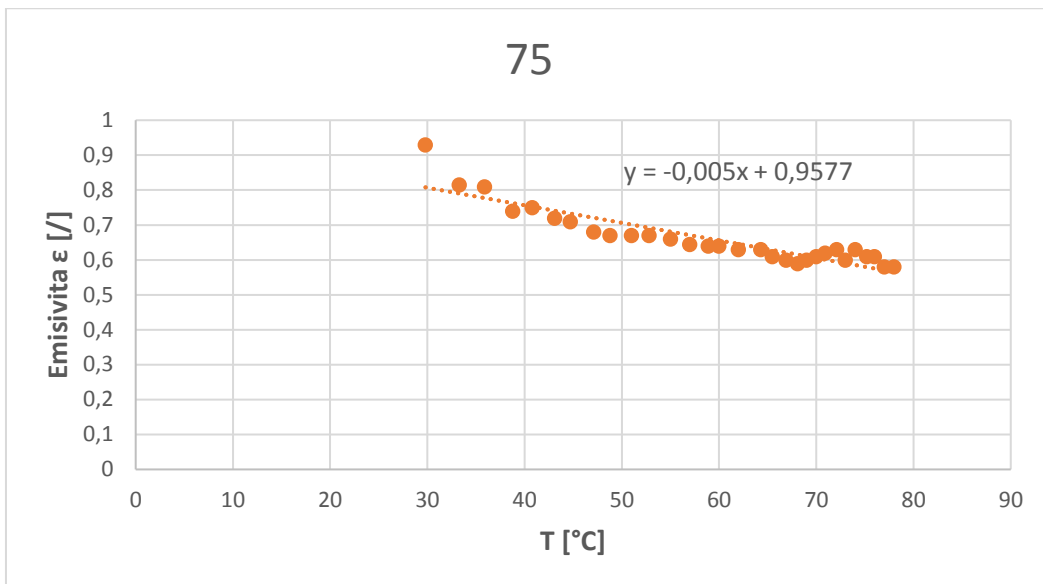


Obr. 46 Závislost emisivity materiálu čepičky na teplotě, počet svarů = 25

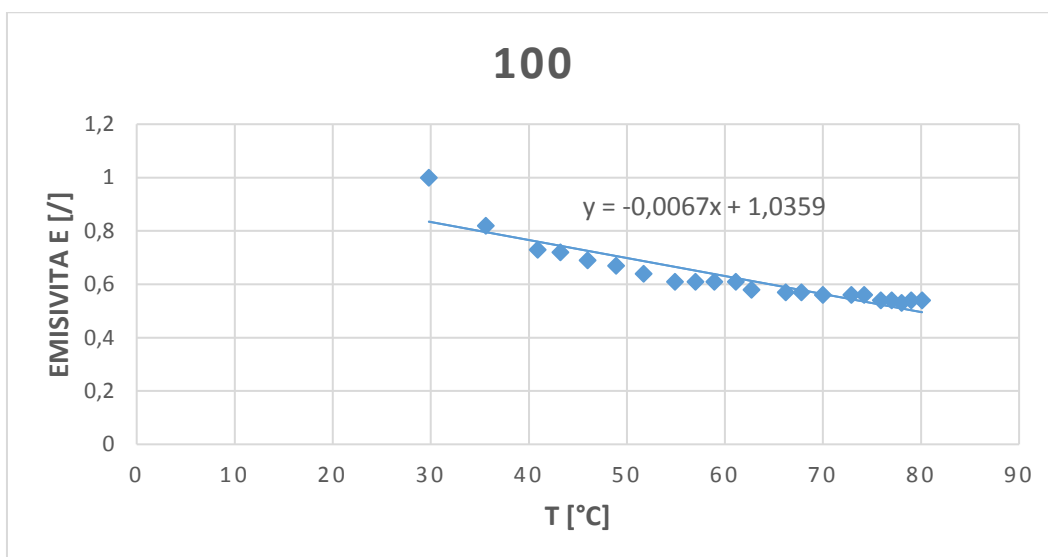
Na obrázcích 47 až 50 můžeme pozorovat stejnou tendenci chování emisivity čepiček. Hodnoty se zvyšující se teplotou mírně klesají až do $\epsilon = 0,58$, pro 50 svarů a $\epsilon = 0,53$, pro 150 svarů.



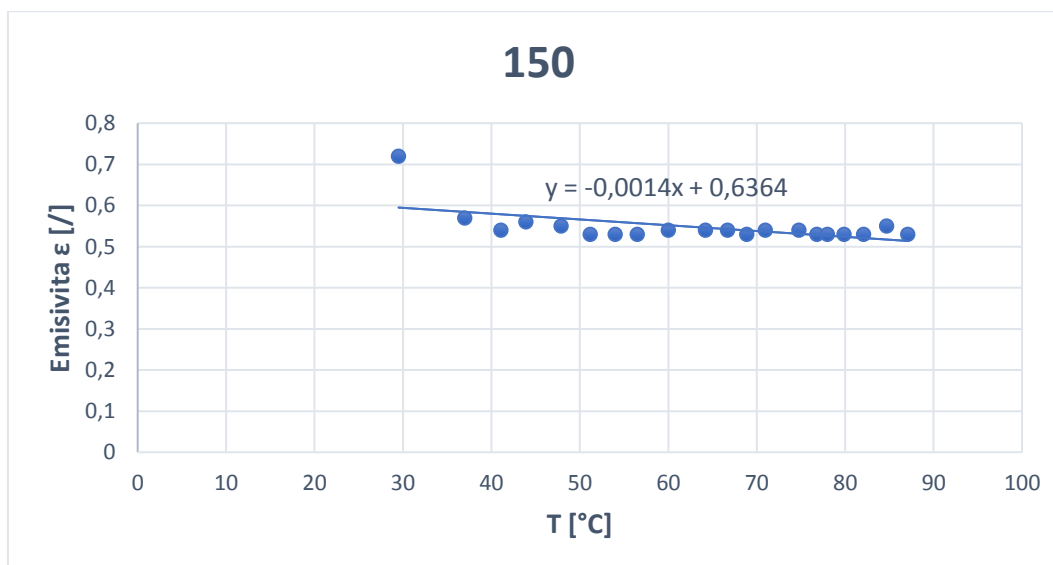
Obr. 47 Závislost emisivity materiálu čepičky na teplotě, počet svarů = 50



Obr. 48 Závislost emisivity materiálu čepičky na teplotě, počet svarů = 75

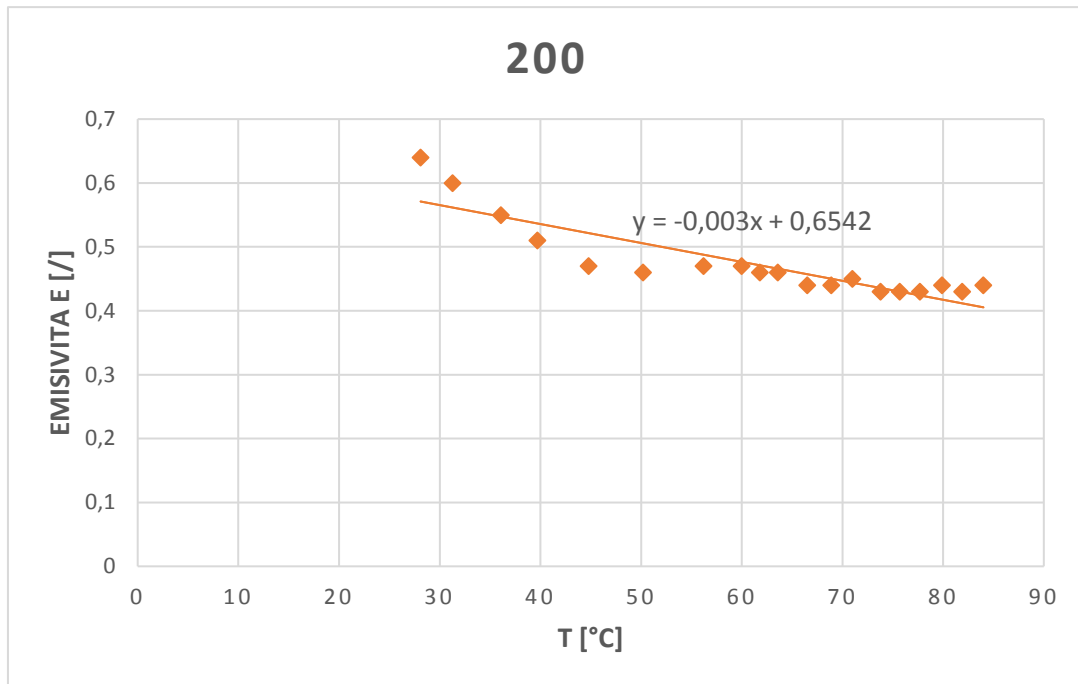


Obr. 49 Závislost emisivity materiálu čepičky na teplotě, počet svarů = 100



Obr. 50 Závislost emisivity materiálu čepičky na teplotě, počet svarů = 150

Ale až po překročení meze 150 svarů, po které např. ve Škodě Auto čepičky se mají frézovat, se projeví rychlejší pokles hodnot emisivity materiálu svařovacích čepiček podle matematického vztahu $y = -0,003x + 0,6542$.



Obr. 51 Závislost emisivity materiálu čepičky na teplotě, počet svarů = 200

7 Závěr

Bylo provedeno měření pro určení emisivity vzorku materiálu DC05 svařeného odporovým bodovým svařováním. Z výsledků vyplývá, že se snižující se teplotou emisivita klesá u svaru a v TOO, u ZM emisivita mírně stoupá. Emisivita svarových čepiček z materiálu CuCrZr byla změřena 0,05.

S opotřebením se emisivita svarových čepiček rychle mění už po několika prvních použitích z hodnoty $\varepsilon = 0,05$ až $0,11$ na $\varepsilon = 0,58$ a zachovává mírný pokles do hodnoty $\varepsilon = 0,53$ pro 150 svarů, ale po překročení této meze se pokles emisivity zrychlí a činí již $\varepsilon = 0,43$ pro 200 svarů.

Tyto výsledky jsou důležité pro další měření, kdy budou hodnoty emisivity přímo zadávány do termokamery a bude možné ihned určit reálnou teplotu i bez použití vyhodnocovacího SW.

8 Seznam použité literatury

- [1] Schinkmann. Odporové svařování, bodové svařování, švové svařování [online]. [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>
- [2] Schinkmann. Odporové bodové svařování. [online]. [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/odporove-bodove-svarovani>
- [3] Теория и технология контактной сварки. Учебное пособие. Р.Ф. Катаев, В.С. Милютин, М.Г. Близник. Екатеринбург, Издательство Уральского университета, 2015.
- [4] ČSN EN ISO 5182: Odporové svařování – Materiály pro elektrody a pomocné vybavení. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [5] Příslušenství odporového svařování (elektrody, čepičky, držáky, kabely) - Ing. Jiří Zmrzlík. [online]. [cit. 2018-11-14]. Dostupné z zmrzlik.cz/pdfzel/katalog_svar.pdf
- [6] Česká svářečka společnost ANB. Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. [online]. [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [7] МОСССклад, станки со склада. Машина контактной сварки E4640 (N4602) [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://mossklad.ru/PRODUCTPAGE/129>
- [8] Рутектор. Клещи для точечной контактной сварки - TECNA 3321. [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <https://rutector.ru/products/kleshi-dlya-tochechnoi-kontaktnoi-svarki-tecna-3321>
- [9] PIRES, J, Altino LOUREIRO a Gunnar BOLMSJÖ. Welding robots: technology, system issues and applications. 1. vyd. London: Springer, 2005, 192 s. ISBN 18-523-3953-5.
- [10] Точечная сварка сопротивлением [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: <http://gredx.ru/articles/tochechnaya-svarka>

[11] ДЕФЕКТЫ И КОНТРОЛЬ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ. [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://helpiks.org/8-12149.html>

[12] Всё о контактной сварке. Непровары при точечной, шовной и рельефной сварке. [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <http://k-svarka.com/content/neprovary-pri-tochiechnoi-shovnoi-i-riel-iefnoi-svarkie>

[13] KOLAŘÍK, Ladislav. Svařování elektrickým odporem, studijní podklady. Praha: ČVUT, Ústav strojírenské technologie.

[14] ZHANG, Hongyan a SENKARA, Jacek. Resistance welding. Londýn: Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-203-61639-1.

[15] Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Škoda Auto. Lucie Forejtová, Ladislav Kolařík, Jan Suchánek, Marie Kolaříková, Tomáš Pilvousek. [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>

[16] High, extra-high and ultra-high-strength quenched and tempered fine-grained structural steels. [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://www.dillinger.de/d/en/products/heavyplate/highstrength-finegrained/index.shtml>

[17] Steel Definitions ULSAB-AVC C-Class body structure Today's AHSS for Automotive. [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions/>

[18] STROJMETAL, aluminium forging. Tabulka slitin. Standardně používané Al slitiny pro zápusťkové výkovky. [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://www.strojmetal.cz/tabulka-slitin>

[19] The New Audi A8 - Not To Be Taken Lightly 2013. [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://blog.swanswaygarages.com/new-audi-a8-not-taken-lightly>

- [20] AUDI PRESENTS A NOVEL MULTI-MATERIAL SPACE FRAME FOR THE NEXT GENERATION OF THE AUDI A8 2017. [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://baxcompany.com/insights/audi-presents-novel-multi-material-space-frame-next-generation-audi-a8/>
- [21] Audi A8: steel makes a comeback. [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: <https://automotive.arcelormittal.com/News/2791/AHSSforAudiA8>
- [22] ArcelorMittal congratulates Volvo on XC40 winning Car of 2018 with AHSS. [online]. [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: https://automotive.arcelormittal.com/News/2018_news/Volvo-XC40-COTY-2018
- [23] AUTOMOTIVE MANUFACTURING: INTELLIGENT RESISTANCE WELDING* Mahmoud El-Banna, Dimitar Filev, and Ratna Babu Chinnam. May 2008.
- [24] NDT. Nedestruktivní zkoušení. Základní kurz. Podklady pro školení BASIC dle ISO 9712, SNT-TC-1A, pro školení IWI-IM dle AIB-41 / EWF-450 / SV-01 a pro výuku na vysokých školách a pro odbornou veřejnost. Václav Jandura, Tomáš Zavadil. Zář 2017.
- [25] ATG. Advanced Technology Group. Visual Testing (VT). [online]. [cit. 2019-01-01]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/ndt-161&display=VT>
- [26] CONTROLTEST. METODA KONTROLY ULTRAZVUKEM. [online]. [cit. 2019-01-01]. Dostupné z: <http://www.controltest.cz/metody-ndt/kontroly-ultrazvukem.php>
- [27] Hongyan Zhang, Jacek Senkara: Resistance Welding: Fundamentals and Applications, CRC Press Published, 2005.
- [28] OLYMPUS. Spot Weld Testing. [online]. [cit. 2019-01-01]. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/spot-weld-testing/>

- [29] Michal ŠKEŘÍK: IRT. INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE STUPEŇ I, II. Podklady pro školení dle ISO 9712, SNT-TC-1A a EN 4179 / NAS 410. ZÁŘÍ 2012.
- [30] Allpower. Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití. [online]. [cit. 2019-01-01]. Dostupné z: www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf
- [31] Fyzika 007. První termodynamický zákon. [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/molekulova-fyzika-a-termika/prvni-termodynamicky-zakonk>
- [32] AV EQUEN. Tepelná vodivost. [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <http://www.av-equen.cz/znalosti/tepelna-vodivost/>
- [33] E-konstrukter. Jaký je rozdíl mezi přenosem tepla vedením, prouděním a sáláním? [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-prenosem-tepla-vedenim-proudenim-a-salanim>
- [34] Pion. Provereno sibirskou zimou. Elektromagnetické spektrum. [online]. [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <http://www.pion.cz/cs/clanek/elektromagneticke-spektrum>
- [35] KONSTRUKCE. Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství. Aplikace tekutého CO₂ pro chlazení elektrodových čepiček u odporového bodového svařování. [online]. [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/aplikace-tekuteho-co2-pro-chlazení-elektrodovych-cepickek-u-odporoveho-bodoveho-svarovani/>
- [36] Emisivita látek. [online]. [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <http://mereni-diagnostika.conversio.cz/uzitecne-informace/emisivita-latek>
- [37] Workswell: Termovizní systém pro nedestruktivní testování svařových spojů. Kód projektu: FV10757.

[38] Testo: Hodnoty emisivit nejdůležitějších materiálů. [online]. [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: https://www.testo.com/sk-SK/Hodnoty+emisivit+nejdůležitějších+materiálů/services_knowledgeable_thermography_emissivity_table

[39] Е. В. ШАПОВАЛОВ, Р. М. ГАЛАГАН, Ф. С. КЛИЩАР, В. И. ЗАПАРА ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, Киев-150, ул. Боженко: СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКОЙ (ОБЗОР). Научно-технический раздел, 2013.

[40] KOLAŘÍK, L., SOVA, J., KOLAŘÍOVÁ, M., FOREJTOVÁ, L.: Termovizní kontrola svarových spojů, MM Průmyslové spektrum, 3, 2017, p. II-III.

[41] Lynn Yarris: Nondestructive Evaluation Techniques To Test Structural Integrity To Be Developed For Auto Assembly Lines, scienceBEAT, 2001.

[42] Patrik Broberg, University West, Trollhättan: Thermography for inspection of welds and joints. University West.

[43] N.P. Avdelidis¹, T-H. Gan, C. Ibarra-Castanedo, X.P.V. Maldague. Paper presented at Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIII, Orlando, Florida, USA, 26-28 April 2011. [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/infrared-thermography-as-a-non-destructive-tool-for-materials-characterisation-and-assessment>

[44] Dr. Michelle Manuel: USE OF INFRARED THERMOGRAPHY FOR THE INSPECTION OF WELDS IN THE SHOP AND FIELD, March 2018. [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://www.transportation.institute.ufl.edu/2018/03/use-of-infrared-thermography-for-the-inspection-of-welds-in-the-shop-and-field/>

[45] Mitteldeutsche Zeitung. Porsche-Werk Moderne Fertigung mit 475 Robotern und 189 Menschen. [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.mz-web.de/wirtschaft/porsche-werk-moderne-fertigung-mit-475-robotern-und-189-menschen-24323126>

[46] Salzgitter Flachstahl. DC05+ZE Mild steel grades for cold forming.

[47] Alfun. Ocelové plechy a pásy válcované za studena elektrolyticky pozinkované Tažné oceli DC01 – DC05 + ZE25/25, ZE50/50, ZE75/75. [online]. [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/ocel>

[48] ATV Praha s.r.o.. Elektrodové čepičky 39D 1978-2. [online]. [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <https://www.atvpraha.cz/p/985/g0-13>

[49] FLIR. TERMOKAMERY FLIR T530 A T540. [online]. [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/flir-t530-a-t540/>

[50] Profesionální měřicí a diagnostické přístroje. FLIR T5xx – termokamery střední třídy. [online]. [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <http://www.spektravision.cz/produkty/termokamery-pro-prumysl-vyzkum-a-dalsi-pouziti/flir-t5xx/>

9 Přílohy

Příloha 1 - Optimalizace svařovacích parametrů.

nastavené parametry	číslo svaru												naměřený proud [kA]		
	učící svary			dobré svary											
% / kA	1		2		3		4		5		6				
19,5	3,5	3,2	1,5	1,85	3,44	3,57	2,82	3,36	3,02	2,86	3,38	3,2	3,712	3,844	3,678
5	2,9	2,2	2,2	3,7	3,7	3,9	3,9	2,7	3,02	3,02	3,02	3,2	3,556	3,85	3,65
20,5	3,6	3,31	3,12	2,91	3,12	3,13	3,14	3,51	3,32	3,17	3,1	3,06	4,33	4,026	4,39
5,5	3,02	2,7	2,7	3,14	3,14	3,88	3,88	3,02	3,02	3,02	3,02	3,06	4,338	4,36	4,414
21,5	3,4	3,81	2,2	3,74	3,9	3,65	3,7	3,65	3,48	3,44	4,1	3,79	4,304	4,514	4,47
6	4,22	3,08	3,08	3,4	3,4	3,6	3,6	3,4	3,4	3,44	3,48	3,79	4,126	4,824	4,734
22,5	4,18	4,03	4,44	4,32	4,66	3,93	4,82	4,1	3,6	3,88	3,76	3,97	5,252	5,214	5,044
6,5	3,88	4,2	4,2	3,2	3,2	3,38	3,38	4,1	4,16	4,18	4,18	3,97	5,324	4,77	5,39
23,5	4,82	4,37	4,78	4,22	4,7	4,3	3,8	4,19	4,02	4,21	4,5	4,53	5,854	5,48	5,524
7	3,92	3,66	3,66	3,9	3,9	4,3	4,58	4,4	4,4	4,56	4,56	4,53	5,658	5,96	6,084
24,5	4,62	4,62	4,44	4,5	4,88	4,59	4,88	4,93	4,4	4,75	4,38	4,79	6,462	5,68	6,39
7,5	4,62	4,56	4,56	4,3	4,3	4,59	4,98	4,93	5,1	5,2	5,2	4,79	6,712	6,406	6,548
25,5	5	4,44	4,44	4,8	4,8	4,95	4,62	4,36	4,36	4,58	4,48	4,98	7,064	7,018	7,342
8	4,64	4,82	5,1	4,77	5,1	4,95	5,1	4,86	4,8	4,58	5,48	4,98	6,84	7,406	7,148

**Příloha 2 - Naměřené hodnoty z termočlánků a stanovené hodnoty emisivit v SW FLIR
Tools pro DC05.**

Čas měření	T [°C]			ε [l]		
	svar	TOO	ZM	svar	TOO	ZM
19:20:46.04	329,9	325,0	324,7	0,34	0,51	0,39
19:20:49.04	321,0	318,1	317,8	0,34	0,51	0,39
19:20:52.04	311,7	307,6	307,3	0,34	0,51	0,39
19:20:54.02	306,9	304,5	304,2	0,33	0,49	0,38
19:20:57.02	298,9	295,5	294,7	0,34	0,51	0,38
19:20:59.00	291,7	287,3	286,5	0,34	0,51	0,38
19:21:02.00	282,6	277,0	276,2	0,34	0,52	0,38
19:21:07.04	268,5	263,2	261,7	0,35	0,53	0,39
19:21:10.04	260,9	255,0	253,5	0,36	0,53	0,39
19:21:13.04	254,5	249,6	245,6	0,34	0,53	0,39
19:21:20.00	242,6	241,0	236,0	0,34	0,48	0,37
19:21:26.00	227,9	222,8	217,8	0,34	0,53	0,40
19:21:33.02	215,1	213,1	206,1	0,34	0,52	0,38
19:21:40.04	203,3	202,1	195,1	0,34	0,51	0,39
19:21:45.02	194,6	191,8	184,8	0,35	0,52	0,40
19:21:50.00	187,5	185,9	178,9	0,36	0,51	0,39
19:21:56.00	178,9	176,3	166,3	0,34	0,51	0,42
19:22:01.04	172,1	170,4	160,4	0,33	0,50	0,40
19:22:04.04	168,3	166,4	156,4	0,34	0,49	0,39
19:22:08.00	163,8	162,2	152,2	0,33	0,51	0,39
19:22:13.04	156,0	154,5	144,5	0,34	0,5	0,42
19:22:17.00	151,7	151,0	141,0	0,34	0,51	0,40
19:22:23.00	145,3	143,6	133,6	0,35	0,50	0,41
19:22:35.00	134,8	134,0	124,0	0,32	0,49	0,42
19:22:38.00	131,7	130,8	120,8	0,33	0,49	0,42
19:22:42.02	127,9	126,6	116,6	0,33	0,49	0,44
19:22:49.04	121,2	120,6	110,6	0,33	0,49	0,42
19:22:54.02	117,7	117,2	107,2	0,33	0,48	0,43
19:23:03.02	111,6	110,8	100,8	0,33	0,47	0,41
19:23:09.02	107,3	106,5	96,5	0,32	0,48	0,43
19:23:14.00	103,8	102,9	92,9	0,35	0,49	0,45
19:23:17.00	101,7	100,9	90,9	0,33	0,49	0,45
19:23:21.02	99,3	98,7	88,7	0,33	0,47	0,43
19:23:27.02	95,7	95,4	85,4	0,33	0,45	0,44
19:23:32.00	93,1	92,5	82,5	0,32	0,47	0,44
19:23:39.02	89,2	89,1	79,1	0,32	0,48	0,35
19:23:44.00	86,8	86,4	76,4	0,32	0,44	0,44
19:23:48.02	84,9	84,5	74,5	0,32	0,47	0,45
19:23:52.04	83,0	82,5	72,5	0,31	0,47	0,45
19:23:55.04	81,4	80,4	70,4	0,32	0,44	0,47
19:23:59.00	79,5	78,4	68,4	0,31	0,47	0,46
19:24:08.00	76,4	76,6	66,6	0,40	0,52	0,53

19:24:11.00	75,2	75,2	65,2	0,31	0,45	0,43
19:24:15.02	73,8	73,9	63,9	0,30	0,44	0,45
19:24:19.04	72,3	72,1	62,1	0,29	0,41	0,44
19:24:21.02	71,8	71,6	61,6	0,29	0,45	0,44
19:24:35.00	67,1	67,0	57,0	0,28	0,43	0,45
19:24:49.04	63,0	62,9	52,9	0,27	0,42	0,46
19:24:56.00	60,9	60,7	50,7	0,27	0,42	0,46
19:25:12.02	56,7	56,3	46,3	0,25	0,43	0,54
19:25:16.04	55,3	55,3	45,3	0,24	0,40	0,55
19:25:23.00	53,8	53,7	43,7	0,24	0,43	0,57
19:25:28.04	52,5	52,6	42,6	0,23	0,40	0,50

Příloha 3 - Naměřené hodnoty z termočlánku a stanovené hodnoty emisivit v SW FLIR Tools. Počet svarů čepiček = 0.

Čas	Teplota přípravku [°C]	Teplota čepičky [°C]	Emisivita čepičky ε [/]
15:03:08	145,9	27,7	0,77
15:03:14	132,8	33,6	0,43
15:03:19	125	38,1	0,33
15:03:23	120,9	41,5	0,27
15:03:28	116,6	45,4	0,22
15:03:32	113,5	48,5	0,21
15:03:37	110	52,2	0,19
15:03:43	107,2	56,5	0,17
15:03:46	106	58,4	0,16
15:03:49	105	60,3	0,16
15:03:52	104	62,1	0,15
15:03:55	103	63,7	0,14
15:03:59	102,4	65,9	0,14
15:04:04	101,3	68,6	0,13
15:04:07	100,7	70,1	0,12
15:04:11	99,9	72,1	0,13
15:04:16	98,9	74,5	0,12
15:04:22	97,9	77,3	0,12
15:04:26	97,3	79,1	0,11
15:04:30	97	80,8	0,11
15:04:33	97	81,9	0,12

Příloha 4 - Naměřené hodnoty z termočlánku a stanovené hodnoty emisivit v SW FLIR Tools. Počet svarů čepiček = 25.

Čas	Teplota přípravku [°C]	Teplota čepičky [°C]	Emisivita čepičky ε [/]
15:15:46	188,7	29,1	0,71
15:15:50	187,6	33,6	0,58
15:15:53	186,8	36,7	0,57
15:15:57	185,8	40,7	0,525
15:16:06	182,9	49,1	0,5
15:16:18	179,4	58,4	0,48
15:16:24	178,4	62,7	0,49
15:16:33	176,6	68,3	0,49
15:16:38	175,6	71,3	0,49
15:16:45	174,4	75	0,48
15:16:50	173,3	78	0,5
15:16:55	172,7	80,5	0,49
15:16:58	172	82,3	0,49
15:17:03	171,3	84	0,49
15:17:08	170,4	85,9	0,5

Příloha 5 - Naměřené hodnoty z termočlánku a stanovené hodnoty emisivit v SW FLIR Tools. Počet svarů čepiček = 50.

Čas	Teplota přípravku [°C]	Teplota čepičky [°C]	Emisivita čepičky ε [/]
15:10:38	177,4	33,3	0,83
15:10:43	174,9	37,9	0,78
15:10:47	172,7	41,4	0,74
15:10:52	170,9	45,3	0,63
15:10:56	169	48,4	0,6
15:11:00	167,5	51,4	0,57
15:11:04	166,3	54,3	0,64
15:11:11	165,1	58,9	0,62
15:11:18	164	63,1	0,62
15:11:26	162,4	67,4	0,62

15:11:34	161	71,7	0,6
15:11:41	160,8	75,3	0,59
15:11:47	159,7	78,1	0,57
15:11:52	158,7	80	0,58
15:11:57	158	82,1	0,57
15:12:02	157,3	84,2	0,6
15:12:06	156,8	86	0,575

Příloha 6 - Naměřené hodnoty z termočlánku a stanovené hodnoty emisivit v SW FLIR Tools. Počet svarů čepiček = 75.

Čas	Teplota přípravku [°C]	Teplota čepičky [°C]	Emisivita čepičky ε [/]
14:31:23	81,2	29,8	0,93
14:31:30	76,8	33,3	0,815
14:31:36	75,4	35,9	0,81
14:31:43	73,7	38,8	0,74
14:31:48	73,2	40,8	0,75
14:31:54	71,7	43,1	0,72
14:31:59	71	44,7	0,71
14:32:05	70,2	47,1	0,68
14:32:10	69,8	48,8	0,67
14:32:18	69,4	51	0,67
14:32:24	69	52,8	0,67
14:32:31	67,9	55	0,66
14:32:38	66,9	57	0,645
14:32:47	66,7	58,9	0,64
14:32:52	66,9	60	0,64
14:33:02	66,8	62	0,63
14:33:15	65,8	64,3	0,63
14:33:22	65,4	65,5	0,61
14:33:30	65,5	66,9	0,6
14:33:38	64,6	68,1	0,59
14:33:45	64,4	69	0,6
14:33:53	64,2	70	0,61
14:34:00	64,1	70,9	0,62

14:34:08	62,6	72,1	0,63
14:34:19	62,2	73	0,6
14:34:26	62	74	0,63
14:34:44	61,9	75,2	0,61
14:34:57	61,8	76	0,61
14:35:18	61,1	77	0,58

Příloha 7 - Naměřené hodnoty z termočlánku a stanovené hodnoty emisivit v SW FLIR Tools. Počet svarů čepiček = 100.

Čas	Teplota přípravku [°C]	Teplota čepičky [°C]	Emisivita čepičky ϵ [/]
14:40:36	139,1	29,8	1
14:40:46	137,1	35,6	0,82
14:40:56	135,3	40,9	0,73
14:41:01	134,4	43,2	0,72
14:41:07	133,5	46	0,69
14:41:14	132,3	48,9	0,67
14:41:21	131,2	51,7	0,64
14:41:30	130,2	54,9	0,61
14:41:36	129,2	57	0,61
14:41:42	128,3	58,9	0,61
14:41:49	127,5	61,1	0,61
14:41:55	126,8	62,7	0,58
14:42:08	125,4	66,2	0,57
14:42:15	124,6	67,8	0,57
14:42:24	123,6	70	0,56
14:42:40	122	72,9	0,56
14:42:46	121,4	74,2	0,56
14:42:56	120,3	75,9	0,54
14:43:02	119,9	77	0,54
14:43:09	119,3	78	0,53
14:43:21	118,3	79	0,54

Příloha 8 - Naměřené hodnoty z termočlánku a stanovené hodnoty emisivit v SW FLIR Tools. Počet svarů čepiček = 150.

Čas	Teplota přípravku [°C]	Teplota čepičky [°C]	Emisivita čepičky ϵ [/]
14:48:05	125,7	29,5	0,72
14:48:15	115,9	37	0,57
14:48:21	112	41,1	0,54
14:48:26	109	43,9	0,56
14:48:33	106,4	47,9	0,55
14:48:39	105,4	51,2	0,53
14:48:45	105,1	54	0,53
14:48:50	104,1	56,5	0,53
14:48:58	103,5	60	0,54
14:49:09	101,9	64,2	0,54
14:49:16	101,4	66,7	0,54
14:49:22	100,9	68,9	0,53
14:49:31	100,3	71	0,54
14:49:42	98,9	74,8	0,54
14:49:51	98,2	76,8	0,53
14:49:56	98,1	78	0,53
14:50:03	97,6	79,9	0,53
14:50:15	96,7	82,1	0,53
14:50:30	95,6	84,7	0,55

Příloha 9 - Naměřené hodnoty z termočlánku a stanovené hodnoty emisivit v SW FLIR Tools. Počet svarů čepiček = 200.

Čas	Teplota přípravku [°C]	Teplota čepičky [°C]	Emisivita čepičky ϵ [/]
14:54:18	97,2	28,1	0,64
14:54:22	88,1	31,3	0,6
14:54:28	78,1	36,1	0,55
14:54:33	72,2	39,7	0,51
14:54:41	67,1	44,8	0,47
14:54:50	62,2	50,2	0,46
14:55:01	61,5	56,2	0,47
14:55:09	59,9	60	0,47
14:55:13	58,8	61,8	0,46
14:55:17	58,7	63,6	0,46
14:55:24	57,8	66,5	0,44
14:55:31	57	68,9	0,44
14:55:37	56,3	71	0,45
14:55:46	54,9	73,8	0,43
14:55:52	53,9	75,7	0,43
14:55:59	55,8	77,7	0,43
14:56:06	55,8	79,9	0,44
14:56:14	55,1	81,9	0,43