



**ČVUT**

ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**MONITORING VYSOKORYCHLOSTNÍCH SVAŘOVACÍCH  
PROCESŮ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Vladimír Korec

**VEDOUCÍ PRÁCE:** doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE

**STUDIJNÍ PROGRAM:** B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

**STUDIJNÍ OBOR:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Praha 2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Korec** Jméno: **Vladimír** Osobní číslo: **491274**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Monitoring vysokorychlostních svařovacích procesů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Monitoring of high-speed welding processes**

Pokyny pro vypracování:

- Analýza způsobů monitorování svařovacích procesů
- Návrh experimentu pro porovnání různých procesů odporového svařování s využitím vysokorychlostní kamery
- Provedení experimentu svaření zkušebních vzorků a jejich vyhodnocení
- Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Zhang, H., Senkara, J.: Resistance Welding: Fundamentals and Applications, CRC Press, 2nd. Edition, 2011
- [2] databáze WoS a Scopus

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

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

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

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Marie Kolaříkové, Ph.D., IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE za odborné vedení mé bakalářské práce, věcné připomínky, trpělivost a vstřícnost při konzultacích. Taktéž bych rád poděkoval všem konzultantům, kteří se na práci podíleli.

## Anotace

<b>Název diplomové práce:</b>	Monitoring vysokorychlostních svařovacích procesů
<b>Autor práce:</b>	Vladimír Korec
<b>Vedoucí práce:</b>	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE
<b>Konzultant:</b>	Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.
<b>Akademický rok:</b>	2021/2022
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	38 stránek, 9 tabulek, 41 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	Bodové svařování, Odporové svařování, Vysokorychlostní kamery, Monitorování

## Abstrakt

Tato bakalářská práce zkoumá způsoby monitoringu tvorby svarové čočky odporového bodového svařování za použití vysokorychlostní kamery. Teoretická část se zabývá vlastnostmi vysokorychlostních kamer, jejich typy a principy jejich funkce. Jsou zde diskutovány podobné, již provedené experimenty, z nichž vycházely parametry použité pro návrh vlastního experimentu, který je podrobně popsán v experimentální části. Je zde taktéž popsán realizovaný postup monitorování bodového svaru. Dále je zde v neposlední řadě rozebráno odladění svařovacího a monitorovacího procesu. V závěru jsou získané výsledky analyzovány a následně diskutovány.

## Annotation

<b>Title of the final thesis:</b>	Monitoring of high-speed welding processes
<b>Author:</b>	Vladimír Korec
<b>Supervisor:</b>	doc. Ing. Marie Kolaříková, Ph.D., IWE
<b>Consultant:</b>	Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.
<b>Academic year:</b>	2021/2022
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Extent:</b>	38 pages, 9 tables, 41 pictures
<b>Keywords:</b>	Spot welding, Resistance welding, High-speed cameras, Monitoring

## Abstract

This bachelor work enquires into ways of monitoring of creation a weld nugget resistance spot welding with a use of a high-speed camera. Theoretical part focuses on characteristics of high-speed cameras, their types and their function principles. Similar and already done experiments are being discussed there, on which the parameters were used for the plan of experiment itself are based on, as it is described in the experimental part. The implemented method of monitoring point welding is being described there. Finally, there is also the debug of welding and monitoring process analysed. In the conclusion the final outcomes gained are analysed and discussed there.

## Obsah

1	Úvod.....	12
2	Vysokorychlostní kamery.....	12
2.1	Úvod.....	12
2.2	Rozdělení vysokorychlostních kamer .....	13
2.2.1	Video kamery se štěrbinovou nebo centrální závěrkou .....	13
2.2.2	Režim štěrbinové závěrky.....	14
2.2.3	Režim centrální závěrky.....	14
2.3	Typy vysokorychlostních kamer a jejich principy měření.....	15
2.4	Použití vysokorychlostních kamer .....	18
2.4.1	Další důležité pojmy .....	18
2.5	Kamery s HDR – High Dynamic Range .....	18
3	Odporové svařování.....	19
3.1	Popis procesu.....	19
3.2	Rozdělení odporového svařování .....	20
3.2.1	Bodové svařování .....	20
3.2.2	Metalurgický proces .....	21
3.2.3	Švové svařování .....	22
3.2.4	Výstupkové svařování.....	22
3.2.5	Stykové svařování.....	23
4	Způsoby monitorování svařovacích procesů .....	24
4.1.1	Úvod .....	24
4.2	Monitorování svarů za pomoci MKP .....	24
4.2.1	Vizualizace obloukového svařování za pomoci MKP.....	24
4.2.2	Vizualizace odporového bodového svařování za pomoci MKP.....	25
4.2.3	Shrnutí MKP.....	26
4.3	Vizualizace svařovacího procesu skrze stínovou grafiku .....	26
4.4	Monitoring kvality svaru destruktivními zkouškami .....	27
4.5	Metody monitorování bodového odporového svařování za pomoci vysokorychlostních kamer .....	27
4.5.1	Zobrazení svarové čočky vysokorychlostní kamerou.....	28

4.5.2	Monitoring kvality svaru na základě posunutí elektrody.....	32
4.5.3	Monitorování rozstříku kovu při odporovém bodovém svařování.....	33
4.6	Jiné způsoby monitorování svařování .....	34
5	Návrh uspořádání stanoviště a použitá zařízení.....	34
5.1	Popis uspořádání stanoviště.....	34
5.2	Popis jednotlivých komponent experimentální sestavy.....	35
5.3	Svařovací zařízení.....	35
5.3.1	Elektrody .....	35
5.3.2	Svařovací stroj .....	36
5.3.3	Řídící počítač .....	36
5.4	Monitorovací zařízení .....	36
5.4.1	Vysokorychlostní kamera .....	36
5.4.2	Objektiv .....	37
5.4.3	Mezikroužky .....	38
5.4.4	Řídící počítač .....	38
5.5	Osvětlení.....	39
5.6	Ochranné prvky .....	39
6	Odladění svařovacího procesu.....	40
6.1	Potíže při odladování svařovacího procesu.....	40
6.1.1	Optimalizované hodnoty pro materiál DC05 .....	42
6.1.2	Odladěné hodnoty pro materiál 22MnB5.....	43
6.1.3	Umísťování svarů.....	44
7	Odladění nastavení kamery .....	45
7.1	Nastavení clon a odladění rychlosti závěrky.....	45
7.1.1	Finální nastavení clon.....	46
7.2	Aplikování HDR .....	46
7.3	Finální nastavení kamery .....	46
7.4	Popis konečného provedení experimentu .....	47
8	Výsledky .....	48
9	Závěr.....	50
	Citovaná literatura.....	51
	Seznam obrázků .....	56



Seznam tabulek .....	58
Seznam příloh.....	58

## Seznam zkratek

<b>CNC</b>	Computer Numerical Control (číslicové řízení počítačem)
<b>CCD</b>	Charge-Couple Device
<b>HDR</b>	High Dynamic Range (vysoký dynamický rozsah)
<b>UHD</b>	Ultra High Definition (extrémně jemné rozlišení)
<b>SDR</b>	Standart Dynamic Range (standardní dynamický rozsah)
<b>HDTV</b>	High Definition television (televize s vysokým rozlišením)
<b>GMAW</b>	Gas Metal Arc Welding (plynové obloukové svařování kovů)
<b>MKP</b>	Metoda Konečných Prvků
<b>MAG</b>	Metal Active Gas (svařování kovů v aktivním plynu)
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode (elektroluminiscenční dioda)

## Seznam použité symboliky

<b><math>Mpx</math></b>	rozlišení [Megapixel]
<b><math>sn/s</math></b>	snímková rychlost [snímků za sekundu]
<b><math>f [Hz]</math></b>	frekvence [Herz]
<b><math>t [s]</math></b>	čas [s]
<b><math>ob/s</math></b>	záznamová rychlost [obrázků za sekundu]
<b><math>Q [J]</math></b>	teplo [Joule]
<b><math>R [\Omega]</math></b>	odpor [Ohm]
<b><math>I [A]</math></b>	proud [Amper]
<b><math>HRB</math></b>	tvrdost dle Rockwella
<b><math>S [V \cdot A]</math></b>	zdánlivý výkon [Volt Ampér]
<b><math>F [N]</math></b>	přítlak [Newton]
<b><math>\rho[kg/m^3]</math></b>	hustota [kilo gram na metr čtvereční]
<b><math>E [N/mm^2]</math></b>	modul pružnosti [Newton na milimetr čtvereční]
<b><math>HBW</math></b>	tvrdost dle Brinella
<b><math>R_m[N/mm^2]</math></b>	mez pevnosti [Newton na milimetr čtvereční]
<b><math>R_{p0,2} [N/mm^2]</math></b>	mez kluzu [Newton na milimetr čtvereční]
<b><math>c [J/kg \cdot K]</math></b>	měrná tepelná kapacita [Joule na kilogram Kelvin]
<b><math>\rho [\Omega \cdot m]</math></b>	měrný elektrický odpor [Ohm metr]

# 1 Úvod

Použití vysokorychlostních kamer má velkou výhodu v mnoha různorodých aplikacích, jsou schopny zaznamenávat rychle probíhající děje vysokou snímkovací rychlostí a v dnešní době i ve velice dobré kvalitě. Je dobré je používat u procesů, které jsou pouhým lidským okem, či jinými konvenčními kamerami nezaznamenatelné. Dají se používat v nebezpečných prostředích a díky jejich použití se eliminuje lidská chyba a nepřesnost. Díky tomu se dají velice dobře použít jak ve vědě při záznamu rychle probíhajících fyzikálních procesů, tak i v průmyslu, především při automatizaci.

V průmyslu se vysokorychlostní kamery využívají často v automatizovaných procesech, které probíhají ve vysokých rychlostech, příkladem může být obráběcí stanice CNC, kdy za přítomnosti vysokorychlostní kamery lze kontrolovat, zda obrábění probíhá správně, zda je správně nastavená řezná rychlost nebo velikost třísky. To lze z dat kamery v průběhu měnit a tím zvýšit efektivitu nebo snížit opotřebení nástroje. Další příklady použití vysokorychlostních kamer v průmyslu mohou být například balící a jiné výrobní linky, kontrola jakosti v automobilovém průmyslu (lze sledovat například odvíjející se svitek plechu, kdy je kamera schopna zachytit mikropraskliny, či jiné možné vady), v leteckém průmyslu lze kamerami sledovat proudění vzduchu při obtékání křídla a mnohem více.

Vysokorychlostní kamery se hojně využívají ve zkušebnictví, například crash testy automobilů, zkoušky kinematických vlastností střel, rázové zkoušky (metoda „Charpy“) a další.

Tato práce je zaměřena na způsob zachycení vzniku svarové čočky při odporovém bodovém svařování za pomoci vysokorychlostní kamery. V úvodní části práce je pojednání o vysokorychlostních kamerách – jejich princip fungování, druhy a jsou zde zmíněny oblasti použití. Dále je pojednání o druzích odporového svařování se zaměřením na bodové. Na konci teoretické části jsou zmíněny již provedené experimenty, které mají podobnost s problematikou tohoto experimentu. V praktické části je následně popsáno rozvržení experimentu, použité stroje a komponenty a na konci jsou diskutovány výsledky. Přínosem této práce je způsob rozvržení experimentu, při kterém lze sledovat tvorbu svarové čočky za laboratorních podmínek, vhodné parametry svařovacího stroje a správně nastavené parametry vysokorychlostní kamery.

## 2 Vysokorychlostní kamery

### 2.1 Úvod

Vynálezce vysokorychlostní kamery byl americký inženýr Morton Sultanoff, který pracoval pro americkou armádu v Aberdeen Proving ground a v roce 1950 sestrojil kameru, která byla schopna pořizovat 100 000 000 obrázků za sekundu. Tato kamera byla schopna zachytit malou rázovou vlnu po explozi. [1] Od té doby se tyto kamery zdokonalovaly – ať už v rámci snímků pořizovaných za sekundu, tak co se týká kvality rozlišení snímků v MPx (Megapixel). Dnes se vysokorychlostní kamery dají i levněji pořídit. Ovšem historicky to byla velmi nákladná zařízení. Kupříkladu kamera Kodak MASD SP 2000, která byla na trhu dostupná v letech 1980 až 1982 a měla záznamovou frekvenci 2 000 až 12 000 sn/s (snímků za sekundu),

velikost snímkovací rychlosti se odvíjí od kvality záznamu a stála 107 000 dolarů. První digitální vysokorychlostní kamera Ektapro EM 1012, která byla dostupná v devadesátých letech, jejíž snímková frekvence byla 6 000 sn/s, stála okolo 4 800 dolarů. [2]

**Vysokorychlostní kamery** mají v dnešní době široké využití, a to:

- 1) Ve vojenském průmyslu, kdy jsou používány k zobrazení a následnému zkoumání fyzikálních jevů, např. při výstřelu pistole, či startu rakety a taktéž i třeba při monitorování aerodynamických jevů proudových letounů.
- 2) Ve sportu, kdy nejznámější použití je v tenise jako tzv. jestřábí oko, kdy při sporném dopadu tenisového míčku si hráč požádá o zobrazení dopadu. Na hřišti jsou umístěny nejméně 4 vysokorychlostní kamery, z jejichž záznamu je následně sestaven a zobrazen 3D model a s jistotou se určí místo dopadu tenisáku.
- 3) V medicíně se vysokorychlostní kamery často používají např. pro zkoumání pohybu bakterií, při zkoumání správné funkčnosti chlopní v srdci, či při zkoumání kmitání hlasivek.
- 4) Všeobecné použití ve vědě je dáno tím, že nesčetné množství jevů trvá řádově zlomky sekund a jejich princip tak nelze nijak jinak pozorovat. Je to např. expanze, či vznícení různých plynů, či pozorování proudění tekutin a další.

Dnešní klasické kamery pořizují záznam obvykle rychlostí 30 sn/s, ty dražší i 60 sn/s. Ovšem některé procesy trvají řádově desítky milisekund, někdy ještě méně, čili by se klasickou kamerou získaly jen 2 fotografie. Některé vysokorychlostní kamery mají frekvenci záznamu i přes 2000 sn/s (Obr. 1). U těchto kamer bývají na výběr různá rozlišení, které jdou ruku v ruce s frekvencí (čím větší rozlišení, tím menší frekvence a naopak). [3] [1]



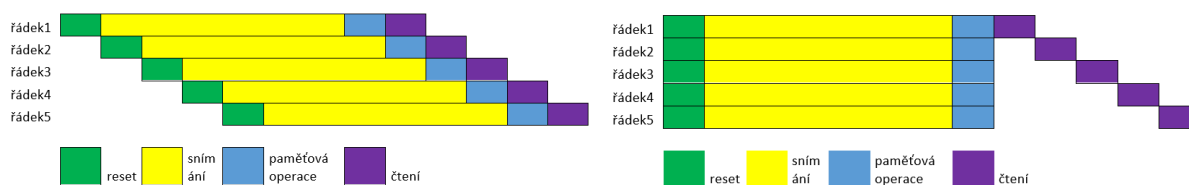
Obr. 1 Vysokorychlostní kamera FASTCAM SA-Z [4]

## 2.2 Rozdělení vysokorychlostních kamer

### 2.2.1 Video kamery se štěrbinovou nebo centrální závěrkou

V režimu **štěrbinové závěrky** jsou řádky snímaného pole (fotografie) exponovány v různých časech, takzvaně vlna po vlně, jak je vidět na Obr. 2 (vlevo), zatímco v režimu **centrální závěrky** každý pixel ve snímači začíná a končí expozici současně viz. Obr. 2 (vpravo), analogicky k expozičnímu mechanismu meziřádkové CCD (charge-coupled device), což znamená integrovaný obvod obsahující pole propojených nebo spojených kondenzátorů. Absolutně

nejnižšího šumu a nejrychlejších nesynchronizovaných snímkových frekvencí je však dosaženo z režimu štěrbinové závěrky. [5]



Obr. 2 Režim štěrbinové závěrky (vlevo), režim centrální závěrky (vpravo)

## 2.2.2 Režim štěrbinové závěrky

Režim štěrbinové závěrky v podstatě znamená, že následující řady pole budoucí fotografie jsou exponovány v mírně odlišných časech, jak dané zařízení čte jednotlivé „vlny“ procházející senzorem. To znamená, že každý řádek začne a skončí svou expozici mírně posunutou v čase od svého předchůdce. Při maximální rychlosti čtení 560 MHz je tento posun mezi expozicemi sousedních řádků 10  $\mu$ s. Mechanismus odečítání štěrbinové závěrky je znázorněn na Obr. 2 (vlevo). Na začátku expozice se vlna prožene snímačem a postupně přepne každou řadu ze „stavu udržování čistoty“, ve kterém je veškerý náboj odváděn z pixelů do „exponujícího stavu“, ve kterém se světlem indukovaný náboj shromažďuje v jednotlivých pixelech. Na konci expozice se odečtená vlna znovu prožene senzorem a přenesení náboj z každé řady do výstupního uzlu každého pixelu. Důležité je, že všechny řady jsou vystaveny přesně stejné době expozice, ale řada v horní nebo spodní části snímače začala a skončila expozici o 10 ms (1000 řádků x 10  $\mu$ s/řádek) později. [5]

Nevýhody režimu štěrbinové závěrky jsou, že když se zaznamenávaný předmět pohybuje, vznikne díky výše popsanému mechanismu zkreslení, jak lze vidět na Obr. 3 (vlevo). Zkreslení je patrnější v případech, kdy se větší objekty pohybují rychlostí, která je dočasně převzorkovaná snímkovou frekvencí. Další nevýhoda je, že jednotlivé části obrazu exponované v různých časech nebudou korelovat se zbylými částmi. [5]

## 2.2.3 Režim centrální závěrky

Režim centrální závěrky, který lze považovat za expoziční režim, znamená, že všechny pixely pole fotografie jsou exponovány současně, což umožňuje „zmrazení fotografie“ i u rychle pohybujícího se předmětů nebo u rychle měnící se události. Před zahájením expozice se budou všechny pixely v poli udržovat ve „stavu udržování čistoty“, během něhož je náboj odváděn. Na začátku expozice se každý pixel současně začne nabíjet a nabíjí se po dobu trvání expozice. Na konci expozice přenáší každý pixel současně náboj do svého čtecího uzlu, jak je vidět na Obr. 3 (vpravo). [5]

Centrální závěrka může být nakonfigurována tak, aby fungovala v režimu nepřetržitého „překrývání“, přičemž expozice může pokračovat, zatímco předchozí expozice je načítána z uzlových bodů každého pixelu. V tomto režimu má senzor 100% pracovní cyklus, což opět vede k optimálnímu časovému rozlišení a účinnosti sběru fotonů. Během celého tohoto cyklu nedochází k žádné periodě „přechodného“ zobrazení, jak je tomu u štěrbinového režimu. [5]

Důležité je, že režim centrální závěrky je velmi jednoduchý na synchronizaci a často přináší rychlejší snímkové frekvence než snahy o synchronizaci se šterbinovou závěrkou se stejným expozičním časem. Centrální závěrku lze také považovat za zásadní, když je vyžadována přesná časová korelace mezi různými částmi snímku. [5]

Mechanismus režimu centrální závěrky však vyžaduje, aby se kromě skutečného odečítání náboje z každého pixelu provádělo také referenční čtení „za scénou“. Referenční čtení probíhá tak, že se určí referenční bod, který se v čase určí tím, že je na konci po přečtení posledního řádku. Tento dodatečný digitalizovaný údaj je nutný k eliminaci šumu resetování z obrazu centrální závěrky, aby obraz nebyl rozostřen. Díky tomuto dodatečnému referenčnímu čtení přináší režim centrální závěrky kompromis snížení maximální nesynchronizované snímkové frekvence na polovinu, které by jinak bylo dosaženo v režimu šterbinové závěrky. [6]

U obou režimů zaznamenávání videozáznamu platí, že snímkovací frekvence jde ruku v ruce s kvalitou obrazu, kdy čím nižší snímkovací frekvence, tím vyšší kvalita. Je to z důvodu počtu pixelů, které se při zachycení musí zpracovávat. [6]

šterbinová závěrka



centrální závěrka



Obr. 3 Záznam pohyblivého se předmětu šterbinovou závěrkou (vlevo) a centrální závěrkou (vpravo) [6]

### 2.3 Typy vysokorychlostních kamer a jejich principy měření

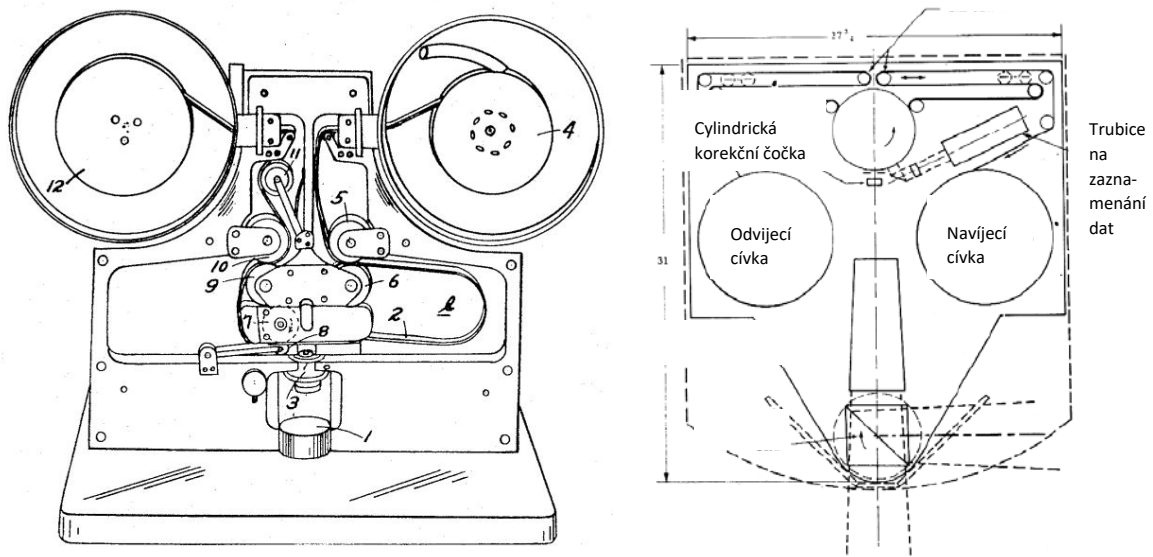
#### 1) Typy s přerušovaným (spojitým) chodem (Intermittent action types)

Je to základní typ kinofilmových kamer – principem je film, který se přerušovaně hýbe za pomoci třecího mechanismu, což je spojení mezi pohonem filmu a setrvačником, který se otáčí a poskytuje potřebnou energii pro požadované zrychlení filmu. Výhodou je prostorová stálost obrazu, ale bohužel snímkovací frekvence je omezena na  $(25 \div 500)$  sn/s, jak je vidět na Obr. 4 (vlevo). [7]

#### 2) Kamery s otáčejícím se hranolem (Rotating prism cameras)

Tento typ kamer obsahuje otočný hranol s vícero fazetami, přes které obraz prochází a dopadá přímo na film. Obraz vznikne tak, že otáčející se hranol jednou svou stranou promítá obraz na film, kde je postupně zachycen a další obraz se začne vytvářet při otočení o  $90^\circ$ . Když

se synchronizuje rychlost otáčení hranolu a filmu, tak se rapidně zvýší rychlost zachycování snímků na  $(100 \div 40\,000)$  sn/s, jak je vidět na Obr. 4 (vpravo). [7]



Obr. 4 Schéma principu kamer typu přerušovaných akcí (vlevo) [8], schéma principu kamery s otáčejícím se hranolem (vpravo) [9]

*popis: 1 – stínítko, 2 – film, 3 – čočka, 4 – odvíjecí cívka, 5 – odměřovací válec 1, 6 – odměřovací válec 2, 7 – hnací válec filmu, 8 – napínací válec, 9 – odměřovací hnací válec 1, 10 – odměřovací hnací válec 2, 11 – tlumič nárazů, 12 – navíjecí cívka a schéma principu kamery s otočným hranolem*

### 3) Bubnové a rotační zrcadlové kamery (Drum and rotating mirror cameras)

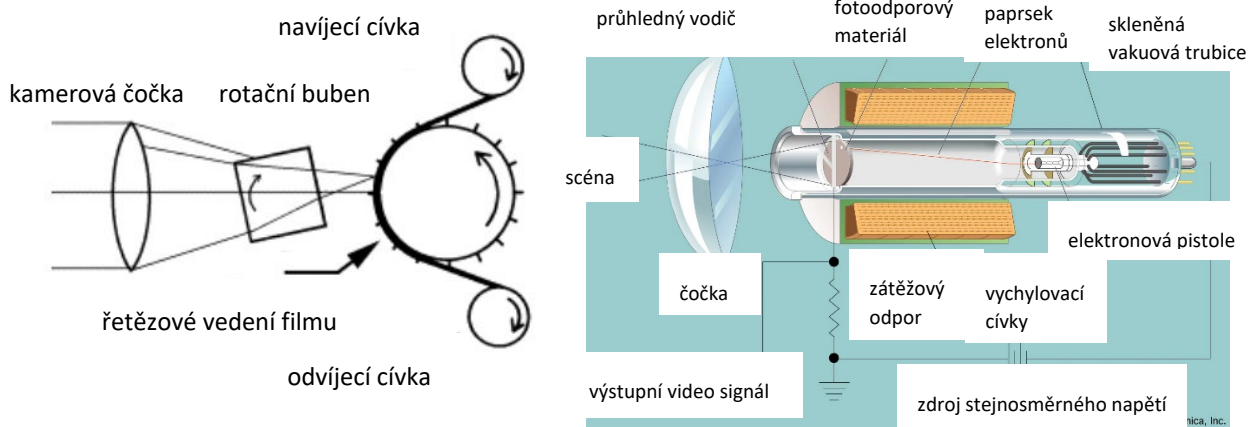
Bubnové kamery jsou kamery s otáčejícím se bubnem, na kterém je upevněn proužek fólie a může se díky bubnu otáčet velkou rychlostí. Následně čočky uvnitř kamery oddělí příchozí proužky na jednotlivé obrázky, jejichž počet je omezen úplnými otáčkami bubnu. Takto lze dostat kolem 40 000 ob/s (obrázků za sekundu, rozdíl mezi sn/s a ob/s je, že snímek je zaznamenán, ale obrázek ne). Rotační zrcadlové kamery se používají pro navýšení zachycování snímků za použití otočného kovového zrcadla. Světelné obrazy jsou z primární čočky přenášeny do kovového zrcadla rychlostí 10 000 ot/s. Tato rychlost otáčení komplikuje technologii uložení, která spočívá v usazení zrcadla na rýhovaný kužel základny turbíny, která „pluje“ na sloupci vysokotlakého plynu a tím se vyhneme mechanickému uložení s ložiskem. Tato technologie je schopna zobrazovat snímky s rychlostí  $(10\,000 \div 25 \cdot 10^6)$  ob/s. Schéma mechanismus lze vidět na Obr. 5 (vpravo). [7]

### 4) Kamery s převodníkem obrazu (Image converter cameras)

Mají určitou podobnost s katodovou trubicí, ale fungují jiným způsobem. Obrazový převodník se skládá z vyprázdněné trubice s nanesenou průhlednou fotokatodou na vstupní okno a fosforovou plochu na výstupní okno. Příchozí obrázek vytvořený fotoelektrony je urychlen na fosforovou plochu přivedeným vysokým napětím mezi katodou a stínítkem, kde je obraz vizuálně replikován. Takto lze dosáhnout až 600 milionů ob/s. Tato technologie se



hojně využívá při pořizování elektronických snímků událostí, kdy jsou eliminovány problémy s mechanickými kamerami, jako je setrvačnost, špatná reakce na slabé osvětlení, tření a fyzické síly k tomu potřebné. Schéma mechanismus lze vidět na Obr. 5 (vpravo). [7]



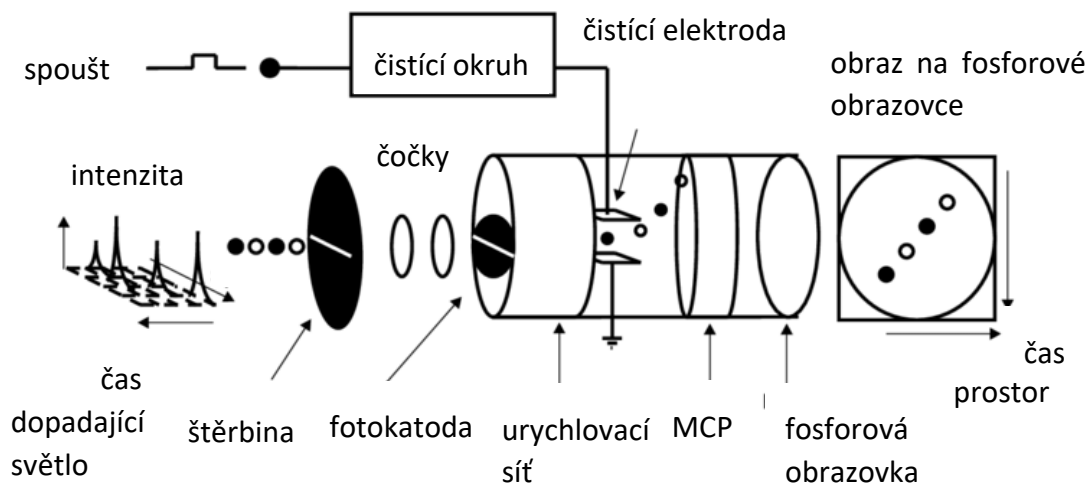
Obr. 5 Schéma principu rotačních zrcadlových kamer (vlevo) [10] a kamer s převodníkem obrazu (vpravo) [11]

## 5) Video systémy (Video systems)

Jsou to klasické kamery pro domácí, firemní, filmové a vědecké použití. Jejich velká výhoda je v tom, že umí dlouhodobě nahrávat a ukládat záběry na uložení. Jejich vývoj se začal v 70. letech minulého století a pokračuje dosud. Novější kamery umí v průběhu natáčení zvýšit kvalitu obrazu a frekvenci snímků. [7]

## 6) Proužkové kamery (Streak cameras)

Tyto kamery mají oproti předešlým jednu velkou výhodu a to, že umí zachycovat obrázky v pohybu. Předchozí kamery to dokázaly jen ve statickém stavu. Funguje to tak, že při zachycování zůstává otevřená závěrka a nepřetržitě zachycuje objekt. To znamená, že neexistuje interval mezi snímky, při kterém se objekt nenahrává. Při velmi vysokorychlostních akcích se však může stát, že objekt v nějakých časech nebude zachycen např. při výbuchu výbušniny. Schéma mechanismus lze vidět na Obr. 6. [7]



Obr. 6 Schéma principu pruhové kamery [12]

## 2.4 Použití vysokorychlostních kamer

Vysokorychlostní kamery mají široké využití s nízkými náklady na použití. Velké zastoupení mají v průmyslu, kdy jsou schopny monitorovat procesy, které nelze na klasickou kameru zachytit. Klasickým příkladem mohou být balící, či plnicí linky, kde se dají zachytit poruchy ať už přímo na lince, či na strojích. [13]

Kamery mají taktéž velké **užití ve vědě**, a to při zkoumání aerodynamiky, vizualizace proudění ať už v průmyslových aplikacích nebo v živých organismech. Dále např. při destruktivních zkouškách automobilů, kdy lze daný proces snímat z více úhlů a následným post processingem udělat 3D průběh celkového procesu. Další oblast je balistika, spalování, taktéž lze zaznamenat údery blesku, selhání lopatek turbín, či zkoumání vysokotlakých nádob a jejich roztržení. [14]

Nově se používají vysokorychlostní kamery i ve sportu. Typickým příkladem je tenis, kdy pomocí kamer se snímá pohyb tenisového míčku z vícero úhlů a při nejasném dopadu míčku lze zjistit, jestli je platný, či ne. Tomu se říká jestřábí oko. Ovšem lze je využít i v jiných sportech a na olympijských hrách jsou nevyhnutelnou součástí. [14]

### 2.4.1 Další důležité pojmy

V následujícím odstavci budou zmíněny důležité pojmy, které se budou nadále vyskytovat.

- 1) **Rozlišení** = míra detailnosti obrazu – tento pojem popisuje počet pixelů, které tvoří obraz, čím větší počet pixelů, tím kvalitnější (4K UHD má 3840 x 2160 pixelů)
- 2) **Bitová hloubka** = míra plynulosti barevných přechodů – tento pojem popisuje počet barev, který je schopen jeden pixel zobrazit, čím víc barev, tím kvalitnější obraz
- 3) **Snímková frekvence** = míra plynulosti pohybů – tento pojem popisuje počet snímků, které jsou vykresleny za jednu sekundu, čím vyšší frekvence, tím kvalitnější obraz
- 4) **Barevný rozsah** = míra věrohodnosti barev – tento pojem popisuje škálu všech barev, které je zařízení schopno zobrazit a které je lidské oko schopno vnímat, čím víc barev, tím lepší obraz
- 5) **Jas** = míra prosvícení obrazu – tento pojem popisuje rozsah škály mezi nejtmašími a nejsvětějšími objekty, které je lidské oko schopno zachytit, čím větší rozsah, tím kvalitnější obraz. [15]

## 2.5 Kamery s HDR – High Dynamic Range

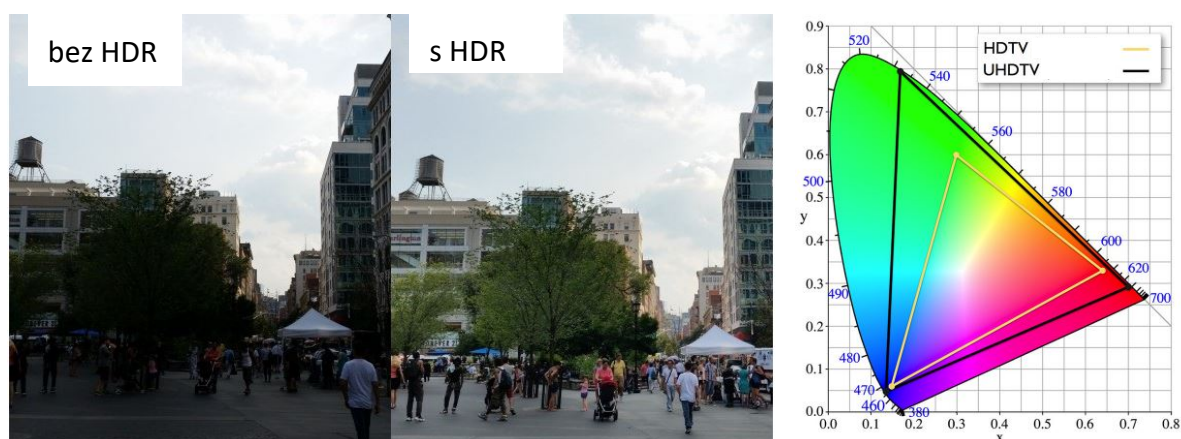
S pojmem HDR (česky vysoký dynamický rozsah) se v dnešní době můžeme setkat stále častěji u monitorů, televizí i mobilních telefonů. Je to progresivní technologie, která dokáže zobrazit větší množství detailů, a to hlavně v tmavých a světlých částech obrázku, kdy zamezuje slévání barev dohromady. Ve výsledku pozorovatel rozezná mnohem více detailů, které se vynoří z tmavých částí obrázku. [16]

To je skutečně pomocí sjednocení vícero snímků, které dané zařízení pořídí a po sjednocení tak vznikne kvalitnější fotografie. Důležité je, že jednotlivé snímky jsou vyfoceny s různou expozicí, což reprezentuje délku otevření závěrky – čím je závěrka déle otevřená, tím je obraz jasnější a po sloučení se tmavší a světlejší části vykompenzují. Pro pořízení vícero

snímků je vhodno snímací zařízení osadit vícero fotoaparáty, které separátně vyfotí jeden snímek a následně se sloučí dohromady. [16]

Taktéž má HDR **větší škálu barev**, které umí zobrazit bez větších ztrát detailů, jak je možno vidět na Obr. 7 (vlevo). Má taktéž větší barevnou hloubku, čemuž odpovídá i kolik bitů je použito k popisu dané barvy nebo pixelu – čím větší je barevná hloubka, tím je podrobnější škálování barev, a to jde ruku v ruce s jemnějšími přechody mezi jednotlivými odstíny. [17]

Normy HDR počítají s 10 až 12bitovou barevnou hloubkou, na rozdíl od stávající 8bitovou hloubkou u **SDR (Standard Dynamic Range, česky standardní dynamický rozsah)**. Pro ujasnění – 8bitová hloubka umožňuje zobrazit 16 miliónů barev a 10bitová dokáže přes miliardu a u 12bitové se mluví o téměř 69 miliardách barev. Graf na Obr. 7 vpravo zobrazuje rozdíl barevného pole rozlišení HDTV (High-Definition television, česky televize s vysokým rozlišením) a UHDTV (Ultra High-Definition television, neboli televize s ultra vysokým rozlišením). Naopak převažující technologie SDR má oproti HDR pouze omezené možnosti zobrazení, a proto se na trhu začíná čím dál víc prosazovat technologie HDR, nicméně zůstává pouze nadstavbovou funkcí, a ještě se nestala běžnou. Tato technologie zobrazení se dnes již používá na Blu-Ray i na streamovací platformě Netflix. [17]



Obr. 7 Rozdíl mezi obrazem s HDR a bez HDR (vlevo) graf udávající rozdílný rozsah barevné škály mezi HDTV a UHDTV (vpravo) [17]

### 3 Odporové svařování

#### 3.1 Popis procesu

Tato metoda spočívá v tom, že dva překryté dílce jsou sevřeny elektrodami, v nichž se při průchodu elektrického proudu uvolňuje **Jouleovo odporové teplo**, které spojí dílce v malé oblasti. Ocel má oproti elektrodám vyrobených např. z mědi mnohem větší elektrický odpor a dle vzorce:

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

(kde R je elektrický odpor v  $[\Omega]$ , I je elektrický proud v [A] a t je čas v [s]) se v místě největšího elektrického odporu zahřeje materiál, který se následně tlakem vyvolaném elektrodami spojí v pevný svar. Tyto svary mají malou tepelně ovlivněnou oblast a vykazují dobrou odolnost

proti smykovému namáhání. Samotný proces vytvoření jednoho svaru trvá v řádech desetin sekundy, v závislosti na technologii. Tohoto způsobu svařování se hojně využívá v automobilovém průmyslu při svařování karosérií aut, taktéž se využívá pro svařování plechů, drátů, mříží, pивních sudů, plechovek, nádrží na pohonné hmoty motocyklů atd. Tuto technologii lze snadno automatizovat a její velká výhoda spočívá v nulových emisích jako je ozón oproti konvenčnímu svařování. [18]

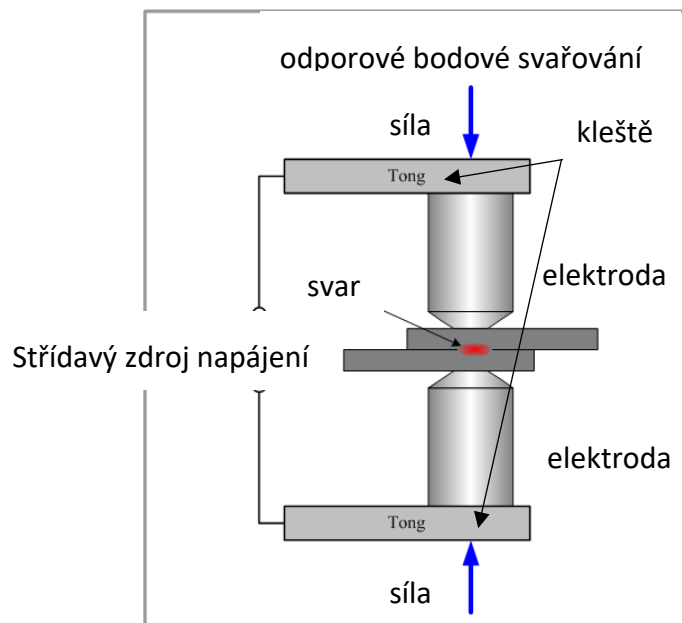
### 3.2 Rozdělení odporového svařování

Odporové svařování dělíme dle uspořádání elektrod a pracovního postupu. Rozeznáváme čtyři hlavní skupiny – bodové, švové, výstupkové a odtavovací stykové.

#### 3.2.1 Bodové svařování

Bodové svařování je **základním typem odporového svařování**. Svar vzniká stlačením dvou elektrod a následného průchodu elektrického proudu mezi elektrodami, kde vznikne odporové Jouleovo teplo a vytvoří se pevný, nerozebíratelný svarový spoj, jak je znázorněno na Obr. 8. [18]

Bodové svařování má významnou ekonomickou výhodu. Tepelně ovlivněná oblast je dosti malá, její velikost závisí na použitých parametrech a druhu svařovaného materiálu. Energie vložená do svaru, respektive do tepelně ovlivněné oblasti jednoho svaru je ve srovnání s konvenčním odporovým svařováním obvykle menší. Dále svar vznikne ve zlomcích sekundy, což zvýší efektivnost. Navíc při chodu stroje naprázdno je spotřebovaná energie zanedbatelná. [18]



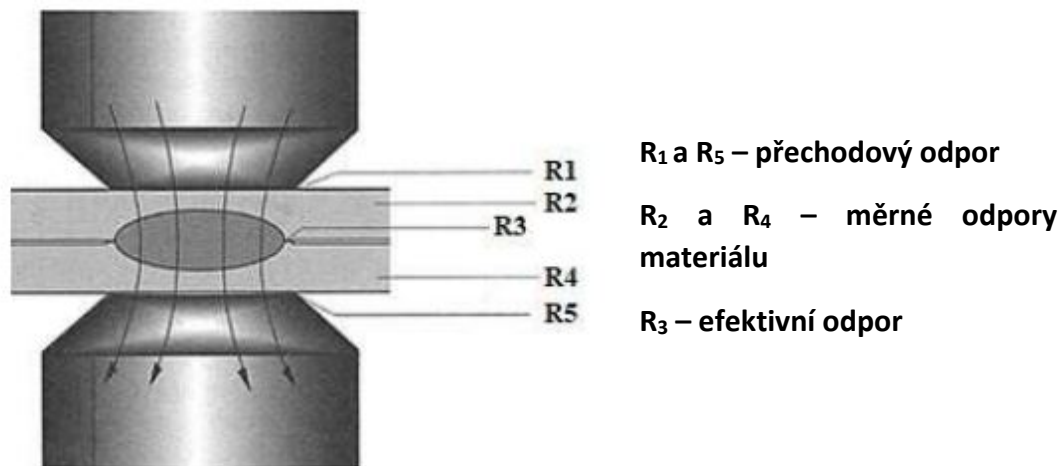
Obr. 8 Princip bodového svařování [19]

Při bodovém svařování je snahou, aby přechodový elektrický odpor byl co možná největší mezi svařovanými materiály, a naopak aby odpor mezi elektrodou a materiálem byl co možná nejmenší. Celkový odpor mezi elektrodami a svařovanými materiály je dán vzorcem:

$$R = \sum_i R_i [\Omega]$$

Výsledný odpor, takzvaný dynamický odpor (je závislý na teplotě), je dán jako součet odporů na přechodech dvou materiálů  $R_p$  a materiálových odporů  $R_m$ , které jsou dané svařovaným materiálem. [20]

S působením větší přitlačné síly se přechodový odpor zmenšuje a materiálový měrný odpor zůstává stejný, což platí pouze za předpokladu, že teplota je stejná, s rostoucí teplotou měrný materiálový odpor stoupá. Faktory, na kterých tento odpor závisí jsou: vodivost dotýkajících se kovů, čistota elektrod (resp. jejich povrchů), drsnost dotykových ploch, jejich povrchová úprava, ale i jejich režim tepelného zpracování. [20]

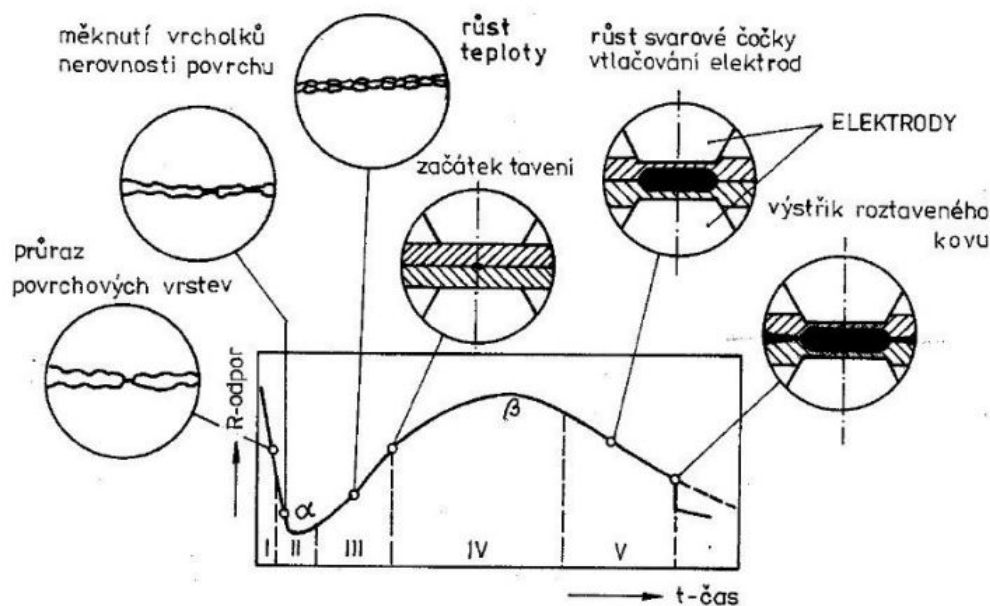


Obr. 9 Odpory při bodovém svařování [20]

Na Obr. 9 jsou vidět odpory, které vstupují do procesu odporového bodového svařování. Odpory  $R_1$  a  $R_5$  jsou **přechodové odpory** mezi elektrodami a materiálem, tyto odpory závisí hlavně na povrchové úpravě svařovaného materiálu a stavem elektrod. Na tyto odpory je požadavek, aby byly co nejmenší. Odpory  $R_2$  a  $R_4$  jsou **měrné odpory** svařovaných materiálů. Na tyto odpory je požadavek, aby byly co největší. A odpor  $R_3$  je **efektivní odpor** zpočátku mezi svařovanými materiály, následně je to odpor roztaveného kovu, tento odpor musí zpravidla být největší, jelikož zde svar vznikne. [20]

### 3.2.2 Metalurgický proces

Při bodovém svařování dochází k intenzivnímu vnášení tepla do malé oblasti, konkrétně v místě styku dvou elektrod se svařovaným materiálem. Zde dochází ke změnám odporu v závislosti primárně na teplotě a sekundárně na čase, jak je vidět na Obr. 10. [22]

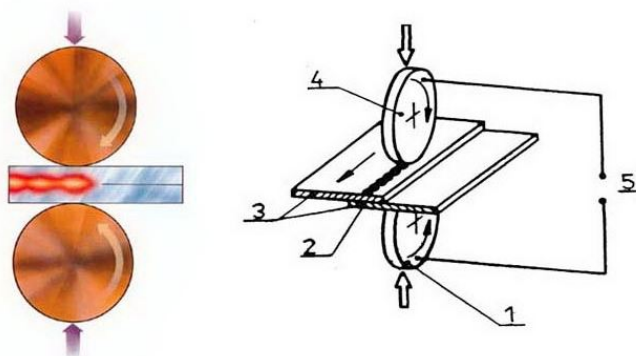


Obr. 10 Metalurgická změna odporu oceli v průběhu svařování [21]

Snahou je nastavit podmínky svařování tak, aby tavení nastalo v místě styku svařovaných materiálů a průvar by měl být ve tvaru čocky, jejíž tloušťka by neměla být větší než součet tloušťek svařovaných materiálů. Maximální průměr čocky by měl být 3,5násobek tloušťky materiálu. Velikost čocky je dána požadavkem konstruktéra na únosnost svaru. [22]

### 3.2.3 Švové svařování

Švové svařování je obdobné jako bodové svařování, funguje na principu odporového tepla s rozdílem, že elektrody jsou dva kotouče, které se odvalují po svařovaném materiálu, protéká jimi elektrický proud a stejným způsobem jako u bodového svařování se tvoří souvislý svar viz. Obr. 11. [23]

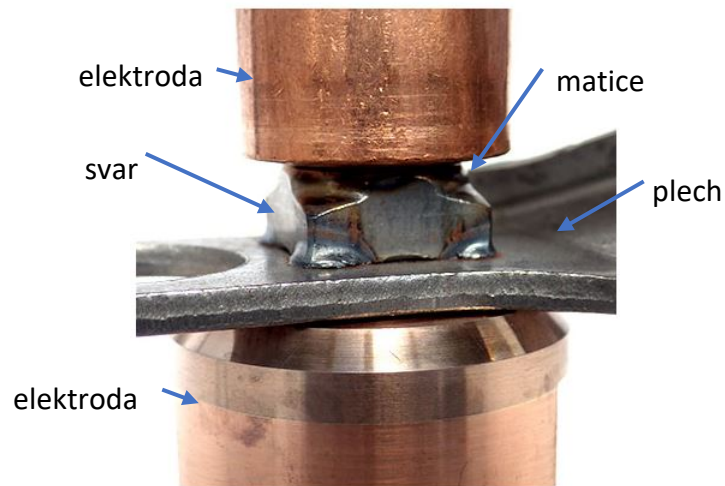


Obr. 11 Princip švového svařování, popis: 1 – přitlačná síla, 2 – švový svar, 3 – svařovaný materiál, 4 – kotoučová elektroda, 5 – zdroj proudu [23]

### 3.2.4 Výstupkové svařování

Výstupkové svařování je takřka totožné s bodovým, s rozdílem, že místo bodovacích elektrod se používají ploché, dále se musí udělat výstupky – buď přirozené nebo se vytváří umělé za účelem svařování na samotném spojovaném materiálu. Vhodné jsou různé výstupky

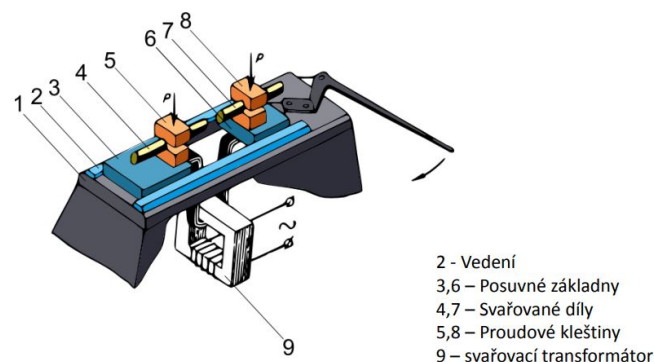
součástí jako jsou oblá zhloubení, podlouhlé hřebeny a zaoblené, či prodloužené rohy matice. V průběhu procesu svařování se tyto výstupky stávají kontaktem s největším odporem a při průchodu elektrického proudu se vytvoří svar, tzv. čochka. Oproti bodovému svařování má výhodu v tom, že svařované materiály se spojí ve vícero místech současně, např. při navařování matic v rozích matice. To lze vidět na Obr. 12. [23]



Obr. 12 Výstupkové svařování matice k plechu [24]

### 3.2.5 Stykové svařování

Stykové svařování se dělí na stykové a stykové s odtavením. Stykové svařování s odtavením je svařování, při kterém se svařované dílce dají k sobě, mezi nimi vznikne elektrický oblouk, který se přibližuje a oddaluje, dokud nedojde k natavení ploch a následným přitlačením vznikne svar. Stykové svařování je svařování, při kterém jsou dílce přitlačeny k sobě a následně se svaří za pomoci průchodu elektrického proudu a vzniklého odporu mezi svařovanými dílci, a to po celé styčné ploše. U odtavovacího způsobu se elektrický proud spíná ještě před přitlačením a teplo se vyvíjí především v oblastech jednotlivých styků mezi svařovacími plochami. Používá se např. při svařování řetězů, či pilových pásů, jak je vidět na Obr. 13. [23]



Obr. 13 Princip odtavovacího stykového svařování [25]

## 4 Způsoby monitorování svařovacích procesů

### 4.1.1 Úvod

Monitorování svařovacích procesů je velice užitečné pro pozorování a následnou analýzu průběhu procesu svařování, kdy lze vypozorovat nevhodně zvolené vstupní parametry svařovacího stroje, či neočekávané chování svařovaného materiálu. Monitorování svařovacích procesů lze realizovat několika způsoby.

### 4.2 Monitorování svarů za pomoci MKP

Dnes je velmi využívaná Termo-metalurgická vizualizace za pomoci MKP (Metody Konečných Prvků). Tato metoda je v dnešních dobách díky kvalitním softwarům, jako je např. ABAQUS čím dál tím přesnější.

#### 4.2.1 Vizualizace obloukového svařování za pomoci MKP

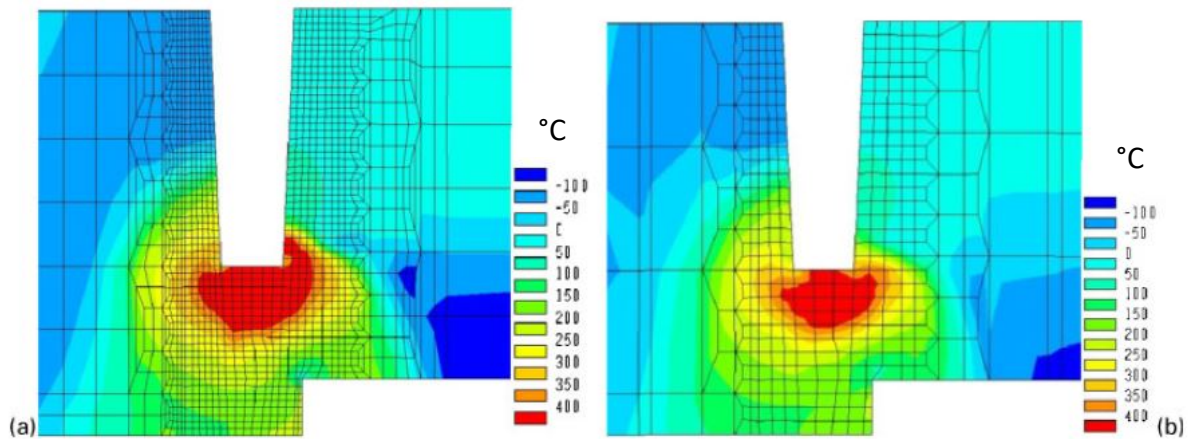
Při obloukovém svařování vznikají v materiálu **mikrostrukturální změny** – zbytková napětí a deformace, které jsou důležitým aspektem v následujícím chování při provozu nebo přímo při svařování. Proto jsou prováděny numerické studie tohoto procesu, aby byly zjištěny nežádoucí vlivy na požadovanou funkci svaru. První numerické simulace se začaly provádět na začátku 70. let minulého století, ale byly velmi náročné a dosti omezené tehdejší výpočetní technikou. V dnešní době, kdy je výkonnější počítačová technologie a je lepší povědomí o fyzikálních dějích, které se při procesu svařování dějí, je snazší simulovat tyto metalurgické změny. [26]

Zbytkové deformace a napětí pochází hlavně z teplotních gradientů a metalurgických přeměn objevujících se během procesu. Numerická studie musí vzít v úvahu vztah mezi přenosem tepla a metalurgickou změnou se vzniklými napětími a deformacemi. Pro dobré výsledky je za potřebí znát vlastnosti svařovaného materiálu. [26]

Analýza přestupu tepla spočívá v řešení klasické tepelné rovnice s vhodně zvolenými okrajovými podmínkami. Příkon tepla je reprezentován dvojitými elipsoidními zdroji tepla navrženými zpočátku k modelování středně energetického svařování s přídavným materiálem. V modelech se obvykle nezohledňují elektrický oblouk a analýza dynamiky roztaveného kovu ve svarové lázni, ta je nahrazena zvýšením termiky vodivosti. Vlastnosti materiálu jsou závislé na fázi a teplotě, s tím jde ruku v ruce tepelná vodivost, hustota a entalpie. [26]

Nejvhodnější výpočetní metodou je metoda konečných prvků (MKP), kdy je výpočetní model rozdělen do  $x$  malých dílků, mezi kterými jsou vypočítávány, dle daných vztahů, přenosy tepla. MKP nejlépe ukazuje, kde jsou na součástích největší zbytková napětí a přetvoření v důsledku svařovacího procesu. Problémem při síťování simulace je rozložení hustoty sítě, kdy v místě budoucího svaru jsou největší teplotní gradienty, tudíž je zde nutno zvolit jemnější vzorkování, a naopak v místech vzdálených od svaru může být vzorkování řidší, jak je vidět na Obr. 14. [26]

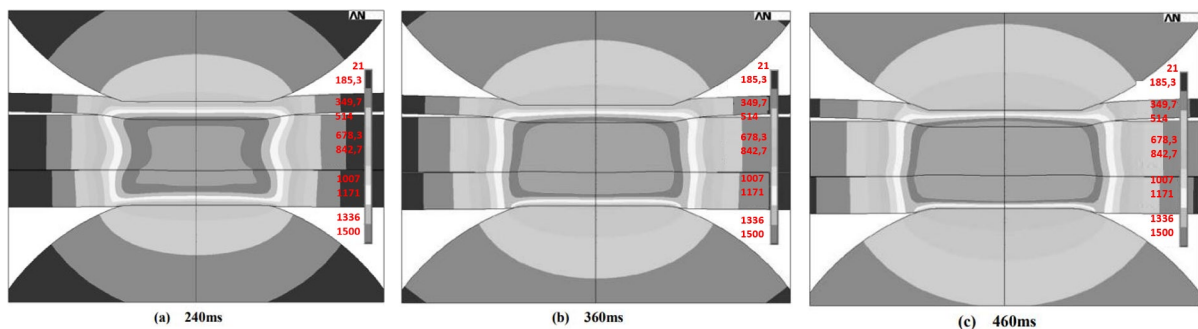




Obr. 14 Vizualizace přenosu tepla metodou konečných prvků obloukového svařování [26]

#### 4.2.2 Vizualizace odporového bodového svařování za pomoci MKP

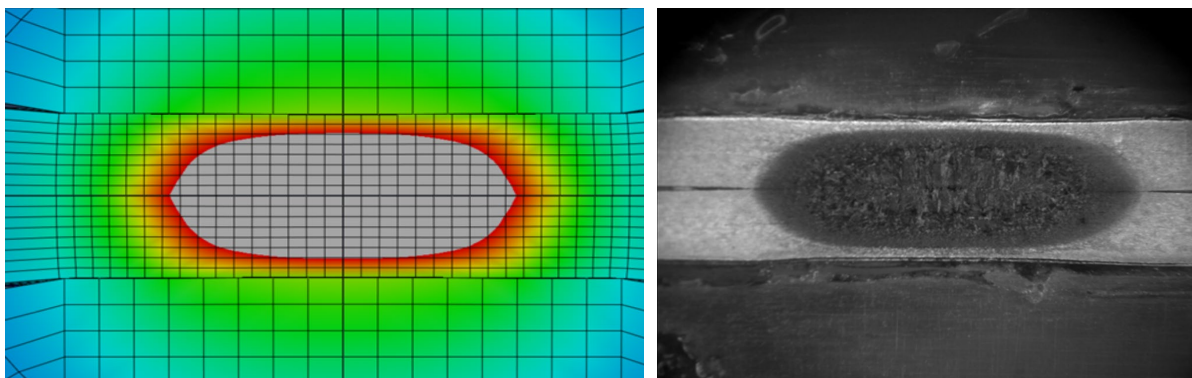
Pomocí vizualizace jde také předvídat, jak se přenáší teplo při spojování tří různě tlustých dílců (plechů) a následné vytvoření svarové čočky viz. Obr. 15. Ovšem skutečnost této simulace se musí ověřit experimentem. Na obrázku lze také vidět, jak je to s přenosem tepla v průběhu času a při použití tlačné síly 5,5 kN, kdy je dobře vidět, že materiály bez ohledu na jejich různou tloušťku se mezi plechy vytvoří celistvá, jednolitá svarová čočka. Je zde taktéž vidět, že průvar je dostatečně velký a měla by být poskytnuta maximální únosnost svaru. [27]



Obr. 15 Svařování tří dílců v různém čase tvorby svaru [27]

Tato vizualizace odporového bodového svaru za pomoci MKP slouží k představě tvorby svarové čočky a velikosti tepelně ovlivněné oblasti a lze zde vidět taktéž deformaci svařovaného materiálu v průběhu svaru. [27]

Lee a kol. zkoumali vliv vstupních parametrů svařovacího stroje na výslednou velikost svarové čočky a následné porovnání simulace s experimentem. Jako hlavní vstupní rovnice, které byly do softwaru zadané jsou Maxwellova rovnice zachování náboje a rovnice tepelné energetické bilance. [28]



Obr. 16 Svařování dvou plechů vizualizované za pomoci MKP (vlevo), ověření simulace experimentem (vpravo) [28]

Na Obr. 16 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** jsou vidět výsledky studie, kdy jako hlavní vstupní parametr svařování byl svařovací proud 5 000 [A]. Simulace a následné experimenty byly prováděny i pro jiné svařovací proudy a byly zkoušeny i různé chybové vlivy, jako je svařování v blízkosti jiných svarů a vzniku tzv. šuntování, viz. experimentální část. [28]

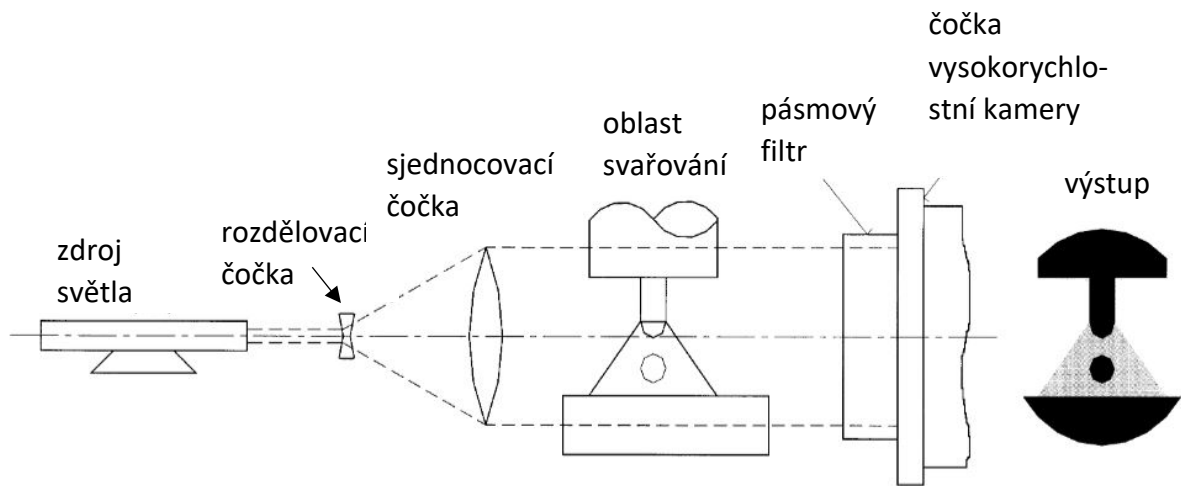
Výsledky této studie byly uspokojivé. Lee a kol vytvořili velmi přesné simulace, které pak byly porovnávány se skutečnými svary provedené stejnými parametry a odchylky ve velikostech simulované a vytvořené svarové čochky nepřesahovaly 5%. [28]

#### 4.2.3 Shrnutí MKP

Pro vizualizaci přenosu tepla u odporového svařování lze použít pro ověření simulace z MKP softwaru vysokorychlostní kamery. Ta má oproti MKP má nevýhodu, že čochku svaru je nutné umístit na kraj svařovaných dílců, aby to šlo zachytit a závisí taktéž na okolních podmínkách, což ovšem přiblíží proces reálnému stavu. Zatímco MKP tento proces může simulovat pouze v ideálních podmínkách.

### 4.3 Vizualizace svařovacího procesu skrze stínovou grafiku

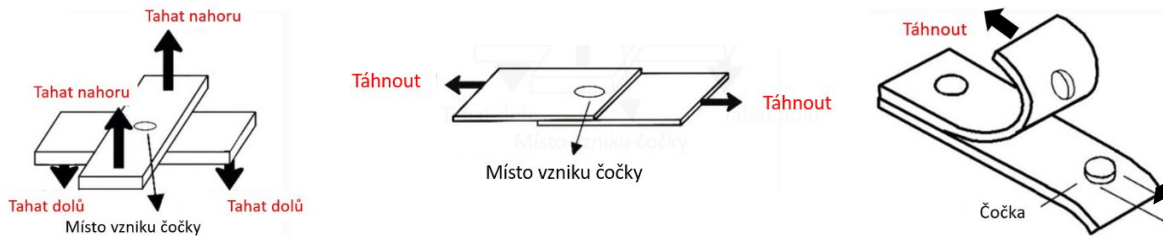
Termín stínová grafika se používá k označení promítaného stínu několika prvků ve svařované oblasti - elektroda, hořák, kapka (je to kapka roztaveného kovu, která vznikne při dotyku drátu svařovaného dílce a spojením oblouku, kdy se drát roztaví a oddělí se od toho kapka roztaveného kovu, která se spojí se zbytkem svarové lázně) a svarová housenka na rovném povrchu technikou, známou jako černé – záření (Obr. 17 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Jelikož je světlo vyzařované z oblouku příliš intenzivní a vyzařuje se všemi směry (nejde při tom získat stín), je tedy za potřebí dalšího zdroje světla, obvykle červeného s vlnovou délkou kolem 634 nm, což odpovídá slabé oblasti světla obloukového spektra (280 ÷ 700) nm. Tímto postupem pak lze nahrát požadovaný obraz na digitální kameru. [29]



Obr. 17 Princip stínové grafiky aplikované na svařování [29]

#### 4.4 Monitoring kvality svaru destruktivními zkouškami

Odporové svařování, jak je zmíněno výše, je velmi zastoupeno při automatizaci svařování např. v automobilovém průmyslu. Nevýhodou je nemožnost kontroly kvality svaru kvůli jeho nepřístupnosti. Není na první pohled vidět rozdíl mezi dobrým a špatným bodovým svarem. Kontrolu svarů je tedy nutno provést destruktivními zkouškami, jako je odlupovací zkouška nebo zkouška smykem. Jejich nevýhoda je ovšem tkví v tom, že jsou časově náročné a nákladné. Kontroly se provádí na omezeném počtu vzorků. Pokud zkouška na jednom vzorku odhalí závadu, musí se vyřadit celá série, protože není zaručeno, že zbytek svarů splňuje správné požadavky, aby plnil svou funkci. [30]



Obr. 18 Destruktivní zkoušky bodového svařování – křížovým tahem (vlevo), smykem (uprostřed) a odlupováním (vpravo) [30]

Otázka vyhodnocení kvality bodového svaru je dlouhodobým problémem, který je nejjistější stále řešit destruktivními zkouškami (Obr. 18), ale byly vyvinuty další metody kontroly svaru. Např. jedna je závislá na vstupním nastaveném výkonu (svařovacího proudu a napětí na kontaktní ploše elektrody). Jiná je závislá na mechanických vlastnostech svařovacího stroje jako je dynamické posunutí elektrody, aplikované síly elektrody a akustické emise svařování, dále ultrazvuk, či termografie. [30]

#### 4.5 Metody monitorování bodového odporového svařování za pomoci vysokorychlostních kamer

Dalším progresivním způsobem je monitorování svařovacího procesu za pomoci vysokorychlostních kamer. Díky analýze dat pořízených vysokorychlostní kamerou by se měly dát lépe odladit svařovací parametry, a tím zlepšit kvalitu svaru, a to jak u konvenčního

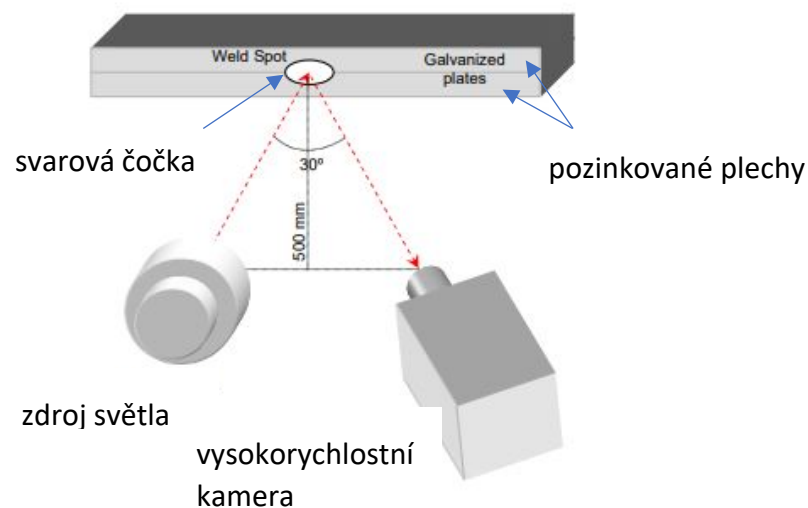
svařování elektrickým obloukem – např. metodou MAG (Metal Active Gas, česky svařování kovů v aktivním plynu) nebo u odporového bodového svařování.

Vizualizace přenosu kovů při svařování vyžaduje dobré vybavení, které je schopné zachytit pohyb kovu při vysokých rychlostech. Nevýhoda při použití vysokorychlostního fotoaparátu je, že se zachytí jen určitý stav svaru, proto je mnohem výhodnější použít vysokorychlostní kamery, která umožní udělat si obrázek o celém procesu. Problém by mohl nastat s nízkou kvalitou rozlišení u vysokorychlostní kamery.

Způsob monitorování svařování elektrickým obloukem a odporového svařování se výrazně neliší, jen s ohledem na to, že obloukové svařování je kinematický proces (z pohledu svařovacího stroje) a je zde pohyb elektrody po svařovaných dílcích, za to odporové svařování je statické (pozn. samotné svařování, tj. svarová lázeň je proces dynamický).

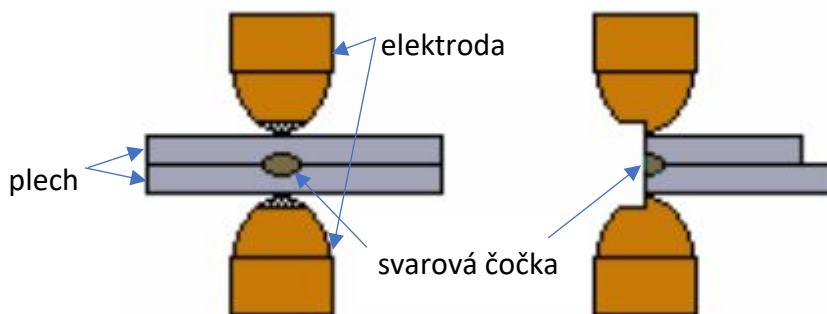
#### 4.5.1 Zobrazení svarové čočky vysokorychlostní kamerou

Sestava se skládá ze zdroje energie, odporového bodovacího svařovacího stroje, vysokorychlostní kamery a externího osvětlení (Obr. 19). [31]



Obr. 19 Experimentální postup při natáčení [31]

Varga a kol. prováděl tento experiment, kde byla použita na snímání tvorby svarové čočky snímkovácí frekvence vysokorychlostní kamery 1000 sn/s a rychlost závěrky 1/6000 s. Elektrody mají vnější průměr 16 mm, jsou kulového typu s tvrdostí 75 HRB (tvrdost dle Rockwella) jak je znázorněno na Obr. 20. Je nutno situovat kontaktní plochy plechů na jednu stranu, aby bylo možno zachytit průběh svaru, jak je vidět na Obr. 20 (vpravo). [31]



Obr. 20 Plechy a elektrody [31]

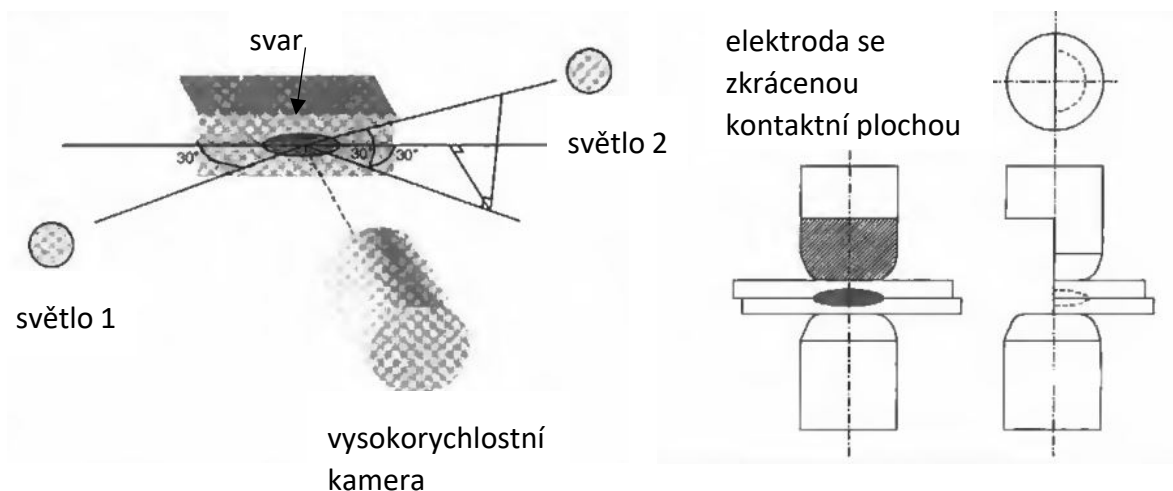
Pro vizualizaci bylo vybráno 5 podmínek svařování, kdy byly měněny hodnoty proudu a napětí a bylo zkoumáno, co se stane s pozinkovanými plechy, které byly odporově svařeny. [31]

V experimentu Vargy a kol. přišli, že zinková povrchová úprava se postupně z povrchu plechů v místě svaru opaluje a zinek prakticky shoří. Množství shořelého zinku je tedy úměrné počtu period svařovacího proudu (svařovací stroj byl střídavý) a to, čím víc period, tím víc shořelého zinku. [31]

Další studie, která se zabývá zobrazením svarové čočky vysokorychlostní kamerou je pokus CHO a kol. Ti využili vysokorychlostní kameru pro monitorování odporového svařovacího procesu a pro nalezení vztahu mezi tvorbou čočky a svařovacími parametry. [32]

Experimentální postup byl rozdělen do tří fází – proces svařování, monitoring růstu svarových čoček a monitorování parametrů svařování. Byl použit osvětlovací systém, kde jsou dva světelné zdroje z důvodu efektivnějšího rozptýlení odrazu světla. [32]

Uspořádání experimentu je popsáno na Obr. 21 (vlevo). Pro zachycení tvorby svarové čočky bylo použito rozlišení 256x240 pixelů a záznamová rychlost byla použita 1000 sn/s. Parametry osvětlení jsou velice důležité pro správné monitorování – byly použity 2 halogenové žárovky s příkonem 40 W, které jsou znázorněny na Obr. 21 (vlevo). Pro tento experiment byla navržena speciální elektroda, která je znázorněna na Obr. 21 (vpravo). Elektroda má kulovitý tvar se špičkou o průměru 6 mm a je z jedné strany ofrézována do půlky. Jako svařovaný vzorek byly použity 2 plechy z nelakované oceli o tloušťce 1,4 mm a svar byl posunut na okraj plechů. [32]

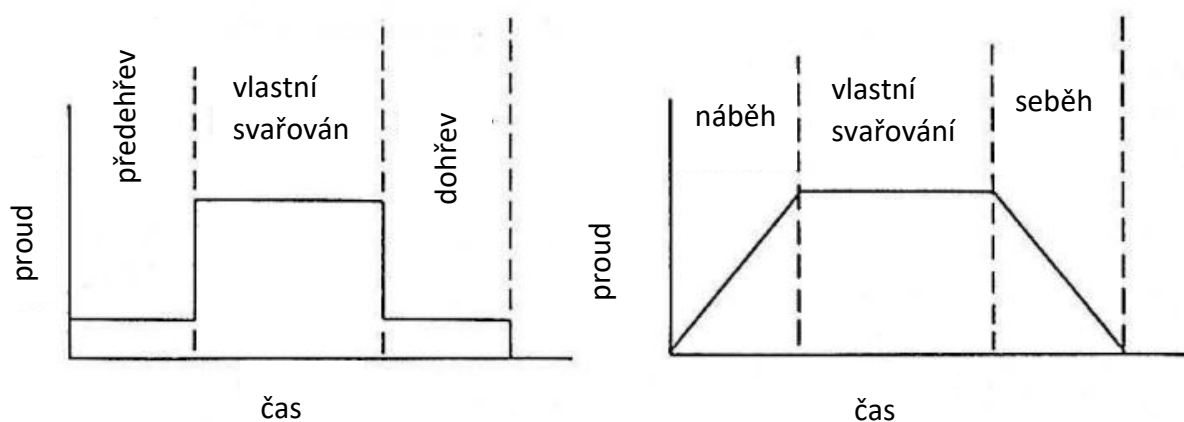


Obr. 21 Schéma rozmístění komponentů monitorování (vlevo), poloviční řez schématem elektrody (vpravo) [32]

Výsledkem této studie bylo nalezení spojitosti mezi dynamickým odporem a parametry svařovacího procesu. Přišlo se na to, že dynamický odpor je v přímé korelaci se vstupními veličinami svařovacího stroje, jako síla elektrod, svařovací proud, čas svařování a materiálové charakteristiky. [32]

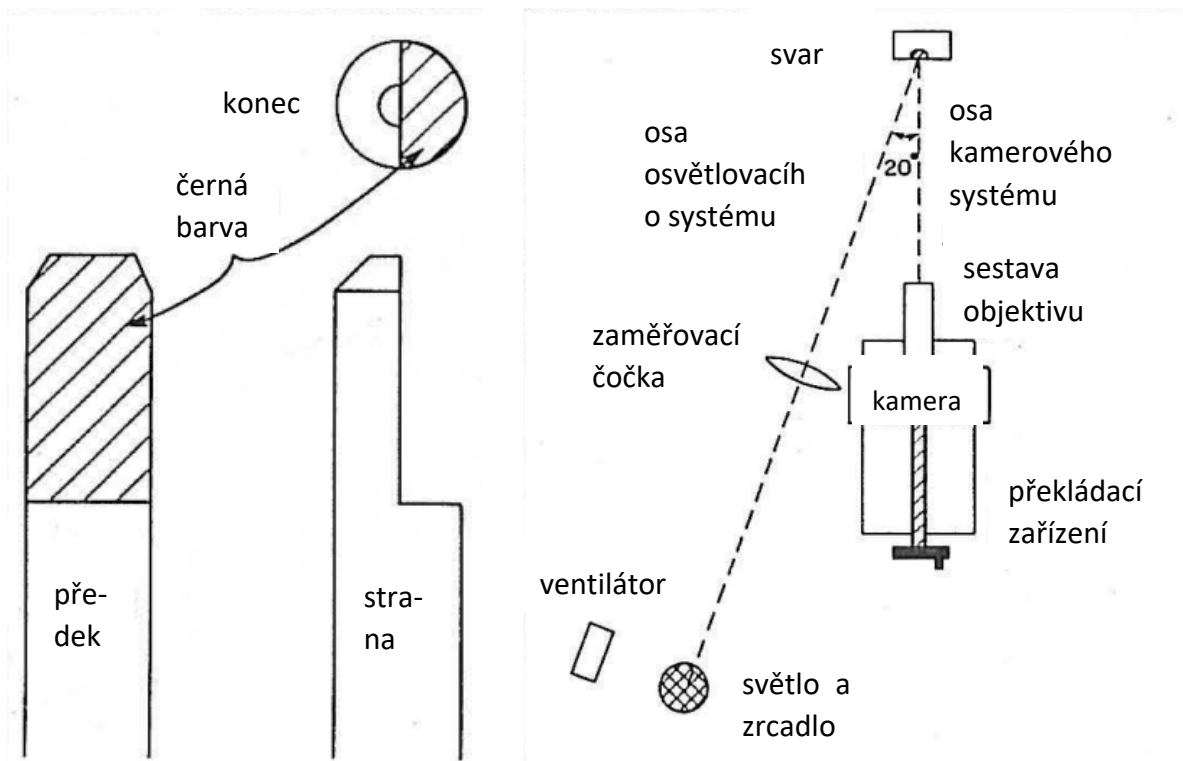
Jiná studie je od LANE a kol. Jak je již zmiňováno výše, odporové bodové svařování je rozšířené v automobilovém průmyslu z důvodu snadné automatizace a LANE a kol. řešili problém se svařováním pozinkovaných plechů, které jsou dnes již běžně používány na karoserie aut. V této studii od LANE a kol. byla zkoumána následující 3 témata:

- 1) jevy spojené s tvorbou svarové čočky během svařování bez použití svařovací modifikace (Zde modifikovali svařovací cyklus – skoková změna a pozvolná změna svařovacího proudu. Pro monitorování tvorby čočky použili vysokorychlostní kameru (Obr. 22)).
- 2) Způsob, kterým modifikace proudu před a po svařování ovlivňuje tvorbu svarových čoček během svařování.
- 3) Rozdíly ve formování svarové čočky mezi rozdílnými formami proudu během svařování.



Obr. 22 Modifikace svařování – ohřev (vlevo) a chladnutí (vpravo) [33]

Elektroda použita v experimentu byla ofrézována z původního tvaru komolého kužele na polovinu, jak je vidět na Obr. 23 (vlevo). Z tohoto důvodu musely být upraveny parametry svařování na polovinu. Jako svařovaný materiál byl použit pozinkovaný ocelový plech o tloušťce 1,3 mm. Na monitorování byla použita vysokorychlostní kamera s rotujícím hranolem a pro zachycení byla použita snímkovací frekvence 2400 sn/s. Osvětlovací systém byl konstruován kolem vertikálně montované projekční lampy s vestavěným parabolickým reflektorem Obr. 23 (vpravo). [33]



Obr. 23 Rozvržení experimentu [33]

Celá sestava je znázorněna na Obr. 23 (vpravo). Pro snížení oslnění světlem je světlo pootočené o 20° od osy kamery. A během natáčení byl umístěn zdroj stlačeného vzduchu do svaru, aby plyny uvolňované z pozinkovaného plechu nezneškodnocovali svar a ochránili čočku kamery od odletujících částí svarové lázně. [33]

Výsledky této studie jsou velmi přínosné zejména pro sériové a velkosériové výroby, kde je nutno zhotovovat velký počet svarů. Hlavní poznatky jsou, že modifikací proudu se může zlepšit tvorba svarových čochek. Taktéž modifikací předsvařovacího proudu lze napomoci jednotné iniciaci tvorby svarových čochek. A dále se zjistilo, že úprava proudu před vznikem svaru a po zhotovení svaru je velmi výhodná. [33]

Dalšími výsledky jsou, že prodloužením doby trvání aktuální modifikace (tj. držení stejných parametrů svařovacího stroje) zvyšuje přínosy ve smyslu zlepšení kvality svarů na úkor klesajících výnosů. Při daném výkonu poskytují dlouhodobé (nizkoproudé) svary lepší

svarové čočky než krátkodobé (vysokoproudé) svary. Fenomén periferního těsnění zlepšuje tvorbu svarových čoček a je zesílen úpravou proudu před svařováním a delší dobou trvání svaru. Dále se předpokládá, že geometrie hrotu elektrody a rozložení proudu významně ovlivňují tvorbu prstencové roztavené zóny a periferního těsnění. [33]

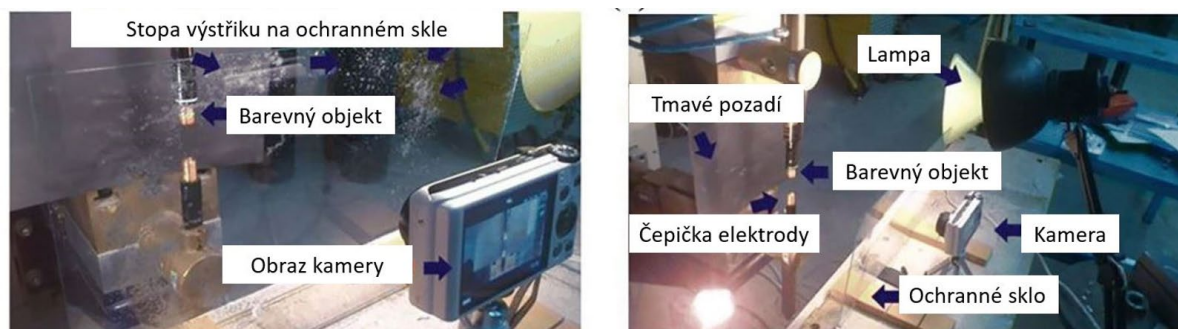
#### 4.5.2 Monitoring kvality svaru na základě posunutí elektrody

K řešení tohoto problému lze použít monitorování bodového svařování pomocí vysokorychlostní kamery, kdy se sleduje právě posunutí elektrody, což poskytuje vhodné informace o probíhajících událostech během odporového svařování. Posunutí elektrod je jev, který nastává vlivem tepelné roztažnosti ohřívajícího materiálu, kdy materiál, který se v čočce ohřeje se roztahuje, a to vede k pohybu elektrod, který může zachytit vysokorychlostní kamera. [30]

Další možností použití je bezkontaktní laserové snímače polohy. V porovnání s jinými metodami má tato metoda monitorování výhodu v tom, že je stejně jako vysokorychlostní kamera bezkontaktní, a tudíž není ohrožena bezpečnost pracovníka a lze to provádět na všech svarech, nejen na několika vybraných, které jsou určeny ke zničení. [30]

Ve studii N. Haghshenase & H. Moshayedihho z roku 2019 byla použita pro experiment austenitická nerezová ocel, o tloušťce 1 mm. [30]

Posuvy elektrod byly následně odečteny ze záznamu na základě snímkové rychlosti 120 sn/s s rozlišením 640x480. Rozložení experimentu je vidět na Obr. 24. [30]



Obr. 24 Rozložení návrhu experimentu [30]

Posunutí elektrody poskytuje užitečný signál pro sledování kvality svařování. Dokáže odhadnout tepelnou roztažnost plechů ve fázi svařování, taktéž sleduje dobu tavení a vytlačení kovu během bodového svařování. Je zde velké množství faktorů, ovlivňujících specifikaci posunutí elektrody jako jsou parametry svařování, stav povrchu plechů (rez, povrchová úprava, očištění, ...) a degradace elektrod. [30]

V závěru této studie byly výsledné křivky, které byly získané z experimentu vyhodnocovány a došlo se k následujícím výsledkům. Prodloužením doby svařování způsobil strmý nárůst posunutí, což ovlivní i velikosti svarové čočky. Se zvyšujícím se proudem je generované teplo ve svařovací struktuře vyšší, z toho vyplývá, že změny v posunu a velikosti svarové čočky jsou stejné, jako když se prodlouží doba svařování. Zvýšení tlaku, tj. síly stisku má za následek snížení přechodového odporu, takže se očekává, že svar bude mít méně



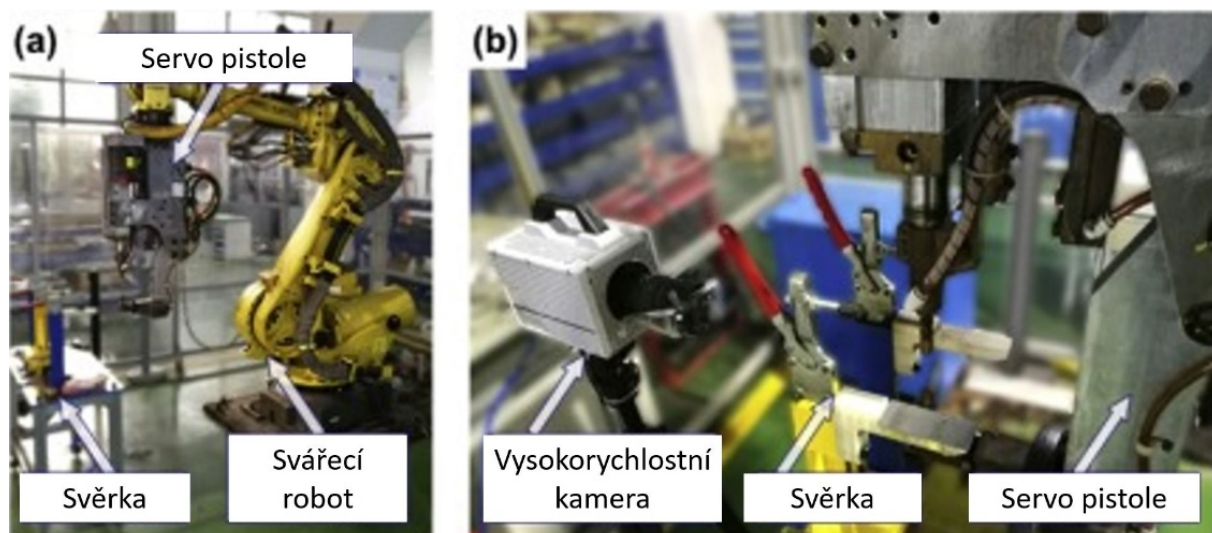
tepelné energie, a tudíž menší čočku, jak potvrzují výsledky. Na základě těchto výsledků byl vytvořen učící se algoritmus, který na základě vstupních a výstupních parametrů je schopen posunout elektrody předpovídat a vyhýbat se mu. Uživatelské rozhraní je založeno na neuronové síti, kdy je obsluha schopna regulovat hustotu dané sítě a tím korigovat jednotlivé výsledky. [30]

#### 4.5.3 Monitorování rozstříku kovu při odporovém bodovém svařování

Rozstřík znamená vypuzování (vytlačení) části roztaveného kovu ze svarové lázně během odporového svařování vlivem přitlačné síly. Je to univerzální problém v automobilovém průmyslu, kde na jedno automobil průměrně připadá kolem 5 000 bodových svarů (závisí od typu a modelu auta). Výskyt rozstříku zpravidla vede ke ztenčení svaru a ke vzniku dutiny uprostřed svarové čočky a tím způsobuje nezanedbatelnou snížení pevnosti svaru. V technické praxi se používá tvrdý svařovací režim (vysoký svařovací proud a krátký čas), který je těsně pod limitem vytlačení a když nastane abnormalita v procesu jako opotřebení elektrody, špatné slícování svařovaných dílců a svařovaných hran, vede to k rozstříku. Navíc rozstřík je spojen s ulpíváním části svarové lázně nejen na svařovaných dílcích, ale i na svařovacím stroji a daný povrch tak degraduje. [34]

Běžný způsob zaznamenávání informací pro následné upravení vstupních parametrů pro svařování jsou – elektrické signály (napětí, příkon a dynamický odpor), mechanické signály (síla, posunutí a vibrace elektrody) a akustické signály (akustické emise a ultrazvuk). Když dojde k rozstříku kovu, všechny tyto signály změni svoji hodnotu ať už zvýšením nebo snížením. Ale souhrn těchto ukazatelů není dostatečně podpůrný k jednoznačnému určení, proto se zavádí monitorování jednotlivých svarů za pomoci vysokorychlostní kamery, kde je to jasně patrné. [34]

Například Xia a kol. ve svém experimentu z roku 2019 byly použity 4 vzorky ocelových plechů o tloušťkách 0,7; 1,0; 1,2 a 1,6 mm. [34]



Obr. 25 Rozvržení experimentu [34]

Pro vizuální záznam byla použita vysokorychlostní kamera. Natáčení probíhalo v rozlišení 1024x1024 pixelů při snímkovací rychlosti 4 000 sn/s. Časový interval mezi snímky byl 0,25 ms. Rozvržení celého experimentu lze vidět na Obr. 25. [34]

Výsledky této studie jsou následující. Korelace neboli spojitost mezi hloubkou vtisku elektrody do plechů a velikostí vytlačené oblasti elektrodou není vhodné k identifikaci výskytu rozstříků. Dále velikost signálů náhlého poklesu síly a posunutí pohyblivé elektrody při rozstříku je úměrná množství rozstříknutého materiálu. Poslední poznatek je, že vzhledem k charakteristice systému servo pistole je náhlý pokles síly přibližně v lineárním vztahu s náhlým zmenšením tloušťky obrobku a převodem signálních znaků na hmotnost vytlačovaného kovu lze dosáhnout online kvantitativního vyhodnocení vytlačení svaru. [34]

#### 4.6 Jiné způsoby monitorování svařování

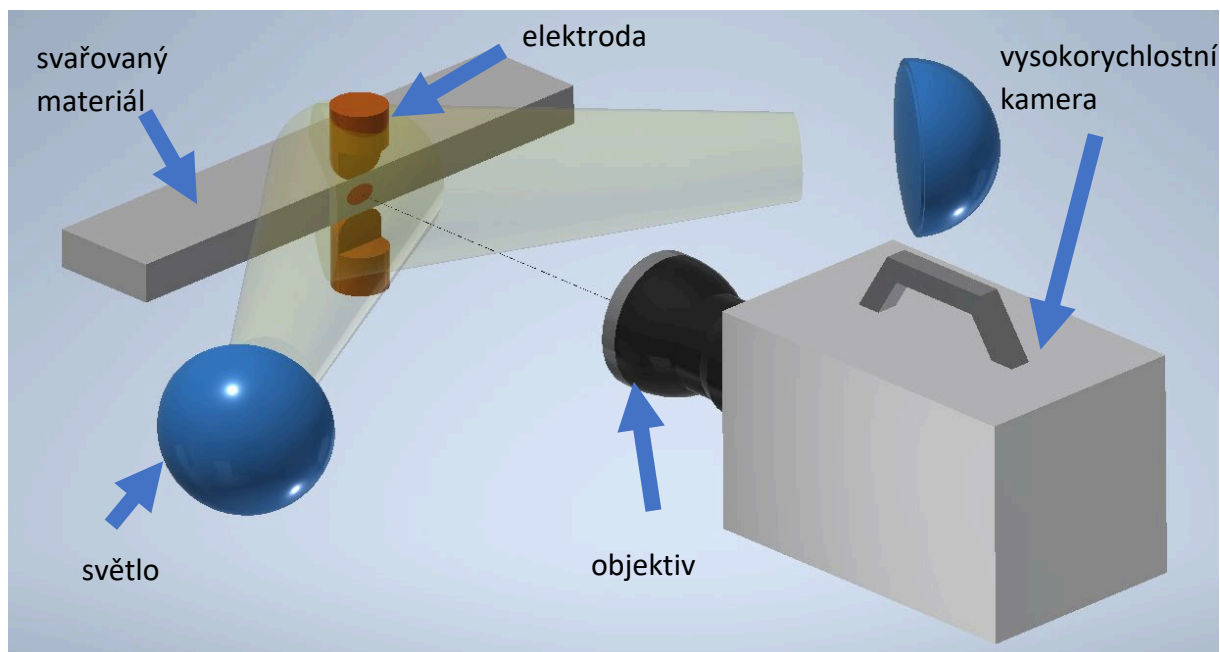
Jiným způsobem může být infračervená termografie. Termografie je monitorovací metoda založená na snímání infračerveného záření, které je vyzařováno povrchem ohřátých těles. Tato metoda je vhodná v aplikacích, kde je teplota hlavním parametrem, ať už při monitorování kontrole tepelných úniků z budov, hledání poškozeného elektrického vedení, kontrola zatížení motorů, ložisek nebo brzd automobilů a dá se taktéž využít pro monitoring svařovacího procesu.

Dalším způsobem může být monitorování za pomoci analýzy svařovacích parametrů, které se v průběhu upravují a tím se lze vyvarovat skrytých vad. Pro monitoring lze taktéž použít mechanického odčítání posuvu elektrody, které se vstupními hodnotami ze svařovacího stroje dokáže zlepšit kvalitu svarů.

## 5 Návrh uspořádání stanoviště a použitá zařízení

### 5.1 Popis uspořádání stanoviště

Experiment je inspirován výše popsány experimenty, ze kterých byly vzaty potřebné informace k provedení vlastního experimentu. Počáteční rozvržení experimentu bylo obdobné jako u CHO a kol. [32] Ovšem byly provedeny některé úpravy v osvětlení pro lepší viditelnost svaru během natáčení a bylo také nutno použít ochranné prostředky. Konečné teoretické rozvržení experimentu je možno vidět na schématu na Obr. 26.



Obr. 26 Schéma rozvržení experimentu bez ochranných prostředků

## 5.2 Popis jednotlivých komponent experimentální sestavy

Komponenty použité v experimentu by se daly rozdělit do čtyř skupin – svařovací zařízení, monitorovací systém, osvětlení a ochranné prvky.

- 1) **Svařovací zařízení** – složení jednotlivých komponent níže
- 2) **Monitorovací systém** – skládá se z vysokorychlostní kamery, objektivu a řídicího počítače
- 3) **Osvětlení** – skládá se ze dvou světelných zdrojů
- 4) **Ochranné prvky** – skládá se z ochranného sklíčka na ochranu objektivu kamery a silnostěnného alobalu

## 5.3 Svařovací zařízení

### 5.3.1 Elektrody

Před započítím experimentů bylo nutno **obrobit měděné elektrody** z důvodu, aby při monitorování na okraji plechů bylo možno kvalitně snímat vznik svarové čočky. Kulová elektroda o  $\varnothing 16$  mm s průměrem plošky na vrcholu elektrody 5 mm byla ofrézována do půlky (Obr. 27) a výška odebraného materiálu byla 6, 4 a 2 mm. Byly zhotoveny 3 páry elektrod o různých výškách, ale nakonec se ukázalo, že to nemělo na výsledek experimentu žádný vliv. Ofrézované elektrody se během odlaďování svařovacího procesu opotřebovávali rychleji než elektrody neupravované, a proto se musely často očišťovat brusným kamenem a poté i vyměnit. Po použití byly elektrody (Obr. 27) zřetelně otačené ve stykovém místě a vznikalo často natavení svaru na elektrodě.



Obr. 27 Použité elektrody

### 5.3.2 Svařovací stroj

Pro experiment byl použit svařovací stroj je PMS 11-4 od firmy Dalex. Svařovací stroj je vybaven učícím se algoritmem, který po třech opakováních svaru upravuje vstupní parametry ze zkušenosti z předešlého svaru tak, aby výsledný svar byl kvalitní a následně tyto hodnoty drží.

Tab. 1 Vybrané technické parametry svařovacího stroje [35]

Název	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon při (50 %)	100	kVA
Maximální svařovací výkon	392	kVA
Maximální zdvih elektrody	90	mm
Min./max. přítlak elektrody	1900/11400	N

### 5.3.3 Řídící počítač

Notebook spojený se svařovacím strojem, za pomoci něhož a monitorovacího a řídicího softwaru S.E.R., se měnily parametry vstupních veličin vstupujících do svařování.

## 5.4 Monitorovací zařízení

### 5.4.1 Vysokorychlostní kamera

Vysokorychlostní kamera je FASTCAM SA-Z od firmy Photron (Obr. 1). Ultra-vysokorychlostní FASTCAM SA-Z poskytuje megapixelové rozlišení obrazu až 1024x1024 pixelů při snímkové frekvenci až 21 000 snímků za sekundu ze svého na světlo vysoce citlivého obrazového snímače s **12bitovým dynamickým rozsahem**, který poskytuje dostatečný obrazový výkon pro experiment. FASTCAM SA-Z poskytuje snímkovací frekvenci vyšší než 2 miliony snímků za sekundu při sníženém rozlišení obrazu a rychlostech závěrky kratších než 159 nanosekund (může platit omezení exportu). Kamera použitá v experimentu byla v černobílé verzi, která má výhodu v tom, že video záznamy mají přijatelný datový objem v Gb.

I přes to, pokud bylo nastaveno velké rozlišení a vysoká snímkovací frekvence, tak záznam pořízený kamerou měl kolem 800 ms.

Tab. 2 závislost rozlišení na snímkovací frekvenci kamery SA-Z [36]

Rozlišení obrazu [pixely]	Snímkovací frekvence [sn/s]
1024x1024	20 000
894x896	25 000
768x512	50 400
512x384	87 500
512x256	120 000

#### 5.4.2 Objektiv

V experimentu byly zkoušeny 2 objektivy. Z počátku byl používán objektiv od firmy Nikon NIKKOR Z 24–200 mm f/4 6,3 VR viz. Obr. 28 (vlevo). Tento objektiv má rozmezí ohniskových vzdáleností 24 až 200 mm a 7 lamel clony [37]. S tímto objektivem se vyskytl problém, že pro kvalitní a ostré zobrazení svarové čočky byla vzdálenost od konce objektivu ke svařovanému plechu 5 cm a velikost zobrazené čočky byla stále příliš malá. Do prostoru zmíněných pěti centimetrů se musí vejít ještě ochranné sklíčko, které bylo určeno k ochraně objektivu. Dané sklíčko bylo přichyceno svěrkou, která držela na svařovacím stroji pomocí magnetického držáku. Potíž však nastala při svařování, docházelo k drknutí svařovacího stroje, resp. část s pohyblivou elektrodou do sklíčka, což způsobovalo mírné rozostření.

Proto byl zvolen druhý objektiv NIKKOR 85 mm f/1.8 AF-S G taktéž od firmy Nikon viz. Obr. 28 (vpravo). Tento objektiv má rozmezí ohniskových vzdáleností 85 až 128 mm a 16 lamel clony [38]. Což v praxi znamená, že lze lépe nastavit světlost, resp. tmavost obrazu a při doostření svaru byla vzdálenost mezi objektivem a svarem 12 cm, což už bylo dosti uspokojivé k provedení experimentu a velikost svarové čočky zobrazené na záznamu měla uspokojivou velikost.



Obr. 28 Objektiv NIKKOR Z 24-200 mm (vlevo) [37], NIKKOR 85 mm (vpravo) [38]

### 5.4.3 Mezikroužky

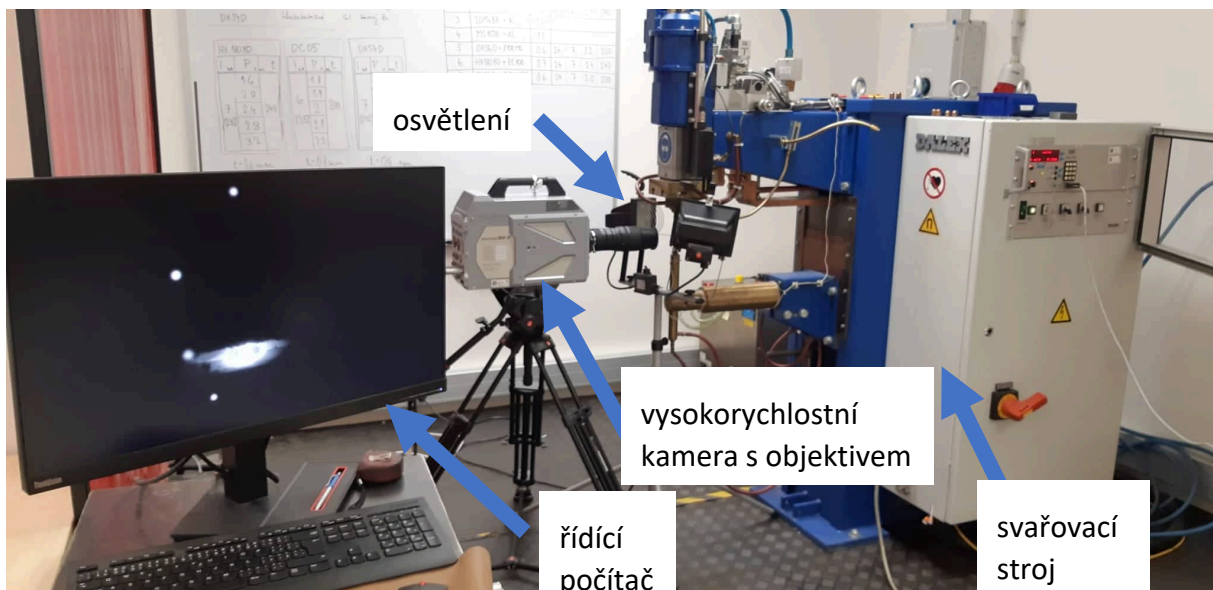
Při monitorování se před oba objektivy umísťovala trojice **mezikroužků** (12, 20 a 36 mm) MK-N-AF1\_A pro objektivy Nikon od firmy Meike, jak je vidět na Obr. 29. Mezikroužky (makrokroužky) se nasazují mezi tělo fotoaparátu (kamery) a objektiv. Oddálením objektivu od snímače je dosaženo velkého posunu zaostřovacího rozsahu. Důsledkem změny zaostřovacího rozsahu vzroste měřítko snímání (zvětšení) objektivu. [39]



Obr. 29 Mezikroužky Meike [39]

### 5.4.4 Řídící počítač

Kameru bylo nutno připojit na počítač pomocí síťového kabelu. Na počítači byl nainstalován program, kterým lze ovládat kameru – měnit snímkovací frekvenci, rozlišení, rychlost závěrky, aplikovat HDR a další. Přes daný program musela obsluha synchronizovat pořízený záznam s tvorbou svaru, jelikož nebyl k dispozici tzv. trigger (když stroj začne svařovat, záznam se spustí). S nastavenými parametry kamery (jako je rozlišení nebo snímkovací frekvence) byla délka záznamu cca 2,5 sekundy a tvorba svarové čočky trvá cca 250 ms. Do tohoto rozmezí se musela obsluha trefit.



Obr. 30 Sestava svařovacího, monitorovacího zařízení a osvětlení

## 5.5 Osvětlení

Pro kvalitní zobrazení svarové čočky je nutno externího osvětlení. To vnáší světlo do oblasti tvorby svaru, a to v kombinaci se ztmavením kamery, či objektiv (za pomoci clony), **sjednotí světlost v monitorované oblasti**, a tím lze vidět přímo do svaru – ohřev, svarová lázeň a chladnutí.

Při natáčení bez vnějšího světla, respektive jen se zářivkami v místnosti, navíc záznam narušovalo blikání způsobené napájením zářivek střídavým proudem o frekvenci 50 Hz.

Zprvu byl experiment osvětlován dvojicí halogenových světel velké velikosti, která ovšem nestačila. Bylo za potřebí více světla a více usměrněný kužel světla, aby byla větší koncentrace záření v místě svaru.

Nakonec byl experiment proveden s dvojicí taktéž halogenových světel, které ovšem měly větší příkon a více usměrněný kužel světla vedoucí přímo do svaru. (Obr. 30)

## 5.6 Ochranné prvky

Před kameru, resp. přímo před objektiv bylo umístěno ochranné sklíčko ze svářečské kukly (sklíčko je vyrobeno z hladkého skla, které v kukle slouží k ochraně obsluhy a zatmavovacího sklíčka, které překrývá, je odolné vůči polárním rozpouštědlům, to znamená, že jej lze snadno očišťovat). Sklíčko bylo za pomoci kleští a magnetického držáku připevněno ke svařovacímu stroji, jak je vidět na Obr. 31. Sklíčko má ochrannou funkci, která zajišťuje bezpečnost objektivu před odletujícími částmi svarové lázně, které vzniknou např. při špatném umístění svařovaného materiálu nebo při velkých vstupních parametrech svařovacího stroje.

Kamera a objektiv byly obaleny silnostěnným alobalem pro ochranu proti odletujícím částicám roztaveného kovu ze svarové lázně, či okují při špatně nastavených svařovacích podmínkách. Taktéž tam sloužily pro odstínění tepelného záření, které je vyzařováno osvětlením halogenových světel, které mají velký tepelný výkon.

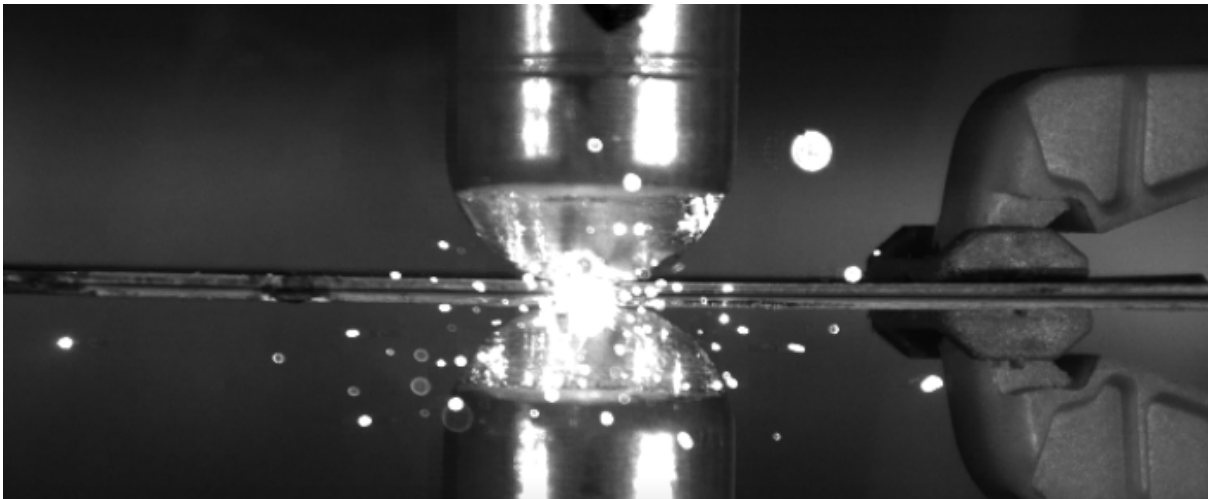


Obr. 31 Sestava s ochranným sklíčkem

## 6 Odladění svařovacího procesu

### 6.1 Potíže při odladování svařovacího procesu

Při odladování svařovacího procesu se naráželo na různé obtíže. Ze začátku byly nastaveny parametry svařovacího stroje **na polovinu** od optimalizovaných hodnot při svařování stejného materiálu neupravenými elektrodami. Musela být optimalizována elektrodová přitlačná síla pro nové podmínky, čas svařování, předehřev a proud. Při aplikování příliš velké síly elektrod a svařovacího proudu vznikaly problémy jako je nadměrný výstřik svarové lázně (Obr. 32). Při dlouhém čase průchodu proudu vznikal problém v tom, že svarová lázeň vlivem gravitace a jejího situování na okraji plechu (Obr. 35) začala padat a čočka byla špatně pozorovatelná.



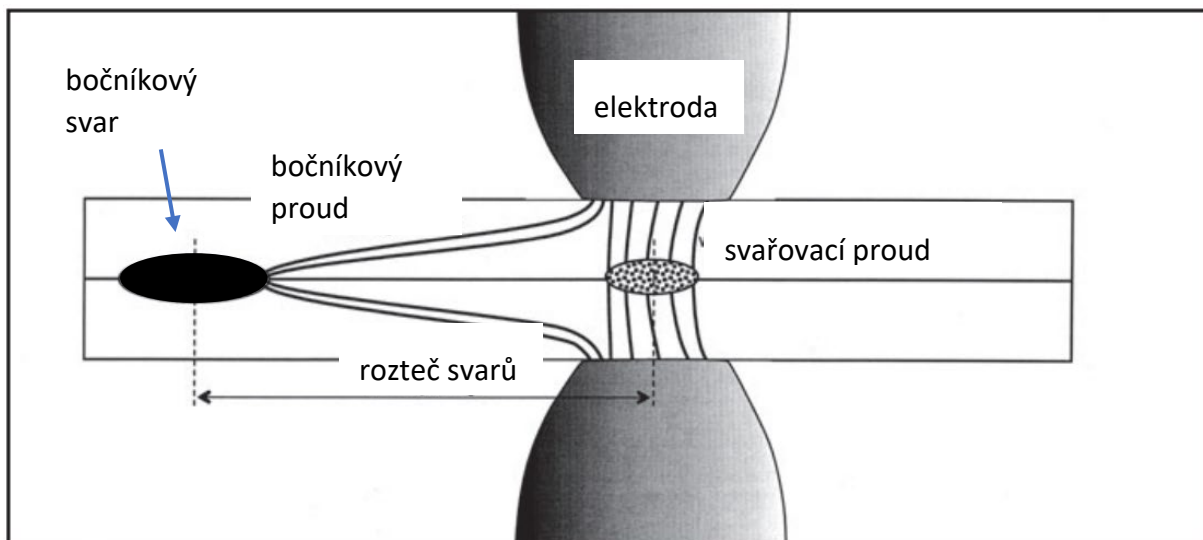
*Obr. 32 Výstřik svarové lázně*

Další obtíží bylo, pokud byly svary umísťovány vedle sebe a při průchodu elektrického proudu docházelo k vychýlení toku proudu směrem k hotovému svaru, tzv. shuntování.

V průmyslových aplikacích odporového bodového svařování jsou obvykle zhotovovány svary, které jsou blízko u sebe z důvodu konstrukčních a manipulačních účelů. Přítomnost již existujícího svaru blízko nově zhotovovaného může způsobit odbočení proudu směrem k již zhotovenému svaru. Tomuto fenoménu se obecně říká shuntování, jak je vidět na Obr. 33.

Největší vliv na vytvoření bočníkových svarů má jejich umístění vzhledem k ostatním svarům. Ovšem na shuntování má taktéž vliv chemické složení, tloušťka a mechanické vlastnosti materiálu, ze kterého jsou plechy vyrobeny. Dalšími vlivy, které mají vliv na shuntování jsou parametry svařovacího stroje a velikost elektrody, resp, její kontaktní plošky.  
[40]





Obr. 33 Schéma procesu shuntování [40]

To se povedlo i zobrazit na záznamu jednoho svaru, kdy byl plech umístěn mezi 2 již zhotovené svary a tok proudu se rozdělil na dvě cesty, každá k jednomu svaru, jak je vidět na Obr. 34. Svařovaným materiálem byly 2 galvanicky pozinkované plechy oceli DC05.

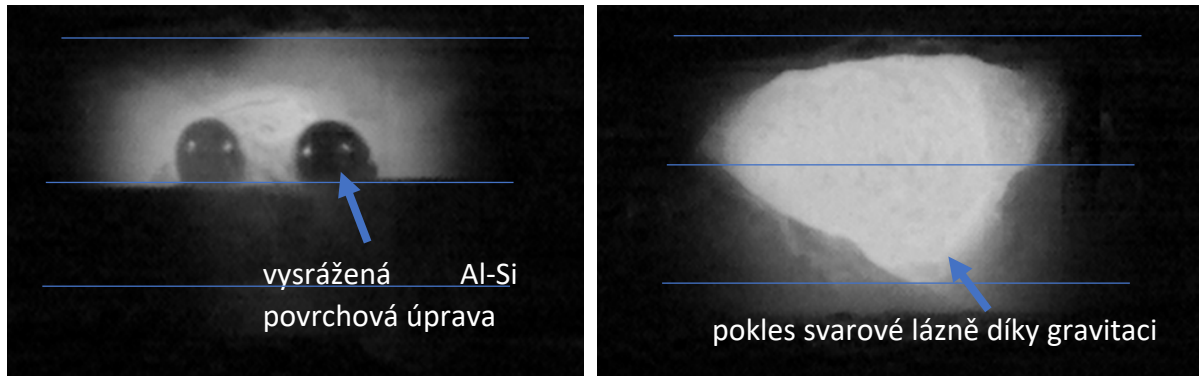


Obr. 34 Vliv odbočování proudu nebo-li shuntování

Následně u svařování plechů z oceli 22MnB5 se projevily nejvýrazněji dvě vady. Za prvé vytavování vrstvy povrchové úpravy Al-Si na povrch svarové čochky. Povlak Al-Si má oproti oceli 22MnB5 nižší teplotu tání, a to 600°C, zatímco 22MnB5 má teplotu tání okolo 1250°C. To lze pozorovat na Obr. 35 (vlevo). Je taktéž vidět, že vysrážený povlak, který je vlivem tlaku elektrod vytlačen ven z materiálu, začal již tuhnut, zatímco se zbytek materiálu se nezačal ohřívat. Za druhé se velmi projevilo posunutí elektrody, což znamená, že během tvorby svarové čochky se pohyblivá elektroda (v pokusu horní) pohybuje směrem do svarové čochky, a to může způsobit vznik výstřiků svarové lázně mezi svařované plechy (v případě pokusu nebyl kov vytlačen mezi plechy, ale do volného místa ven ze svarové čochky) a tím svar ztrácí celkovou pevnost. Elektrody svírají plechy stále stejnou silou, jen při tom, kdy se roztaví kov a při vystříknutí svarové lázně, když se kov uvolní, se stlačí. Vyvarování se posunutí elektrody by šlo zmenšením přitlačné síly elektrod nebo snížením svařovacích parametrů.

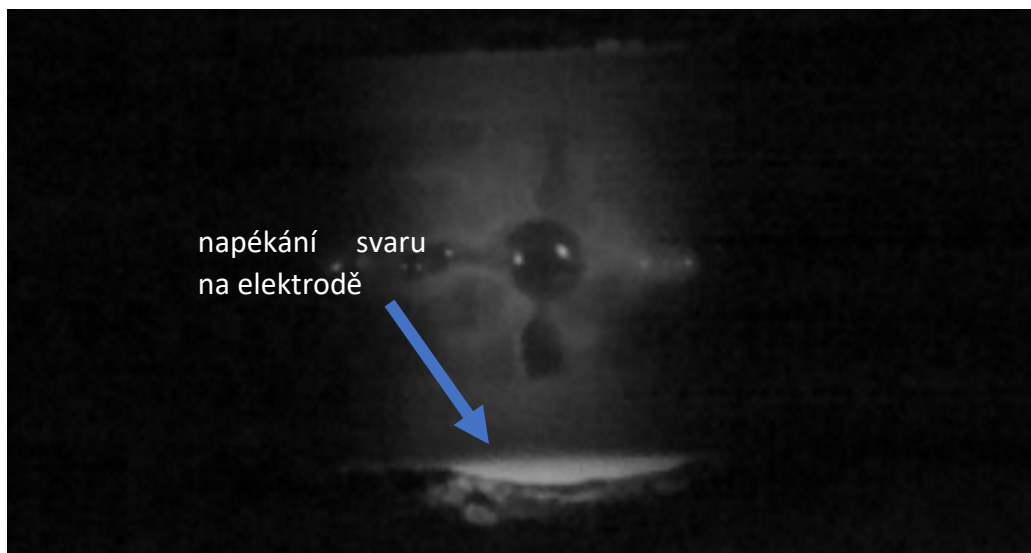
Na Obr. 35 (vlevo) lze taktéž pozorovat fyzikální jev, kdy směr tečení proudu (resp. elektronů) má směr **od záporného pólu ke kladnému**, což znamená, že z počátku je větší proudová hustota u kladné elektrody a tím pádem tam vzniká i větší Jouleovo odporové teplo

a plech se začne tavit jako první. U nějakých měření avšak bylo pozorováno, že se začal tavit jako první spodní plech. To mohlo znamenat, že elektrody nebo povrch materiálu byl znečištěn (např. mazivem) a tudíž tam byl větší odpor a daný plech se začal tavit jako první. V provedeném pokusu má svařovací stroj horní elektrodu s kladnou polaritou.



Obr. 35 Posunutí elektrody – počátek svařování vlevo a konec svařování (vpravo)

Dalším pozorovatelným jevem se stávalo napečení kovu na elektrodě, jak je vidět na Obr. 36. To je jev, kdy vlivem difuze prvků z povlaku do elektrody vzniká slitina s nižší teplotou tavení, tím dochází k lokálnímu navařování a při oddálení elektrod dojde k vytrhávání materiálu buď z elektrod, nebo ze svařovaného materiálu. Je způsobeno tím, že elektroda nebyla očištěna nebo na spodním plechu byl nános nějaké nečistoty a když začal téct elektrický proud, tak největší odpor vznikl mezi spodní elektrodou a spodním plechem, což způsobilo tavení svaru v označeném místě.



Obr. 36 Napékání svaru na elektrodě

### 6.1.1 Optimalizované hodnoty pro materiál DC05

Optimalizované hodnoty vycházely z optimalizovaných parametrů běžných svarů uprostřed plechu s plným průřezem kontaktní plochy. Díky zmenšení kontaktní plochy se zvýšila proudová hustota, která souvisí v neseném teplem, a to ve výsledku bylo stejné, jako při tvoření svaru plnými elektrodami. Nakonec se muselo teplo vnesené do svaru zmenšit kvůli situování svaru na okraji plechů.

DC05 (1.0312) je hojně používaná hlubokotažná ocel, která je vhodná pro tváření za studena nejsložitějších tvarů profilů, konstrukčních dílů a lisovaných dílů. Používá se např. v automobilovém průmyslu na karoserie aut (konkrétně velké vnější krycí díly, jako plechy dveří, kryty zavazadlového prostoru, vnější boční plechy a horní stropní plechy). Je lehce svařitelná různými technologiemi - plazmatovým svařováním, laserovým svařováním, obloukovým svařováním a odporovým (bodovým, švovým, či výstupkovým). Použitý plech v experimentu měl tloušťku 0,7 mm.

Tab. 3 Chemické složení oceli DC05

Prvek	C	P	S	Mn
Max. hmotnostní podíl [%]	0,06	0,025	0,025	0,35

Tab. 4 Vybrané fyzikální vlastnosti oceli DC05 [41]

Veličina	Hustota	Modul pružnosti	Tvrdost Brinell	Mez pevnosti	Mez kluzu	Tepelná kapacita	Elektrický odpor
Jednotka	$kg/m^3$	$N/mm^2$	HBW	$N/mm^2$	$N/mm^2$	$J/kg \cdot K$	$\Omega \cdot m$
Velikost	7850	200	180	270	314	465	$1,5 \cdot 10^{-7}$

Pro finální měření, ze kterých jsou vyňaty snímky, použité v této práci se na oceli DC05 dělali při těchto vstupních svařovacích parametrech, jak je vidět na Obr. 37 (vlevo).

Tab. 5 Odladěné parametry svařovacího stroje pro svar oceli DC05

Veličina	Čas	Proud	Síla
Hodnota [jednotka]	260 [ms]	4,5 [kA]	1,6 [kN]

### 6.1.2 Odladěné hodnoty pro materiál 22MnB5

Ocel 22MnB5 (1.5528) je bórová ocel pro všeobecné použití bez specifikovaných mechanických vlastností. Tato ocel je vhodná do aplikací, které jsou namáhané tahem, ohybem a únavou, proto se v dnešní době používá pro výrobu řetězů (resp. jejich bočních článků) u řetězových převodů, je taktéž nedílnou součástí automobilů, kdy se z ní vyrábějí bezpečnostní, či jiné, více namáhané dílce – např. výztuhy A- a B-sloupků, nárazníky, střešní kolejnice a jiné bezpečnostní komponenty, které v případě nárazu mají chránit posádku vozidla. Tato ocel se také často používá pro opotřebitelné díly, např. u sněhových pluhů nebo ve strojích zemědělských strojů. Navíc danou ocel lze svařovat konvenčním obloukovým svařováním a taktéž odporově, ať už bodově, či švově. Plechy použité v experimentu měli Al-Si povlak jako povrchovou úpravu a jejich tloušťka byla 1,1 mm.

Tab. 6 Chemické složení oceli 22MnB5

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	B
Max. hmotnostní podíl [%]	0,25	0,40	1,40	0,025	0,015	0,40	0,0050

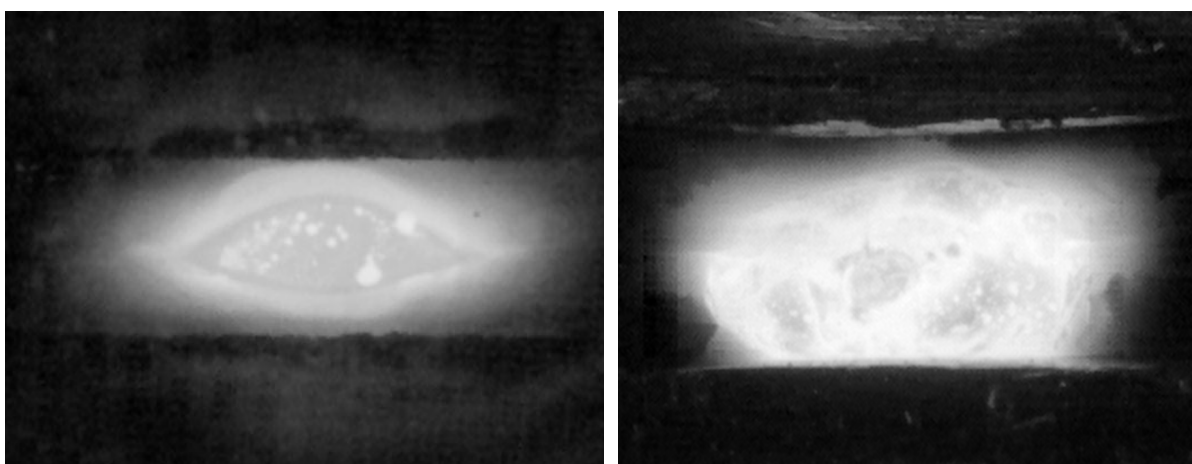
Tab. 7 Vybrané fyzikální vlastnosti oceli 22MnB5 po tepelném zpracování [42]

Veličina	Hustota	Modul pružnosti	Tvrdost Rockwell	Mez pevnosti	Mez kluzu	Tepelná kapacita	Elektrický odpor
Jednotka	$kg/m^3$	$N/mm^2$	HRC	$N/mm^2$	$N/mm^2$	$J/kg \cdot K$	$\Omega \cdot m$
Velikost	7800	210	58	1500	900	460	$2 \cdot 10^{-7}$

Pro finální měření, ze kterých jsou vyňaty snímky, použité v této práci se na oceli DC05 byly provedeny při těchto vstupních svařovacích parametrech, jak je vidět na Obr. 37 (vpravo).

Tab. 8 Odladěné parametry svařovacího stroje pro svar oceli 22MnB5

Veličina	Čas	Proud	Síla
Hodnota [jednotka]	280 [ms]	3,8 [kA]	1,4 [kN]

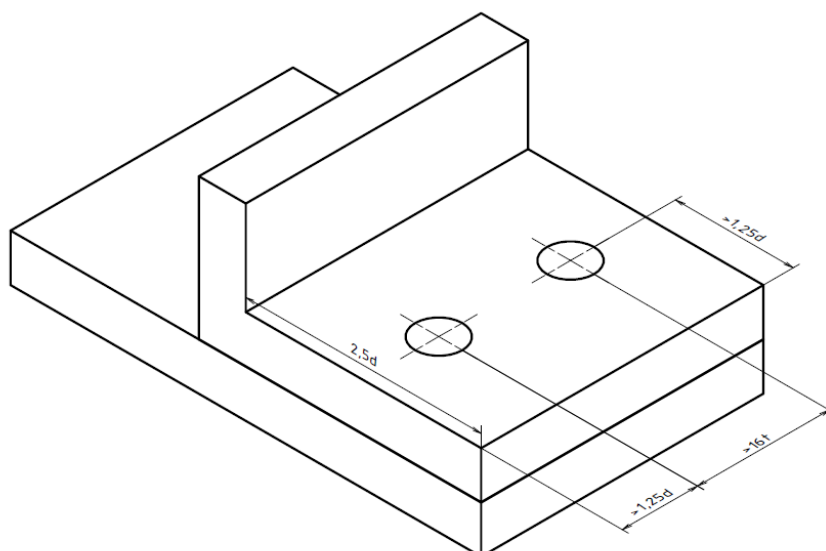


Obr. 37 Svar plechů z DC05 (vlevo), svar plechů z 22MnB5 (vpravo)

Na Obr. 37 lze taktéž dobře pozorovat rozdíl svařových čoček. Vlevo, na svaru plechů z oceli DC05, která je opatřena povrchovou úpravou ve formě galvanicky naneseného zinku, se zinek v průběhu tvoření svařové čочки odpaří, což bylo pozorované i na vysokorychlostní kameře a svařová čočka na snímku je roztavená svařová lázeň kovu. Zatímco vpravo, na svaru plechů z oceli 22MnB5 je vidět, že na povrchu svařové čочки jsou se vytvoří oxidy křemíku, které tuhnou rychleji než samotná ocel a tím zakryjí svařovou čočku.

### 6.1.3 Umístování svarů

Jak je zmíněno v teoretické části (kap. 4.5.1 a 4.5.3) svary musí být umístěny na okraj svařovaných plechů, což je v rozporu se zavedenou normou ČSN EN ISO 14373. Ta říká, že vzdálenost mezi bodovými svary musí být větší než 16 násobek tloušťky svařovaných plechů, dále vzdálenost od okrajů plechů by měla být větší než 1,25 násobek průměru elektrod, jak je vidět na Obr. 38. [43]



Obr. 38 Doporučené vzdálenosti mezi svary a jejich vzdálenost od okraje plechů

V případě pokusu byly svary aplikovány na zarovnané strany dvou ustřižených plechů, jejichž okraje byly od sebe vzdálené v průměru 15 mm, jak lze vidět na Obr. 39.



Obr. 39 Umístování svarů na zkušební vzorek

## 7 Odladění nastavení kamery

Při odladování nastavení kamery bylo nutné provést následující kroky, které je třeba při nastavování kamery provádět. Prvním krokem byla volba objektivu a následného využití mezikroužků viz. 5.4.2 (Obr. 29). Dalším krokem bylo nastavování clon – ať už na objektivu, tak na samotné kameře a doladování pomocí rychlosti závěrky řídicím počítačem. Po odladění objektivů a následném doostření obrazu se musela zvolit vhodná kombinace snímkovací frekvence a rozlišení obrazu. Jako posledním krokem byla aplikace HDR (High-Dynamic Range) na vytvořené záznamy.

### 7.1 Nastavení clon a odladění rychlosti závěrky

Clony a rychlost závěrky mají jinou funkci, ale obdobný výsledek. Clona je otvor, který má schopnost se zvětšovat a zmenšovat a tím reguluje množství světla, které prochází objektivem a dopadá na světlo citlivý snímač. Clona je součástí objektivu a je taktéž i v kameře. Velikost clony udává clonové číslo – čím je číslo menší, tím více světla clona propustí a hloubka

ostrosti se zmenšuje a naopak. Zatímco rychlost závěrky (neboli čas expozice) určuje, jak dlouho bude světlo dopadat na film (resp. obrazový snímač kamery). Po tuto dobu je samotný záběr vytvářen. Při filmování kamerou se rychlost závěrky taktéž projeví v ostrosti snímků. Jako příklad může být, když se natáčí video v noci, tak se rychlost závěrky musí dát co možná nejnižší, aby světlo na snímač dopadalo dlouhou dobu, a to znamená, že snímáný objekt musí být statický, jelikož pořízení snímků trvá dlouhou dobu. Proto je taktéž v experimentu místo svaru osvětlováno, aby se mohla zvýšit rychlost závěrky co možná nejvíc. Tyto dva parametry se ve výsledku podílejí na celkové ostrosti, světlosti a samotné kvalitě snímku. [44]

### 7.1.1 Finální nastavení clon

Jako konečné nastavení clon se ukázalo nastavení maximální clony na objektivu, tj. všech 16 lamel clony. To bylo z důvodu, že tam sice nesvítí elektrický oblouk, ale ve svarové čočce je kov, který má teplotu tavení a rozžhavené železo samo sobě dost svítí, takže je třeba dát clonu na maximální hodnotu, aby bylo do svaru vidět. Na kameře byla následně nastavena nejmenší, základní clona. Doladění světlosti obrazu proběhlo v rozhraní programu, kde byla nastavena rychlost závěrky 20 ns. To v praxi znamená, že se záběry natáčeli nějakou snímkovací frekvencí, takže délka snímání jednoho snímku je jedna sekunda/počet snímků za sekundu. Z této doby pak rychlost závěrky udělá ještě kratší dobu, takže kamera pak střídá režim snímání a nesnímání (kdy je závěrka zavřená). Záběry tohoto nastavení jsou vidět na Obr. 37.

## 7.2 Aplikování HDR

Aplikace HDR (High Dynamic Range), jak je popsáno v kap. 2.5, umí od sjednotit vícero snímků s různou expoziční dobou a tím zvýšit světlost obrazu. Rozdíl je patrný na Obr. 41, kde snímek d) je zachycení svaru bez aplikace HDR a snímek f) je po aplikaci HDR, na tomto snímku jsou patrné i elektrody.

## 7.3 Finální nastavení kamery

Finální nastavení parametrů kamery je rozepsáno v Tab. 9. Nakonec se ukázalo, že nevhodnější snímkovací frekvence je 10 000 sn/s. To proto, protože při použití nižší snímkovací frekvence nebyla dobře vidět tvorba svarové čočky (proces byl příliš rychlý a nebyly znát detaily). Naopak při aplikování vyšší snímkovací frekvence nastal problém se synchronizováním zapnutí záznamu. Ten trval díky malé paměťové kapacitě kamery méně než sekundu. Navíc byl záznam tvorby svaru zbytečně dlouhý, čili doba tvoření čočky na videu trvá přes 2,5 minuty, což není za potřebí. Konečné rozlišení obrazu bylo zvoleno 896x368 pixelů, jelikož při aplikování maximálního rozlišení (1024x1024) se dramaticky snížila délka záznamu. To znamená, že kamera musí zpracovávat více pixelů, než je pro zobrazení čistě svarové čočky třeba a při vysoké snímkovací frekvenci se tato data rychle nasčítávají. Tento problém je obdobný jako u vyšší snímkovací frekvence, navíc snížením rozlišení se omezí pouze oblast zaznamenávané oblasti nehledě na její kvalitu, což plně postačovalo na provedení experimentu.

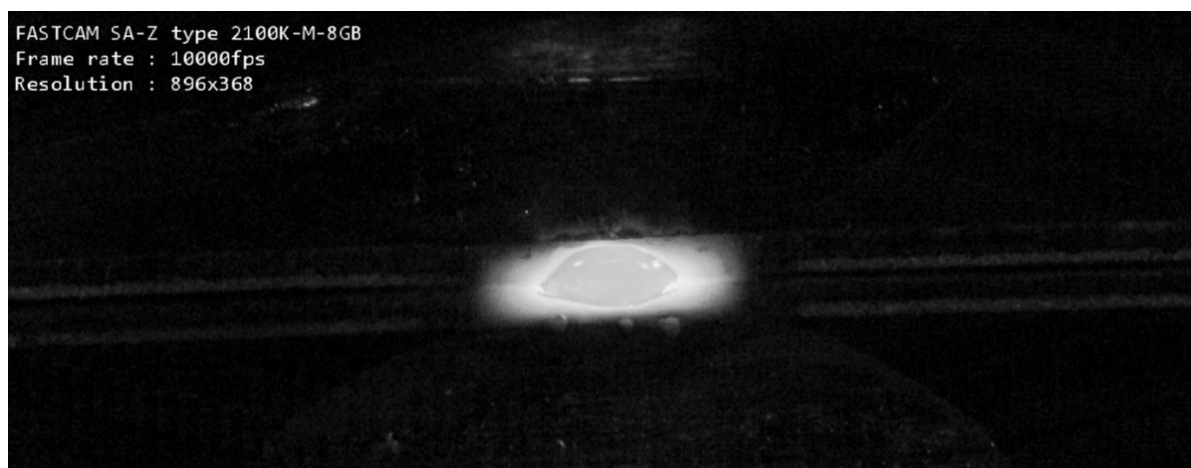
Tab. 9 Finální nastavení kamery

Veličina	Snímkovací frekvence	Rozlišení obrazu	Rychlost závěrky
Hodnota [jednotka]	10 000 [sn/s]	896x368 [pixelů]	20 [ns]

## 7.4 Popis konečného provedení experimentu

Konečný experiment byl proveden na dvou vzorcích (6.1.1 a 6.1.2). Pro tyto dvě oceli byly použity parametry svařovacího stroje uvedené v Tab. 5 a Tab. 8. Oba vzorky byly snímány vysokorychlostní kamerou s parametry popsané v Tab. 9.

Po odladění parametrů svařovacího stroje a monitorovacího systému byly vyměněny obrobené elektrody, aby na výsledném záznamu byl svařovací proces bez vad (hlavně aby se vyvarovalo napečení svaru na elektrodu). Dále byly vzaty dva nově zastřížené plechy a za pomoci svěrky umístěny na nehybnou (spodní) elektrodu. Následně se očistilo ochranné sklíčko, které bylo umístěno mezi objektivem a svarem, aby výsledný svar nebyl znehodnocen případnými nečistotami (např. na sklíčku byly napečené části svarové lázně, které při vysokých vstupních veličinách svařecího stroje vylétávaly) ulpělými na skle. Nakonec byl doostřen objektiv, aby obraz byl co nejlépe doostřen a natočila se série výsledných videí. Záběr z finálního videa je vidět na Obr. 40.



Obr. 40 Finální záběr svaru plechů z DC05

Pro finální zaznamenání svaru z oceli 22MnB5 bylo nutné změnit vstupní parametry svařovacího stroje a opakovat úkony, jako výměnu elektrod, očištění ochranného sklíčka, byly vzaty nové plechy, jak je popsáno výše. Avšak díky Al-Si povrchové úpravě oceli 22MnB5 není na záběrech vidět tak pěkná čoučka, jako na oceli z DC05. To bylo nejvíce znát na tom, že svarová čoučka plechů z 22MnB5 měla na povrchu po celou dobu vrstvu Al-Si, která již byla zatuhlá a nebyl vidět pohyb roztaveného kovu v svarové lázni. Naopak u DC05 se po začátku svařování povrchová vrstva zinku odpařila a uvnitř svarové čoučky byl názorně vidět roztavený kov, a dokonce byly vidět i okuje, které se tvořily na povrchu svarové čoučky.

Pořízená videa z plechů DC05 mají v průměru 2 minuty a s aplikací HDR mají v průměru 3,2 Gb. To vše natočeno snímkovací frekvencí 10 000 sn/s a rozlišení záznamu je 896x368

pixelů, zbylé hodnoty záznamu jsou uvedeny v Tab. 9. U plechů z 22MnB5, díky dlouhému tuhnutí svaru zapříčiněné povrchovou úpravou mají videa průměru 2 minuty a 45 sekund a jejich velikost je 4,3 Gb. To bylo natočeno stejnými parametry jako u DC05, parametry jsou vidět v Tab. 9.

## 8 Výsledky

Výsledné záběry, které jsou ke zhlédnutí na CD v příloze bakalářské práce. Výsledky této práce byly následující:

- 1) Analýza způsobu monitorování svařovacích procesů, která je uvedena v teoretické části, kde jsou rozebrány nejpoužívanější způsoby monitorování a jsou zde i rozepsaná již provedená měření, která sloužila jako inspirace pro provedení pokusu.
- 2) Návrh experimentu pro porovnání různých procesů odporového svařování s využitím vysokorychlostní kamery je rozebráno v teoretické části a návrh, složení a provedení experimentu je popsáno v části praktické.
- 3) Provedení experimentu svaření zkušebních vzorků a jejich vyhodnocení je uvedeno v praktické části, jsou zde taktéž zmíněny dílčí kroky, které vedly k tomu, aby výsledné záběry svarové čochky byly co možná nejlépe kvalitní.

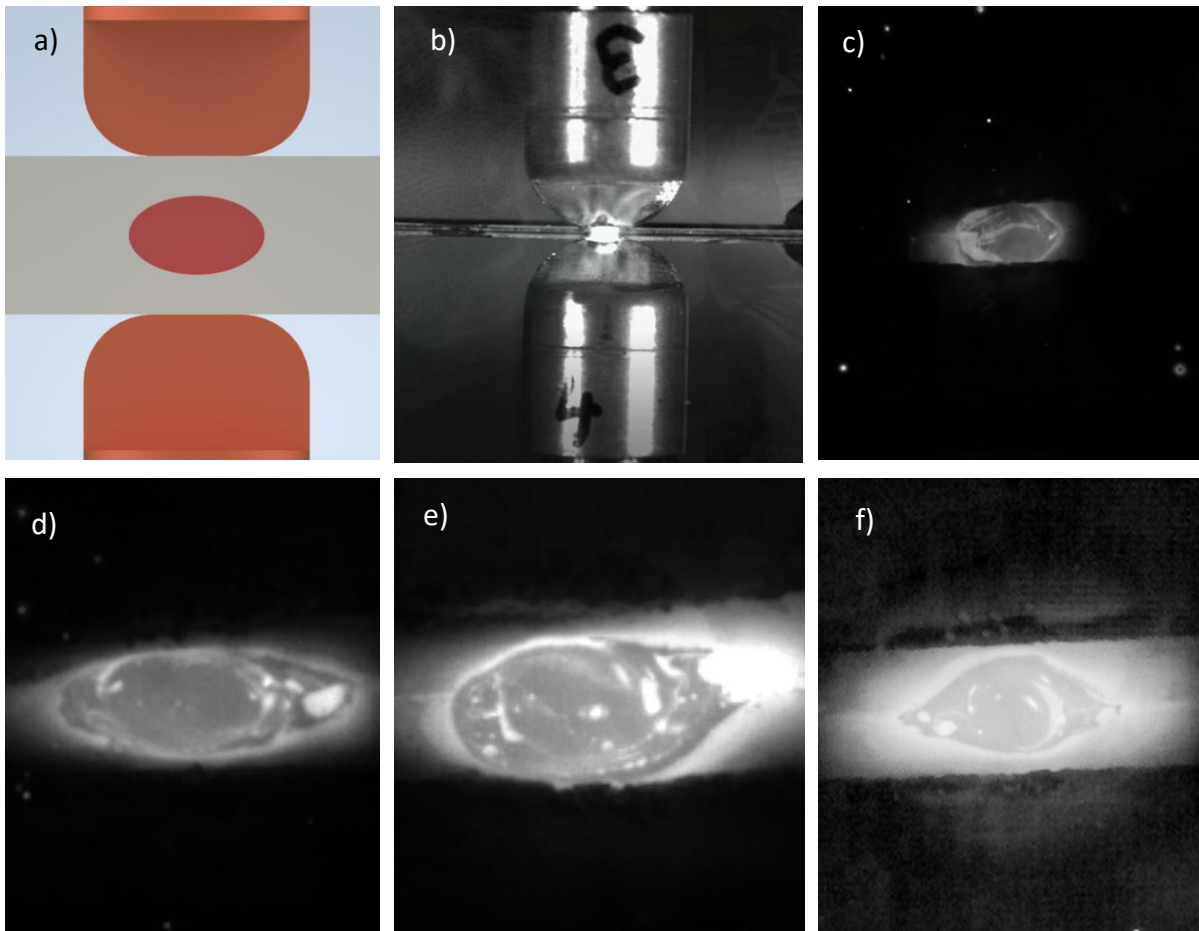
Hlavním cílem této práce bylo zobrazení svarové čochky. Prvním krokem bylo nastavení správné vzdálenosti objektivu od zobrazovaného objektu tak, aby velikost zobrazovaného objektu na monitoru byla co možná největší a současně dostatečně ostrý. Za tímto účelem bylo vyzkoušeno několik objektivů. První objektiv, jak je zmíněno výše, nebyl vhodný pro kvalitní zobrazení svarové čochky. To lze vidět na Obr. 41 (b až d). Proto byl následně zvolen objektiv s jinou ohniskovou vzdáleností, kde při doostření byla adekvátní velikost zobrazené svarové čochky.

Během prvních experimentů se začalo taktéž pracovat s nastavením clony. Na Obr. 41 (b a c) lze vidět velký rozdíl mezi tím, kdy byla a kdy nebyla clona aplikována. Ze začátku, kdy byl používán první objektiv, se musela šířka clony regulovat přímo na kameře. Ovšem s použitím druhého objektivu bylo možno clonu regulovat jak na kameře, tak na objektivu. Nakonec se ukázalo, že nejostřejší záběry byly s maximálně nastavenou clonou na objektivu a clona na kameře byla na minimu.

Při dalších experimentech se začalo pracovat s kombinací clony a závěrky. V softwaru ovládající kameru se zkoušely různé doby závěrky, kdy byla nakonec jako ideální zvolena hodnota 20 ns. To lze vidět na Obr. 41 (d a e)

Na finální snímky byla následně v softwaru aplikována funkce HDR, která v jednoduchosti spojí více snímků s různou dobou expozice a ve snímků oddělí světlá místa od tmavých a svar více vynikne, to lze vidět na Obr. 41 (f).





Obr. 41 Průběh zobrazení svarových čoček

## 9 Závěr

Pro získání kvalitního zobrazení svarové čočky odporového bodovacího svařování bylo nutné seznámení s problematikou vysokorychlostních kamer, pochopení jejich fungování a seznámení s optikou, která ke snímání patří.

Na přípravu experimentu bylo nutné vyhledat obdobné experimenty, které již byly provedeny, analyzovat je a vzít si z nich potřebné informace pro rozvržení experimentu. Taktéž poznatky, které studie dokázaly jsou prospěšné k lepšímu pochopení povahy chování svařování při těchto podmínkách. Nakonec díky studiím se vědělo, jaké obtíže se mohou očekávat během provádění experimentu a sloužily jako srovnání se získanými výsledky.

V průběhu rozvrhování experimentu se naráželo na různé limity, které se v průběhu musely řešit. Jednalo se o objektiv kamery, kdy počáteční záznamy byly sice ostré, ale zobrazená svarová čočka na snímku byla příliš malá a obraz již nešel přiblížit, aby kamera zůstala zaostřená. To se vyřešilo použitím jiného objektivu s jinou ohniskovou vzdáleností, kdy byl záznam dostatečně velký a zároveň ostrý. Další limitující věcí byla světla. Prvně použitá halogenová světla neměla usměrněný světelný kužel, který nestačil k osvětlení okolí svaru. To bylo vyřešeno dvojicí taktéž halogenových světel s více usměrněným světelným kuželem. Ovšem v této části by mohlo být ještě vylepšení, a to použitím jiného, silnějšího zdroje světla s ještě usměrnějším světelným kuželem jako je ku příkladu laser nebo LED světlo.

Pro to, aby zobrazená svarová čočka byla co nejkvalitnější, je ovšem nutno všechny parametry, ať už monitorovacího systému (clona, závěrka, snímkovací rychlost nebo rozlišení), tak svařovacího stroje (proud, čas průchodu proudem, síla elektrod) v průběhu odlaďování procesu upravovat. Tento způsob vedl k uspokojivému záznamu tvorby svarové čočky, který je uložen v CD příloze.

Výsledné záběry jsou v porovnání s dostupnými videi z youtube a s dostupnými snímky konkurence schopné, čímž byly splněny cíle práce. V některých ohledech jsou výsledné záběry této práce i lepší než konkurenční záběry, a to je hlavně v práci se clonou a závěrkou, kdy je dobrá kvalita zobrazení děje přímo uvnitř svaru.

Poznatky z této práce by mohly v budoucnu sloužit jako podklad pro měření posuvu elektrody za pomoci vysokorychlostní kamery. V této práci jsou popsány potřebné informace pro nastavení celého monitorovacího systému.

## Citovaná literatura

- [1] *The New York Times: Morton Sultanoff, Expert In High-Speed Photography*. New York: The New York Times, 1970, .
- [2] Acquisition of a Kodak Ektapro EM 1012 Motion Analyzer System. *National Science Foundation: Where discover begin* [online]. USA: National Science Foundation, 1996 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: [https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD\\_ID=9318129&HistoricalAwards=false](https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=9318129&HistoricalAwards=false)
- [3] VOLLMER, Michael a Klaus-Peter MÖLLMANN. High speed and slow motion: the technology of modern high speed cameras. In: *Physics Education* [online]. 2011, , s. 191-202 [cit. 2022-02-24]. ISSN 0031-9120. Dostupné z: doi:10.1088/0031-9120/46/2/007
- [4] FASTCAM SA-Z. *Photron* [online]. Japan: photron.com, 2013 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://photron.com/fastcam-sa-z-2/>
- [5] What are all the discussions about global vs. rolling shutter?. *Pco.knowledge base* [online]. Germany: PCO AG, Kelheim, 2015, s. 13 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: [https://www.pco.de/fileadmin/user\\_upload/knowledge\\_base/kb\\_globalvsrollingshutter.pdf](https://www.pco.de/fileadmin/user_upload/knowledge_base/kb_globalvsrollingshutter.pdf)
- [6] How to choose between a Rolling Shutter & Global Shutter sCMOS camera mode. *Oxfords instruments ANDOR* [online]. Great Britain: Oxford Instruments 2022, 2020 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/rolling-and-global-shutter>
- [7] FULLER, P W W. An introduction to high speed photography and photonics. In: *The Imaging Science Journal* [online]. 2013, , s. 293-302 [cit. 2022-02-24]. ISSN 1368-2199. Dostupné z: doi:10.1179/136821909X12490326247524
- [8] HEFLEY ROBERT F. LINFIELD, GIFFORD. *Intermittent action camera*. 25.2. 1965. USA. 3,122,076. Uděleno 25.2. 1965. Zapsáno 25.2. 1965.
- [9] LUHMANN, Thomas. *A HISTORICAL REVIEW ON PANORAMA PHOTOGRAMMETRY* [online]. Jade University of Applied Sciences, Oldenburg, 2008, **16**, 9 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: [file:///C:/Users/Korec/Downloads/A\\_historical\\_review\\_on\\_panorama\\_photogrammetry.pdf](file:///C:/Users/Korec/Downloads/A_historical_review_on_panorama_photogrammetry.pdf)

- [10] DAVIDHAZY, Andrew. *An overview of high speed photographic imaging* [online]. Rochester, 2006 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1122&context=article>. RIT scholar work. Rochester Institute of Technology.
- [11] *Television cameras and displays* [online]. Britanica, 2022, [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/television-technology/Television-cameras-and-displays>
- [12] Three methods for photon migration measurements in pulp. *OPTO-ELECTRONICS REVIEW* [online]. Oulu: University of Oulu, 2004, **2**(12), 193-198 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/266891327\\_Three\\_methods\\_for\\_photon\\_migration\\_measurements\\_in\\_pulp](https://www.researchgate.net/publication/266891327_Three_methods_for_photon_migration_measurements_in_pulp)
- [13] STROJOVÉ VIDĚNÍ OD ČTENÍ DATAMATRIX KÓDŮ PO 3D ANALÝZU OBJEKTŮ. *Eola.cz* [online]. Olomouc: EOLA S.R.O., 2021 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://eola.cz/cs/opticka-kontrola-kvality/strojove-videni>
- [14] VERSLUIS, Michel. High-speed imaging in fluids. *Experiments in Fluids* [online]. Netherlands: University of Twente, 2013, **54**(2), 55 [cit. 2022-04-19]. ISSN 0723-4864. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-013-1458-x
- [15] Co je HDR?. *Eizo.cz* [online]. Praha: EIZO Corporation, 2022 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://www.eizo.cz/poznatky-z-praxe/vedomosti-o-monitorech/hdr-detailne-co-je-hdr/>
- [16] KANG, Sing Bing, Matthew UYTENDAELE, Simon WINDER a Richard SZELISKI. High dynamic range video. *ACM Transactions on Graphics* [online]. 2003, **22**(3), 319-325 [cit. 2022-03-22]. ISSN 0730-0301. Dostupné z: doi:10.1145/882262.882270
- [17] Co je HDR a jak funguje?. *Alza* [online]. Praha: Alza.cz a.s., 2019 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/vse-o-hdr-televizich-a-vidou>
- [18] Odporové zvaranie. *Mat net* [online]. Slovensko: PRVÁ ZVÁRAČSKÁ, a. s., 2006 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=382>
- [19] KOPELIOVICH, Dmitri. Resistance Welding. In: *SubsTech* [online]. USA: SubsTech, 2012 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance\\_welding\\_rw](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw)

- [20] KHODABAKHSHI, F., M. KAZEMINEZHAD a A.H. KOKABI. Mechanical properties and microstructure of resistance spot welded severely deformed low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2011, **529**, 237-245 [cit. 2022-08-03]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2011.09.023
- [21] NEUMANN, Heinz. *Odporové svařování: Základní principy a poznatky*. Praha, 2013.
- [22] KUBÍČEK, Ing. Jaroslav. *TECHNOLOGIE II: ČÁST SVAŘOVÁNÍ* [online]. 1. Brno: VUT Brno, 2006 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te\\_technologie\\_2\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_kubicek.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_specialni_metody_svarovani_kubicek.pdf)
- [23] Svove-svarovani. In: *ROCKWELD* [online]. Praha: Realizace & Webdesign, 2013 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/svove-svarovani/>
- [24] LITERÁK, David. *Návrh kontinuálního monitoringu složení spalin na výstupu z kotle*. Ostrava, 2014. Diplomová. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Tomáš Výtisk, Ph.D.
- [25] MRŇA, Libor. *Odtavovací a stlačovací stykové svařování* [online]. Brno, 2008 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_odtavovaci\\_a\\_stlacovaci\\_stykove\\_svarovani\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_odtavovaci_a_stlacovaci_stykove_svarovani_mrna.pdf). Prezentace. VUT Brno.
- [26] FEULVARCH, E, V ROBIN a J M BERGHEAU. Thermometallurgical and mechanical modelling of welding – application to multipass dissimilar metal girth welds. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. 2013, **16**(3), 221-231 [cit. 2022-02-26]. ISSN 1362-1718. Dostupné z: doi:10.1179/1362171811Y.0000000008
- [27] MA, Ninshu a Hidekazu MURAKAWA. Numerical and experimental study on nugget formation in resistance spot welding for three pieces of high strength steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2010, **210**(14), 2045-2052 [cit. 2022-02-26]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.07.025
- [28] LEE, Yongki, Hunchul JEONG, Kyungbae PARK, Yougjun KIM a Jungho CHO. Development of numerical analysis model for resistance spot welding of automotive steel. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2017, **31**(7), 3455-3464 [cit. 2022-08-03]. ISSN 1738-494X. Dostupné z: doi:10.1007/s12206-017-0634-y
- [29] BÁLSAMO, Paulo, Louriel VILARINHO a Márcio VILELA. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: Synchronised shadowgraphy. *Joining of Materials* [online]. Int. J. Join. Materials, 2000, **12**(1), 12 [cit. 2022-02-26]. Dostupné

- z: [https://www.researchgate.net/profile/Louriel-Vilarinho/publication/265199823\\_Development\\_of\\_an\\_experimental\\_technique\\_for\\_studying\\_metal\\_transfer\\_in\\_welding\\_Synchronised\\_shadowgraphy/links/541177be0cf2b4da1bec4ce8/Development-of-an-experimental-technique-for-studying-metal-transfer-in-welding-Synchronised-shadowgraphy.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Louriel-Vilarinho/publication/265199823_Development_of_an_experimental_technique_for_studying_metal_transfer_in_welding_Synchronised_shadowgraphy/links/541177be0cf2b4da1bec4ce8/Development-of-an-experimental-technique-for-studying-metal-transfer-in-welding-Synchronised-shadowgraphy.pdf)
- [30] HAGHSHENAS, N. a H. MOSHAYEDI. Monitoring of Resistance Spot Welding Process. *Experimental Techniques* [online]. 2020, **44**(1), 99-112 [cit. 2022-03-12]. ISSN 0732-8818. Dostupné z: doi:10.1007/s40799-019-00341-z
- [31] VARGAS, José. *VISUALIZAÇÃO DA FORMAÇÃO DA LENTILHA EM SOLDAS A PONTO POR RESISTÊNCIA* [online]. Portugal, 2005 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <http://web.posfemec.org/posmec/15/pdf/POSMEC028.pdf>. Diplomová. Universidade Federal de Uberlândia. Vedoucí práce Sadek C. Absi Alfaro, Louriel O. Vilarinho.
- [32] *Experimental Study of Nugget Formation in Resistance Spot Welding* [online]. WELDING JOURNAL, 2003, [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: [http://files.aws.org/wj/supplement/WJ\\_2003\\_08\\_s195.pdf](http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_2003_08_s195.pdf)
- [33] Cinematography of resistance spot welding of galvanized steel sheet: Preweld and postweld current modification have a significant effect on nugget quality. *WRC Bulletin* [online]. 1987, **69**(9), 259-265 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.666.3432&rep=rep1&type=pdf>
- [34] XIA, Yu-Jun, Ze-Wei SU, Yong-Bing LI, Lang ZHOU a Yan SHEN. Online quantitative evaluation of expulsion in resistance spot welding. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, **46**, 34-43 [cit. 2022-03-12]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2019.08.004
- [35] Dalex PMS PRŮMYSLOVÉ SVAŘOVACÍ ODPOROVÉ LISY. *DALEX SCHWEISSTECHNICK* [online]. Wissen: DALEX GmbH & Co. KG, 2018 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: [http://download.dalex.cz/tech-listy/cz/pms-standard/pms%2011-4\\_cz.pdf](http://download.dalex.cz/tech-listy/cz/pms-standard/pms%2011-4_cz.pdf)
- [36] FASTCAM SA-Z. *Photron* [online]. Ziegelweg: Photron, 2021 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://photron.com/fastcam-sa-z-2/>
- [37] NIKKOR Z 24–200 mm f/4–6,3 VR. In: *Nikon* [online]. Japan: Nikon, 2022 [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: [https://www.nikon.cz/cs\\_CZ/product/nikkor-z-lenses/auto-focus-lenses/fx/zoom/nikkor-z-24-200mm-f-4-6-3-vr?product\\_code=JMA710DA](https://www.nikon.cz/cs_CZ/product/nikkor-z-lenses/auto-focus-lenses/fx/zoom/nikkor-z-24-200mm-f-4-6-3-vr?product_code=JMA710DA)
- [38] NIKKOR 85mm f/1.8 AF-S G. *Alza* [online]. Praha: Alza.cz a.s., 2022 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/nikkor-85mm-f-1-8-af-s-g->

d505680.htm?kampan=adwdfv\_digitalni-foto-video\_pla\_all\_obecna\_cenove-hity\_c\_9062908\_\_OI366b\_599279283833\_~135608547014~&gclid=Cj0KCQjw8uOWBhDXARIsAOxKJ2FBFxJniZy7\_A30etUGK5XAh5-\_wykEZpWcDkXs-6KipnIraYrygY8aAiUkEALw\_wcB

- [39] Meike MK-N-AF1-A sada automatických mezikroužků 12/20/36 mm pro Nikon. In: *MALL.CZ* [online]. Praha: Internet Mall, a.s., 2022 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.mall.cz/fotodoplanky/meike-mk-n-af1-a-sada-automatickych-100084033075?tab=description>
- [40] WANG, B., M. LOU, Q. SHEN, Y. B. AND a H. ZHANG. Shunting Effect in Resistance Spot Welding Steels: Part 1: Experimental Study. *WELDING RESEARCH* [online]. 2013, **10**(92), 182-189 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: [http://s3.amazonaws.com/WJ-aws.org/supplement/WJ\\_2013\\_06\\_s182.pdf](http://s3.amazonaws.com/WJ-aws.org/supplement/WJ_2013_06_s182.pdf)
- [41] EN 10130 Grade DC05 skin passed. *Matmatch* [online]. Munich: Matmatch GmbH, 2022 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://matmatch.com/materials/minfm33720-en-10130-grade-dc05-skin-passed>
- [42] 22MnB5. *OVAKO* [online]. Stockholm: Ovako AB., 2022 [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/22mnb5/>
- [43] ČSN EN ISO 14373. *Odporové svařování – Postup pro bodové svařování nepovlakovaných a povlakovaných uhlíkových ocelí. 2*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [44] DOLEJŠÍ, Tomáš. Jak fungují digitální fotoaparáty polopate. *Fotorádce* [online]. 2013, **8**(13), 1 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <http://www.fotoradce.cz/jak-funguji-digitalni-fotoaparaty-polopate>

## Seznam obrázků

Obr. 1 Vysokorychlostní kamera FASTCAM SA-Z [4] .....	13
Obr. 2 Režim štěrbinové závěrky (vlevo), režim centrální závěrky (vpravo) .....	14
Obr. 3 Záznam pohybujícího se předmětu štěrbinovou závěrkou (vlevo) a centrální závěrkou (vpravo) [6] .....	15
Obr. 4 Schéma principu kamer typu přerušovaných akcí (vlevo) [8], (vpravo) [9] .....	16
Obr. 5 Schéma principu rotačních zrcadlových kamer (vlevo) [10] a kamer s převodníkem obrazu (vpravo) [11] .....	17
Obr. 6 Schéma principu pruhové kamery [12] .....	17
Obr. 7 Rozdíl mezi obrazem s HDR a bez HDR (vlevo) graf udávající rozdílný rozsah barevné škály mezi HDTV a UHDTV (vpravo) [17] .....	19
Obr. 8 Princip bodového svařování [19] .....	20
Obr. 9 Odpor při bodovém svařování [20] .....	21
Obr. 10 Metalurgická změna odporu oceli v průběhu svařování [21] .....	22
Obr. 11 Princip švového svařování popis: 1 – přítlačná síla, 2 – švový svar, 3 – svařovaný materiál, 4 – kotoučová elektroda, 5 – zdroj proudu [23] .....	22
Obr. 12 Výstupkové svařování matice k plechu [24] .....	23
Obr. 13 Princip odtavovacího stykového svařování [25] .....	23
Obr. 14 Vizualizace přenosu tepla metodou konečných prvků obloukového svařování [26] .	25
Obr. 15 Svařování tří dílců v různém čase tvorby svaru [27] .....	25
Obr. 16 Svařování dvou plechů vizualizované za pomoci MKP (vlevo), ověření simulace experimentem (vpravo) [28] .....	26
Obr. 17 Princip stínové grafiky aplikované na svařování [29] .....	27
Obr. 18 Destruktivní zkoušky bodového svařování – křížovým tahem (vlevo), smykem (uprostřed) a odlupováním (vpravo) [30] .....	27
Obr. 19 Experimentální postup při natáčení [31] .....	28
Obr. 20 Plechy a elektrody [31] .....	29
Obr. 21 Schéma rozmístění komponentů monitorování (vlevo), poloviční řez schématem elektrody (vpravo) [32] .....	30
Obr. 22 Modifikace svařování – ohřev (vlevo) a chladnutí (vpravo) [33] .....	30
Obr. 23 Rozvržení experimentu [33] .....	31
Obr. 24 Rozložení návrhu experimentu [30] .....	32



Obr. 25 Rozvržení experimentu [34] .....	33
Obr. 26 Schéma rozvržení experimentu bez ochranných prostředků .....	35
Obr. 27 Použité elektrody .....	36
Obr. 28 Objektiv NIKKOR Z 24-200 mm (vlevo) [37], NIKKOR 85 mm (vpravo) [38] .....	37
Obr. 29 Mezikroužky Meike [39] .....	38
Obr. 30 Sestava svařovacího, monitorovacího zařízení a osvětlení.....	38
Obr. 31 Sestava s ochranným sklíčkem .....	39
Obr. 32 Výstřik svarové lázně .....	40
Obr. 33 Schéma procesu shuntování [40] .....	41
Obr. 34 Vliv odbočování proudu nebo-li shuntování .....	41
Obr. 35 Posunutí elektrody – počátek svařování vlevo a konec svařování (vpravo) .....	42
Obr. 36 Napékání svaru na elektrodě .....	42
Obr. 37 Svar plechů z DC05 (vlevo), svar plechů z 22MnB5 (vpravo) .....	44
Obr. 38 Doporučené vzdálenosti mezi svary a jejich vzdálenost od okraje plechů .....	45
Obr. 39 Umísťování svarů na zkušební vzorek .....	45
Obr. 40 Finální záběr svaru plechů z DC05 .....	47
Obr. 41 Průběh zobrazení svarových čoček .....	49

## Seznam tabulek

Tab. 1 Vybrané technické parametry svařovacího stroje [35] .....	36
Tab. 2 závislost rozlišení na snímkovací frekvenci kamery SA-Z [36].....	37
Tab. 3 Chemické složení oceli DC05 .....	43
Tab. 4 Vybrané fyzikální vlastnosti oceli DC05 [41] .....	43
Tab. 5 Odladěné parametry svařovacího stroje pro svar oceli DC05.....	43
Tab. 6 Chemické složení oceli 22MnB5 .....	43
Tab. 7 Vybrané fyzikální vlastnosti oceli 22MnB5 po tepelném zpracování [42] .....	44
Tab. 8 Odladěné parametry svařovacího stroje pro svar oceli 22MnB5.....	44
Tab. 9 Finální nastavení kamery .....	47

## Seznam příloh

DVD s natočenými finálními záběry