



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝZKUM DYNAMIKY LASEROVÉHO SVAŘOVACÍHO PROCESU

RESEARCH OF THE DYNAMICS OF THE LASER WELDING PROCESS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Petr Horník

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2023



Tato disertační práce byla vypracována na

**Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.,
oddělení Koherenční optiky,**

pod vedením doc. RNDr. Libora Mrňi, Ph.D.

Abstrakt

Laserové svařování je moderní metoda svařování, která byla široce přijata průmyslem. S rostoucími nároky na kvalitu svarů se s výhodou uplatňuje automatizované svařování a jsou tlaky na implementaci sledování procesu svařování v souladu s konceptem Průmyslu 4.0.

Tato disertační práce rozvíjí metody sledování laserového svařovacího procesu. Výsledná kvalita svaru je do značné míry ovlivněna chováním paroplynového kanálu nazývaným keyhole generovaného laserovým svazkem. Přímé pozorování Keyhole během procesu svařování je však obtížné a často se volí nepřímé metody, přičemž důraz je kladen na bezkontaktní optické metody. Nejprve je ověřeno sledování obláčku plazmatu pomocí fotodiody a následně navržen inovativní přístup detekce zpětně odraženého laserového záření pomocí kamery. Za tímto účelem je sestaven optický nástavec pro koaxiální sledování svařovacího procesu na vlnové délce laseru.

Cílem této práce je shrnout možnosti detekce stavu svařovacího procesu a navrhnout variantu přijatelnou pro průmyslovou praxi. Obrazová data získaná v průběhu procesu představují distribuci intenzity odraženého laserového záření. K extrakci znaků z distribuce intenzity jsou použity metody deskriptivní statistiky a segmentace obrazu. Distribuce odraženého laserového záření je dána do souvislosti s procesními parametry, geometrií keyhole a některými svarovými vadami.

Summary

Laser welding is a modern welding method that has been widely adopted by the industry. With the increasing demands on weld quality, automated welding is being applied with advantage. There are requirements to implement welding process monitoring in accordance with the concept of Industry 4.0.

This thesis develops methods for laser welding process monitoring. The resulting weld quality is largely influenced by the behaviour of the vapour-gas channel called the keyhole generated by the laser beam. However, direct observation of the keyhole during the welding process is difficult and indirect methods are often chosen, with an emphasis on non-contact optical methods. First, the observation of the plasma plume using a photodiode is verified, and then an innovative approach of detecting the back-reflected laser radiation using a camera is proposed. An optical extension for monitoring the welding process coaxially at the laser wavelength is assembled for this purpose.

The aim of this thesis is to summarize the possibilities of detecting the welding process status and to propose a variant acceptable for industrial application. The image data obtained during the process represent the intensity distribution of the back-reflected laser radiation. Descriptive statistics and image segmentation methods are used to extract features from the intensity distribution. The distribution of back-reflected laser radiation is related to process parameters, keyhole geometry and some weld defects.

Klíčová slova

laserové svařování, vizualizace svařovacího procesu, zpětně odražené laserové záření, fotodiody, kamera, zpracování obrazu

Keywords

laser welding, welding process visualization, back-reflected laser radiation, photodiode, camera, image processing

Citace tištěné práce:

HORNÍK, Petr. *Výzkum dynamiky laserového svařovacího procesu*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/146603>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Citace elektronického zdroje:

HORNÍK, Petr. *Výzkum dynamiky laserového svařovacího procesu* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/146603>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem disertační práci *Výzkum dynamiky laserového svařovacího procesu*, vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Libora Mrňi, Ph.D s použitím materiálů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

Ing. Petr Horník

Děkuji tímto svému školiteli doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D za rady a připomínky při vedení mé diplomové práce. Dále děkuji týmu Koherenční optiky Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. za přátelské pracovní prostředí a odbornou pomoc. Poděkování patří také mojí rodině, partnerce a přátelům za všestrannou podporu v průběhu tvorby této práce.

Ing. Petr Horník

Obsah

1	Úvod	15
2	Cíl disertační práce	17
3	Analýza stavu řešené problematiky	18
3.1	Proces laserového svařování	18
3.2	Stav a trendy sledování procesu v laserových technologiích	21
3.2.1	Průmyslové monitorovací systémy	22
3.2.2	Současné vědecké přístupy	23
3.3	Optická emisní spektroskopie	25
4	Zvolené metody	27
4.1	Experimentální sestava	27
4.1.1	Parametry laserového svazku	27
4.1.2	Fotodiodové senzory	29
4.1.3	Koaxiální optický nástavec	31
4.1.4	Zvolené materiály	33
4.2	Matematické metody	34
4.2.1	Ověření normality	36
4.2.2	Transformace dat	37
4.2.3	Frekvenční analýza	38
5	Výsledky měření fotodiodovými senzory	40
5.1	Boční fotodioda	40
5.2	Horizontální úhel mezi dvěma fotodiodami	43
5.3	Vertikální úhel mezi dvěma fotodiodami	44
5.4	Porovnání fotodiody s kamerou	45
5.5	Ověření spektrálních vlastností laseru	48
5.6	Zpětně odražené laserové záření	50
5.6.1	Sledování svařovacího procesu pomocí zpětně odraženého laserového záření	51
5.6.2	Měření výkonu zpětně se vracejícího laserového záření	55
6	Výsledky měření kamerou	57
6.1	Odhad průměru keyhole	59
6.2	Distribuce intenzity odraženého laserového záření	61
6.2.1	Využití testů normality pro sledování svařovacího procesu	63
6.3	Vizualizace pomocí parametrů a koeficientů normálního rozdělení	64
6.3.1	Vztah statistických hodnot intenzity a geometrie svaru	65
6.4	Vizualizace na základě saturovaných pixelů	69
6.5	Využití výsledků	71
6.5.1	Průběžné sledování svařovacího procesu	71
6.5.2	Detekce kořene svaru	74

OBSAH

6.5.3 Sledování obecných svarů	76
7 Závěr	77
Seznam použitých zdrojů	79
Seznam použitých zkratk a symbolů	83
Seznam vlastních publikací	84

1. Úvod

Laserové technologie se v průmyslu již hojně využívají v nejrůznějších aplikacích. Počínaje u laserového řezání, svařování, kalení přes různé povrchové úpravy až po aditivní výrobu. Tato práce se bude zabývat hlavně laserovým svařováním. Největším přínosem jsou laserové technologie v automatizované velkosériové výrobě, ale najdou uplatnění i při zakázkové výrobě. Výzvou je volba optimálních procesních parametrů či alespoň nalezení podmnožiny přijatelných parametrů. Dalším výzvou je udržení a kontrola nastavených parametrů v průběhu procesu. Nastavení parametrů laserového svařování může být obtížné a dosud neexistuje univerzální způsob pro jejich snadné nalezení k dosažení kvalitního svaru z hlediska geometrie i výskytu svarových vad. Nejčastěji se vychází z empirických tabulek nebo jednoduchých modelů. Následně je třeba provést a vyhodnotit řadu zkušebních svarů pro finální odladění parametrů, což je zdlouhavý a nákladný proces.

Jednou z možností odhadu výsledného svaru nebo rovnou celého procesu je na základě simulace. Simulace však také potřebuje vstupní data, například materiálové parametry, které není někdy jednoduché získat. Dále je nutné brát v potaz mnoho fyzikálních jevů v místě interakce, což klade vysoké nároky na výpočetní výkon a výsledek nebývá znám okamžitě. Namísto multifyzikálních simulací vyvíjených na Vídeňské technické univerzitě [1] a komerčního programu Flow 3D Weld spíše pro potřeby výzkumu, jejichž výpočty jsou časově náročné a pro praxi tedy nepoužitelné se často používají zjednodušené modely, které neberou v potaz interakci laserového záření s hmotou, ale většinou jde o termomechanické simulace omezující se pouze na vnos a vedení tepla a případně materiálové transformace. Příkladem takových programů jsou například Sysweld a Simufact Welding.

Nicméně, znalost přibližných parametrů vedoucích ke svaru požadované geometrie je podmínka nutná, nikoliv postačující pro svar požadovaných vlastností. V průmyslové praxi nelze spoléhat na konstantní podmínky a běžně se vyskytují vymezené i nevymezené příčiny vedoucí k defektům. Může kolísat kvalita materiálu, obsluhy i stav stroje. Cílem v zajištění požadované kvality svaru je kontrola kvality během procesu s případnou úpravou parametrů v průběhu procesu. Ačkoliv již dnes existují řešení využívající různé senzory, sledování svaru během procesu při výrobě není samozřejmostí. Výjimkou bývá například výroba kritických součástí, kde v současných systémech řízení jakosti často bývá požadována dokumentace každého svaru.

Analýzou dat získaných v průběhu svařování lze také přispět k lepšímu pochopení dějů při laserovém svařování. Studium chování plazmového obláčku a svarové lázně pomůže při nastavování svařovacích parametrů, případně s volbou laserové svařovací metody. Laserové svařovací technologie se neustále vyvíjí a tak se počet parametrů nebo použitelné metody snímání procesu mohou lišit. Stav a vývoj laserových technologií bude popsán dále.

Při laserovém svařování se laserový svazek pohybuje typicky po přímé nebo obloukové trajektorii, taví základní materiál a svarová lázeň za ním tuhne ve svarový kov. Základními procesními parametry jsou tak výkon laseru, svařovací rychlost a případně poloha ohniska svazku. Vliv na kvalitu svaru však mohou mít hůře kontrolovatelné parametry jako přesnost sesazení každého svařovaného dílu, kvalita materiálu a jeho povrchu, teplota a přítomnost nečistot ve svařovaném místě.

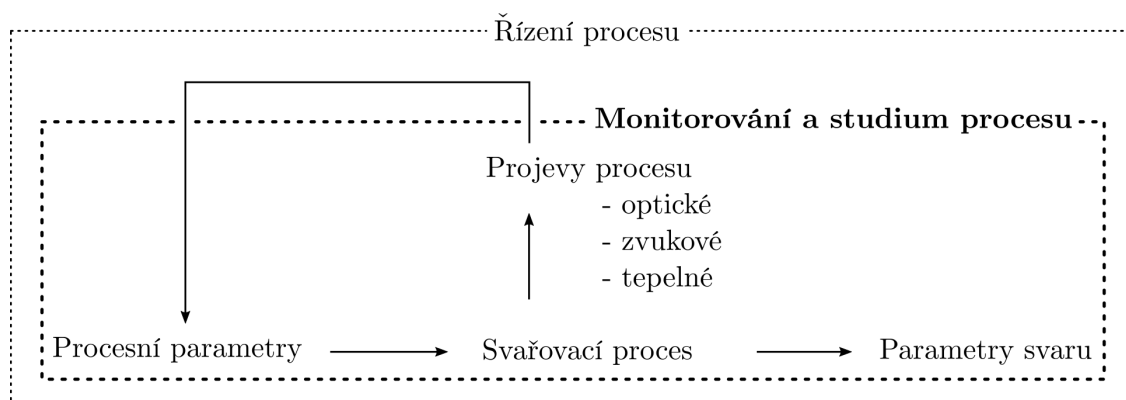
Jeden ze směrů disertační práce rozvíjí snímání světla emitovaného laserovým svařovacím procesem pomocí fotodiody připevněné k procesní hlavě a z průběhu měřené intenzity pak hodnotí svar. Bude provedeno a vyhodnoceno velké množství měření s cílem spojit

měřenou intenzitu se změnou procesních parametrů a svarovými vadami. Hlavní důraz je kladen na frekvenční analýzu naměřené intenzity. Komerčně dostupné monitorovací systémy tuto možnost nevyužívají. Teorie se opírá o práci Kleina et al. [2], který popsal existenci vlastních kmitů keyhole pro penetrační svařování CO₂ laserem. Dle něj narušení tlakové rovnováhy uvnitř paroplynového kanálu keyhole indukují kmity keyhole a s nimi související výtrysky kovových par a plazmatu. Tento směr sledování svařovacího procesu boční fotodiodou a klasifikace kvality svaru na základě jak intenzity, tak frekvenčních charakteristik bude v předkládané disertační práci experimentálně ověřen a prozkoumán. Na základě získaných zkušeností budou navrženy změny eliminující některé nedostatky dosavadního přístupu.

Pro pochopení svařovacích procesů je efektivní využít také vysokorychlostní kameru a při výzkumu se tak často děje. Kamera poskytuje lepší vhled do procesu, jelikož čip kamery je v podstatě pole fotodiod. Kamera tudíž generuje i větší objem dat, které je nutno přenášet a zpracovat s čímž souvisí i nižší vzorkovací frekvence oproti fotodiodě. Pro real-time aplikace může ležet přenos a zpracování obrazových dat s vysokou snímkovací frekvencí za hranicemi současné techniky. Praktičtější omezení je však spíše ve volbě velikosti kamery. Pokud je kamera dostatečně malá a lehlá, lze ji připevnit ke svařovací hlavě koaxiálně k laserovému svazku pomocí děliče svazku. Nevýhodou je, že mezi svarovou lázní a keyhole se nachází obláček kovových par a plazmatu, který může komplikovat pozorování. Je tudíž zapotřebí navrhnout správnou optickou sestavu eliminující jeho vliv na kvalitu pozorování. Z tohoto důvodu je důležitá také důkladná rešerše a pochopení principu fungování doposud využívaných technik sledování svařovacího procesu.

2. Cíl disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je zmapovat možnosti optického sledování laserového svařovacího procesu a navrhnout a otestovat inovativní řešení. Navržené metody jsou zkoušeny na laserovém svařovacím pracovišti Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České Republiky, který poskytuje také zázemí pro vývoj optických, elektronických a mechanických prvků. Důraz je kladen na použitelnost vyvíjených metod v průmyslové praxi, tedy dostatečná robustnost a univerzálnost systému. Ohled je brán také na dostupnost a cenu používaných komponent. Například místo univerzálnějšího spektrometru, který je vhodný pro počáteční zarámování problému, bude cíleno spíše na využití fotodiód a kamer se selektivními optickými filtry. Obrázek 2.1 schematicky znázorňuje, že cílem je prozkoumat a zlepšit metody snímání procesu a nikoliv návrh komplexního řídicího systému.



Obrázek 2.1: Schéma monitorování laserového svařovacího procesu jako podmnožiny řízení procesu.

Nejprve bude popsán princip laserového svařování. Následně pak analyzovány možnosti jeho pozorování na základě rešerše současných metod snímacích a vyhodnocovacích technik. Rešerše také popíše dosud používaná průmyslová řešení a zhodnotí jejich silné a slabé stránky. Metody vyhodnocené jako nejlepší budou dále precizovány, na jejich základě budou navrženy nové přístupy a ty pak prakticky ověřovány na laserovém svařovacím pracovišti při svařování různých materiálů.

V počáteční fázi bude provedeno množství dílčích experimentů s využitím převážně fotodiód k detekci změn ve svařovacím procesu. Podle výsledku dílčích měření bude sestaven a dále rozvíjen optický nástavec svařovací hlavy, který umožní vhléd do procesu koaxiálně s laserovým svazkem v reálném čase. Bude se jednat o optickou sestavu s fotodiódou, kamerou, soustavu čoček, filtrů a dalších optických prvků pro detailnější zachycení svařovacího procesu a bez nežádoucích jevů.

Data získaná z fotodiódových senzorů a následně i ze zkonstruovaného experimentálního optického nástavce budou následně vyhodnocovány statistickými metodami a výsledky budou dány do souvislosti s procesními parametry a kvalitou svaru.

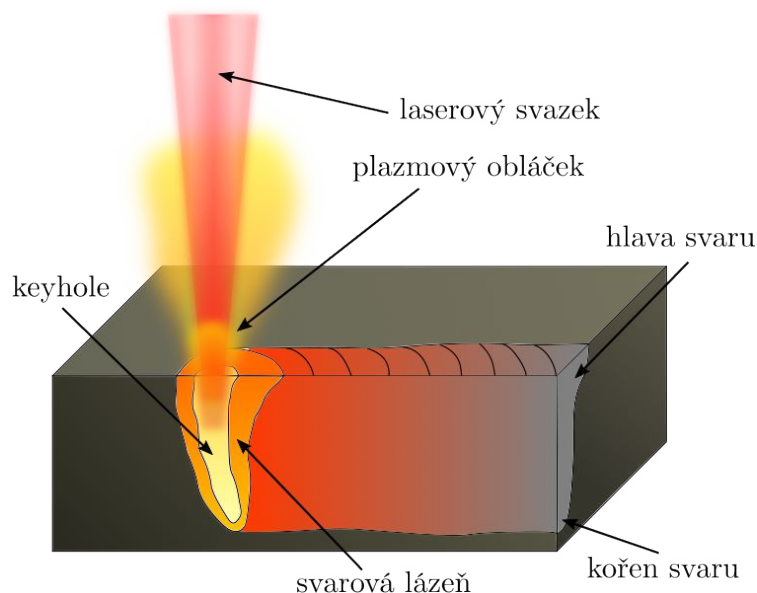
Výstupy budou diskutovány z hlediska potenciálu využití pro kontrolu svařovacího procesu a výsledky prezentovány na mezinárodních konferencích a v mezinárodních vědeckých časopisech, viz seznam vlastních publikací.

3. Analýza stavu řešené problematiky

3.1. Proces laserového svařování

Výsledná kvalita svaru je na makroskopické úrovni ovlivněna chováním roztaveného kovu svarové lázně. Při laserovém svařování mohou nastat tři svařovací režimy. Kondukční při kterém je hloubka svaru menší než jeho šířka. Teplo se šíří pouze vedením a výsledek je podobný konvenčním metodám svařování. Druhým a významnějším je penetrační režim kdy vzniká keyhole dutina udržovaná tlakem laserem indukovaného plazmatu a kovových par obklopené svarovou lázní, viz obrázek 3.1. V keyhole dochází k vícenásobným odrazům laserového záření, tím i jeho vyšší absorpci a naplno se využije potenciál laserového svařování. Keyhole se vlivem relativního pohybu laserového svazku vůči svařovanému dílu stává zakřivenou. Zakřivení se zvětšuje s rostoucí rychlostí a při vysokých rychlostech se průřez keyhole protahuje z přibližně kruhového na oválný [3].

Při interakci kovu s vysokoenergetickým laserovým svazkem se část kovu odpařuje a následně ionizuje. Plazma se rychle zahřívá a expanduje z keyhole ve formě plazmových výtrysků. Proces penetračního laserového svařování je tak doprovázen obláčkem plazmatu či kovových par nad svarovou lázní. Obláček budu z důvodu konvence nazývat plazmovým byť je jeho stupeň ionizace proměnný a se vzdáleností od keyhole klesá. Při penetračním režimu svařování je hloubka svaru větší než šířka a chování svarové lázně se často redukuje pouze na chování keyhole jako hlavní faktor kvality svaru. Třetí režim svařování nacházející se mezi dvěma předchozími je přechodný režim, kdy poměr hloubky svaru k jeho šířce, tj. štíhlost svaru, se pohybuje kolem hodnoty jedna. Hluboká keyhole není plně vyvinuta a může docházet k přechodům mezi kondukčním a penetračním režimem.



Obrázek 3.1: Schematický náčrt laserového svařovacího procesu.

3. ANALÝZA STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Svarová lázeň bývá před oxidací chráněna ochrannou atmosférou tvořenou inertními plyny. Nejčastěji se používá argon, méně často pak helium a speciální směsi založené na argonu s příměsemi jiných plynů (oxid uhličitý, kyslík, vodík,...). Cílem příměsí je pozitivně ovlivnit vlastnosti svaru nebo zvýšit produktivitu svařování. Kašpar a Němeček [4] uvádějí, že argon je více náchylný k ionizaci a při určité hustotě vnášené energie může docházet ke vzniku plynového plazmatu vzniklého ionizací ochranného plynu. Výhodou helia je jeho vysoký ionizační potenciál (nejvyšší ze všech prvků vůbec), který minimalizuje tvorbu plynového plazmatu. Menší tvorba plazmatu má pozitivní vliv na hloubku průvaru, jelikož je méně energie svazku pohlcováno obláčkem plazmatu.

Katayama et al. [5] studoval laserem indukované plazma při svařování a došel k závěru, že plazma u CO₂ laseru je mnohem hustší a brání jak pronikání laserového svazku k materiálu a tudíž brání jak větší hloubce průvaru, tak i přímému pozorování procesu, kdežto u pevnolátkového laseru s vlnovou délkou 1070 nm je vznikající plazma méně husté a tudíž absorbuje méně laserového záření. Absorpci měřil pomocí laserové sondy na vlnové délce 1090 nm. U pevnolátkového laseru také pozoroval dva typy obláčku. Spodní část vysoká přibližně 5 mm je tvořena laserem indukovaným slabě ionizovaným plazmatem a horní část dosahující výšky až 50 mm je tvořena malými kondenzovanými částicemi. Shcheglov [6] změřil, že výkon laserového svazku opouštějící obláček osciluje mezi 87 % a 95 % vstupujícího výkonu na testovací vlnové délce laserové sondy 1300 nm. Teplota plazmatu přitom nepřesahuje 4500 K ani při svařovacím výkonu 20 kW a ve většině případů se pohybuje kolem 2500 K. Klein [7] ukázal, že i malé změny svařovacího výkonu mohou indukovat oscilace svarové lázně v rozsahu několika kilohertzů a následně zapříčinit rozstřík. Plazmový obláček, tvar keyhole a kolísání výkonu laseru vstupujícího do keyhole jsou tedy vzájemně spjatá a změna jedné vlastnosti ovlivní zbylé, což umožňuje nepřímé pozorování.

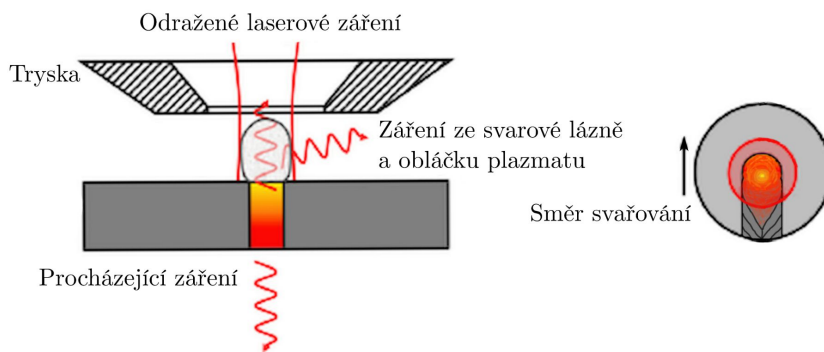
Plazmový obláček nad keyhole je zdrojem intenzivního optického záření. Na jedné straně tato skutečnost komplikuje přímá pozorování hloubky keyhole [8] a na druhé straně dává prostor pro nepřímé metody sledování procesu při kterých se snažíme na základě charakteristik emitovaného záření usuzovat na aktuální charakteristiky svarové lázně, potažmo vznikajícího svaru.

Projevy laserového svařování jsou znázorněny na schématu 3.2. Svařovací proces doprovází poměrně intenzivní viditelné světlo, laserové záření, tepelné záření svarové lázně a také zvukové projevy. Optické projevy převládají liší se pouze místem původu a vlnovou délkou elektromagnetického záření. Schéma při koaxiálním pohledu také znázorňuje, že v tomto směru je zorné pole omezeno aperturou trysky ochranného plynu.

Během laserového svařování, a laserového obrábění obecně, není využito 100 % laserového záření, ale část záření se odráží od roztaveného kovu a rozptyluje na obláčku. Neabsorbované laserové záření se odráží a rozptyluje do různých směrů nebo prochází skrz. Primárně je laserový odraz nežádoucí až nebezpečný, protože kromě okolí je ohrožován i samotný laserový zdroj a hrozí poškození optických elementů z důvodu možnosti vzniku druhého rezonátoru mezi svařovaným dílem a některým optickým elementem na trase. Aby se zabránilo nárůstu energie nad únosnou mez, bývá běžně na straně laseru nebo v procesní hlavě z bezpečnostních důvodů implementována detekce zpětně odraženého laserového záření v podobě fotodiody, která hlídá překročení kritické úrovně intenzity.

Svazek je z části pohlcován materiálem a využit na roztavení kovu, tedy užitečně na svar. Část může při otevřeném kořeni procházet skrz a část se odráží zpět od povrchu materiálu, svarové lázně a keyhole, případně rozptyluje na obláčku plazmatu. Určitá část

3.1. PROCES LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ



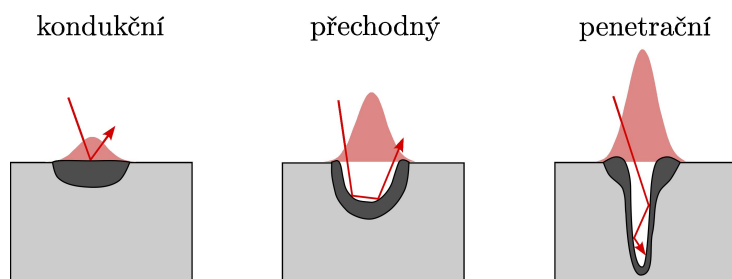
Obrázek 3.2: Schéma procesu laserového svařování při pohledu ve směru svařování a ve směru koaxiálním s laserovým svazkem. Schéma emisí při laserovém svařovacím procesu.

záření, která dopadá na detektor není odražena z oblasti svaru, ale pochází z rozptylu a odrazů na optických elementech uvnitř procesní hlavy. Nutno zmínit i tepelné záření, jehož část se překrývá s pracovní vlnovou délkou laseru, byť vliv tepelného záření je vzhledem k jeho nízké intenzitě malý. Souhrnně lze zapsat rovnici zpětně odraženého laserového záření 3.1, kde I značí intenzitu záření na vlnové délce laseru z různých zdrojů. Část paprsků je oříznuta aperturami optických elementů na trase a aperturou trysky ochranné atmosféry, pokud je použita koaxiální tryska.

$$I_{odrazene} = I_{optika} + I_{povrch} + I_{svarova\ lazne} + I_{keyhole} + I_{oblacek} + I_{termalni} \quad (3.1)$$

Schindhelm sledoval prostorové rozložení zpětně odraženého laserového záření při řezání CO_2 laserem a tvrdí, že pouze 10 % je odraženo z řezné spáry a 90 % z povrchu materiálu [9]. Prostorové rozložení odraženého laserového záření během laserového svařování je předmětem této práce. Lze předpokládat, že podobná situace jako při řezání může nastat v případě svařování tenkých plechů s otevřeným kořenem. Při svařování tlustších plechů v penetračním režimu bude poměr spíše opačný, jelikož záření nemůže procházet skrz materiál a většina bude pravděpodobně pocházet z místa s největší hustotou výkonu, tedy ze spodku keyhole a menší část pak z povrchu svarové lázně. Pro kondukční režim je zřejmé, že všechno odražené záření bude pocházet od relativně klidného a mělkého povrchu roztaveného povrchu a lze očekávat vyšší intenzity odraženého záření než u penetračního režimu.

Charakter odrazu laserového záření pro různé svařovací režimy a tvar výsledného svaru popisuje obrázek 3.3. Při nízké výkonové hustotě laserového svazku na povrchu materiálu se materiál pouze nataví a neabsorbované záření se od povrchu odráží pouze jednou. Pokud se zvýší výkonová hustota, začne se povrch taveniny prohlubovat a laserový svazek se odráží více než jednou, což zvyšuje účinnost absorpce. Při ještě větším nárůstu výkonové hustoty přechází svařování do penetračního režimu. Pro něj je typické, že uvnitř keyhole dochází k vícenásobnému odrazu [10]. Je zřejmé, že s rostoucím počtem odrazů roste efektivita využití energie pro vlastní proces svařování. Zároveň také klesá intenzita odraženého laserového záření. Na vícenásobných odrazech je založen princip penetračního laserového svařování.



Obrázek 3.3: Kondukční, přechodný a penetrační režim laserového svařování s vyznačeným rozložením výkonové hustoty laserového svazku a charakterem jeho odrazu.

3.2. Stav a trendy sledování procesu v laserových technologiích

V následující podkapitole jsou popsány současné způsoby využívání výkonové laserové svařovací techniky v průmyslu spolu s používanými monitorovacími systémy. Používané metody sledování stability procesu jsou téměř výhradně optické.

V průmyslu narůstá tlak na digitalizaci ve smyslu strategie průmyslu 4.0 a preferování ekologických a udržitelných technologií. Laserové svařování splňuje tyto podmínky. Nativně již obsahuje vysokou míru automatizace a integrovaných senzorů. Produkuje vysokou rychlostí štíhlé svary s menšími vnesenými deformacemi než konvenční metody a tudíž se může snížit množství přídavného materiálu nebo nutnost následného obrábění odpadá úplně. Navíc lze vyvíjet inovativní konstrukce klasickými metodami nesvařitelné.

Nasazování laserových technologií v průmyslu je aktuálně nejvíce taženo automobilovým průmyslem, konkrétněji sektorem e-mobility [11]. Využití laserů je opravdu široké. Pomocí laseru se dnes nahrazuje odporové bodování plechů, pájení s vysokou rychlostí, zahlazování hran a ořez plastových, kompozitních, pěnových a textilních dílců. Laser se používá také k čištění kovových i nekovových povrchů, kalení a značení dílů. Výrazně roste poptávka po svařování bateriových pouzder a pinů elektromotorů. Tyto jsou vyráběny převážně z hliníku, mědi a na nich založených slitinách. S rostoucím počtem materiálů vyvstává také potřeba pro heterogenní spoje. Spojují se oceli různých jakostí a tloušťek za účelem optimalizace mechanických vlastností, hmotnosti nebo ceny. Případně již zmíněné nahrazování ocelových slitin slitinami neželeznými.

Hliník a zvláště pak měď má malou absorpci záření na vlnové délce CO_2 laserů $10,6 \mu\text{m}$. V případě pevnolátkových a vláknových laserů s vlnovou délkou kolem $1 \mu\text{m}$ je absorpce lepší, avšak ne stále vysoká. Z tohoto důvodu je tlak na vývoj a nasazování laserů s kratšími vlnovými délkami. V oblasti e-mobility při svařování mědi je nutností používat zelené lasery pracující na vlnových délkách 515 a 532 nm v závislosti na použité technologii laseru a modré lasery na vlnových délkách 445 a 450 nm . V oblasti laserových zdrojů je dále trendem zvyšovat výkon a účinnost. Komerčně dostupné jsou již lasery s výkonem přes 100 kW . Největší zastoupení v automotive mají laserové systémy založené na výrobcích Trumpf, IPG, Blackbird, Precitec, Coherent a Lessmüller.

Zajímavým směrem je také svařování laserem za sníženého tlaku nebo ve vakuu. Svary se kvalitou a technologií přibližují svařování svazkem elektronů [12]. Hlavní myšlenkou je redukce obláčku plazmatu, který snižuje hloubku průvaru. Nižší tlak také snižuje bod tavení a varu běžně svařovaných kovů. Při použití vakua odpadá navíc nutnost krýt svar ochrannou atmosférou, protože absence kyslíku je dostatečná ochrana proti oxidaci. Re-

3.2. STAV A TRENDY SLEDOVÁNÍ PROCESU V LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍCH

isgen et al. [13] ukázali dobrou stabilitu procesu ve vakuu i při malých svařovacích rychlostech. Výhodou oproti svařování svazkem elektronů je klesající cena laserových zdrojů a možnost použít méně kvalitní vakuum, protože není nutné pro funkci procesního svazku. Další výhodou využití laserového svazku oproti elektronovému svazku je možnost svařovat magnetické díly.

Díky zvyšující se kompaktnosti a cenové dostupnosti laserových zdrojů vznikají i ruční přenosné čistící a svařovací systémy. Například ruční laserový svařovací systém IPG Photonics LightWELD 1500 velikosti konvenčního proudového zdroje s procesní hlavou integrovanou v rukojeti připomínající hořák obloukových metod. Je dostupný i ve verzi s podavačem drátu přináší tak výkonové laserové technologie do ručního svařování.

Výrobce laserů Coherent přišel s vylepšením kdy dva nezávislé laserové svazky vede jedním vláknem. Nazývá jej ARM (Adjustable Ring Mode) Jeden svazek je veden konvenčním vláknem, které je obaleno druhým vláknem tvaru mezikruží, jímž je veden druhý svazek. Prstencový svazek se nejčastěji využívá k přípravě povrchu pro primární svazek, například odstranění vrstev, nebo předehřev či dohřev materiálu. Lze tak snížit pórovitost a rozstřík svaru [14].

Další modifikací, která se již s úspěchem aplikuje, je dynamické tvarování svazku. Jeden přístup je pomocí rozmítání, kdy laserový svazek vykonává kromě primárního pohybu po svařovací trajektorii ještě další pohyby pomocí galvanicky vychylovaných zrcátek. Druhá metoda tvarování svazku je založena na koherentním kombinování několika jednomódových laserových svazků [15] a tedy zcela bez pohyblivých mechanických součástí. Nabízí jej například firma Civan lasers a kromě rozložení hustoty výkonu lze měnit v reálném čase s vysokou frekvencí i polohu ohniska. Těmito metodami dynamického tvarování laserového svazku je možné modifikovat rozměry, strukturu a výslednou kvalitu svaru. Rozmítání je vhodné především při svařování dílů s velkými tolerancemi, kde z důvodu příliš velké mezery selhává klasické laserové svařování.

Ideální metoda sledování kvality laserového svařování by měla pokrývat co největší škálu požadavků, které se vyskytují či v nejbližší době budou vyskytovat a být kompatibilní i s novými generacemi laserových zdrojů.

3.2.1. Průmyslové monitorovací systémy

Zatímco laserové svařování bylo ve výrobním průmyslu přijato relativně rychle, metody sledování a řízení procesu v reálném čase zatím zaostávají. Přestože některé monitorovací technologie pro laserové svařování již na trhu existují. Jedním z nejběžnějších přístupů je použití fotodiodových senzorů k měření světelného záření, které přirozeně emituje z procesu svařování laserem. Existuje také řada procesních senzorů pro navádění do svařované spáry (seam tracking) a kapacitní nebo optické senzory pro zabezpečení správného odstupu procesní hlavy od materiálu. Standardní postup je také kontrola kvality povrchu po svaření liniovým laserovým senzorem nebo kamerou. Nedílnou součástí špičkových průmyslových řešení je kromě vyhodnocení také on-line sběr dat a dokumentace provedených svarů. Cílem takovéto digitalizace výroby je zvýšit hospodárnost a konkurenceschopnost výrobního podniku.

Precitec jako specialista na vývoj procesních hlav a optickou metrologii nabízí systém LWM (Laser Welding Monitor). Tento optoelektronický nástavec se připojuje ke svařovací hlavě a je schopen po předchozí kalibraci detekovat mezeru mezi plechy, pokles výkonu a změnu polohy ohniska laserového svazku. Záření emitované svařovacím procesem je

rozděleno do tří pásem podle vlnových délek na viditelné (VIS), blízké infračervené pásmo (NIR) a pásmo obsahující vlnovou délku laseru. Z referenčních svarů se stanoví horní a dolní přípustné meze zaznamenávaných signálů a ty jsou porovnávány s daty aktuálně probíhajícího svaru. Eriksson et al. [16] došel k závěru, že fluktuace obláčku plazmatu znemožňují pozorování rychlých změn v oblasti svarové lázně v pásmech VIS a NIR. Dále zjistil, že při svařování oceli dopadá na NIR senzor LWM 30 % záření odraženého z povrchu a okolí svarové lázně a 70 % z oblasti keyhole a obláčku. V případě VIS pásma je polovina záření emitována z keyhole a polovina z obláčku plazmatu. Průběhy intenzit z pásem VIS a NIR jsou korelovány. Korelace platí i mezi průběhy integrální intenzity získané ze záznamu obláčku plazmatu vysokorychlostní kamerou a VIS, resp. NIR pásmem.

Dalším komerčním produktem je Precitec IDM (In-process Depth Meter), který funguje na principu optické koherentní tomografie. Světlo z nízko koherentního zdroje, super-svitivé diody, je rozděleno na referenční a měřicí větve. Na senzoru pak interferuje referenční větev odražená z pevného zrcátka s měřicí větví odraženou z oblasti procesu [17]. Informace o hloubce s rozlišením na jednotky mikrometrů je obsažena ve frekvenci ne v intenzitě. Přesnějších výsledků měření dosahuje Precitec IDM při penetračním režimu svařování. Pomocí zpětnovazebného řízení lze aktivně řídit hloubku svaru. Podobné řešení nabízí též firma Trumpf. Sensory na principu optické koherentní tomografie nachází uplatnění i ve sledování laserového kovového tisku metodou navařování drátu nebo prášku, kdy lze sledovat výšku a stav nanášené vrstvy.

Společnost nLight, dříve Plasco [18], nabízí vlastní průmyslový senzor sledování procesu založený na fotodiodách a to jak bočních, tak koaxiálních. Slibují detekci pórů, nedostatečné penetrace, nedostatečného spojení tzv. false friends svarů a dalších defektů. Pracuje na podobných principech jako Precitec LWM, ale nabízí více možností konfigurace. Nevýhodou opět je, nutnost nastavit parametry snímání a regulační meze pro každou úlohu zvlášť a výsledky jsou tak kvalitní jak dobře se systém parametrizuje.

Výrobce kamer New Infrared Technologies má kamerový systém sledující proces koaxiálně s laserovým svazkem [19]. Svařovací proces je snímán kamerou citlivou v oblasti NIR (vlnová délka 1-5 μm) s frekvencí 1 kHz. Algoritmus využívající analýzu hlavních komponent a supervizovaného učení je schopný poznat díry, póry, neprůvar a nedostatečné spojení.

3.2.2. Současné vědecké přístupy

Pochopení chování keyhole, plazmového obláčku a celého svařovacího procesu začíná u jejich pozorování. Matsunawa et al. [20] použil vysokorychlostní kameru a metodu rentgenového prozařování ke sledování laserem indukovaného plazmatu, keyhole a tvorbu pórů v reálném čase. Zkoumal jak kontinuální, tak pulsní režim laseru a pozoroval provázání dynamiky keyhole a plazmového obláčku. Chování laserem indukované plazmatu a keyhole bylo v jeho případě periodické, tedy podobně jako teoreticky popsali Klein [2].

Při penetračním režimu svařování s nižším výkonem laseru se keyhole otevírá a zavírá. V určitých okamžicích keyhole nemusí existovat, protože v důsledku malého výkonu dopadajícího laseru může zkolabovat. Se zvyšujícím se výkonem se interval kolapsu keyhole prodlužuje až při určitém rozmezí výkonu zůstává stabilní po celou dobu procesu. Naopak při příliš vysokém výkonu laseru začíná být keyhole opět nestabilní, kolabuje a interval mezi kolapsy se opět zkracuje. Při kolapsu se může zaškrtnit spodní část keyhole a vzniknout pór.

3.2. STAV A TRENDY SLEDOVÁNÍ PROCESU V LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍCH

Sledování laserového procesu kamerou se uplatňuje také v oblasti laserového řezání, kdy Levichev [22] použil kameru připevněnou koaxiálně k řezné hlavě vybavenou filtry tak, aby sledoval pouze tepelné záření a odstínil záření laserové. Ukázal, že na základě pořízených snímků lze pro materiály velké tloušťky optimalizovat kvalitu řezu pomocí úpravy procesní rychlosti.

V současné době se dostávají do popředí postupy založené na metodách strojového učení. Používají se metody jak s učitelem, tak bez učitele. Výhodou metod založených na datech je, že k vytvoření matematického modelu není nutné explicitně modelovat fyzikální chování systému. Jelikož je svařovací proces velmi dynamický a chování keyhole částečně chaotické, nemusí být snaha o přesnou fyzikální rekonstrukci všech probíhajících dějů pro kvalitativní klasifikaci výsledku svařovacího procesu proveditelná v reálném čase. Alespoň přibližná znalost fyzikálního procesu však může pomoci s výběrem vhodných senzorů pro vstupní signály modelu řízeného daty. Knaak et al se zaměřili na zkoumání možností detekce svarových vad pomocí těchto progresivních metod [23]. Kromě klasických přístupů jako vícevrstevného perceptronu (MLP), logistické regrese (LogReg), metody podpůrných vektorů (SVM), rozhodovacích stromů (DT), náhodného lesa (RF) a metody nejbližších sousedů (kNN) aplikoval také konvoluční (CNN) a rekurentní (GRU) neuronové sítě na snímky svařovacího procesu pořízené v blízkém a středním infračerveném spektru. I zde je vidět trend kombinace více přístupů, protože výsledný klasifikátor je pak tvořen třemi metodami s nejlepšími výsledky (kNN + Non-Linear SVM + CNN-GRU). Kombinovaný klasifikátor poznal nedostatečný spoj (false friend), propadený kořen, nedostatečnou penetraci a odchylku v šířce svaru.

Kim et al. použil vysokorychlostní koaxiální kameru spolu s detekcí objektů založeným na neuronové síti YOLOv4 pro přesné automatizované měření průměru keyhole [24]. Dosahoval přesnosti 98,23 % pro odhad horního průměru keyhole a 95,6 % pro spodní průměr keyhole při rychlosti vyhodnocování 156 fps. Pomocí modelu ResNet-34 odhadoval absorpenci laserového svazku uvnitř keyhole. Tvar keyhole odhadoval na základě lineární rekonstrukce tvaru keyhole ze známých poloh a rozměrů horního a spodního průměru keyhole. Lineární aproximace keyhole však není příliš vhodná pro vyšší svařovací rychlosti, kde nedostatečně modeluje zakřivení keyhole. Absorbance laserového svazku materiálem je jedním z faktorů, které nejvíce ovlivňují stabilitu procesu. Je však velmi obtížné ji měřit klasickými metodami a proto k odhadu absorpance využil měření intenzity provázané s ray-tracing simulacemi pomocí metod strojového učení. Experimentálně také zjistil, že změny v absorpenci jsou úzce spjaty s chováním keyhole a v důsledku mají vliv na kvalitu svaru. Rozměry keyhole i její absorpance v průběhu procesu svařování značně kolísají. Absorbance se například zvyšuje, když se zmenšuje plocha spodního průměru keyhole a nebo se zvyšuje úhel náklonu laserového svazku [21]. Absorbance laseru prudce poklesala při vytvoření defektu a navíc se dramaticky zmenšila šířka tavné lázně. Je však nutné brát v úvahu, že tyto závěry autoři činili na základě simulací na zjednodušeném modelu.

Tvar povrchu, ať už svaru nebo svarové lázně lze měřit pomocí kalibrované kamery a laserem promítaného vzoru, jak ukázal Saeed et al. [25]. Většinou se toto řešení využívá při sledování obloukového svařování, ale pro laserové svařování jej lze také použít.

Častým požadavkem při laserovém svařování je navádění nebo alespoň kontrola polohy svazku vůči svařovanému místu. Proto Dilger et al. použil metody strojového učení na posouzení polohy laserového svazku vzhledem ke svarové spáře [26]. Popsanou tréninkovou množinu snímků z koaxiálně umístěné kamery snímající tepelné záření svařovacího

procesu použil k naučení konvoluční neuronové sítě. Natrénovaná neuronová síť následně hledala polohu svarové spáry a tedy hlídala polohu laserového svazku vůči spáře. Částečně odstranil nedostatek kdy při dobře sesazených dílech a tedy prakticky nulové šířce spáry nemusejí klasické metody typu liniového triangulačního senzoru nebo OCT fungovat dobře. Avšak jeho metoda je použitelná jen pro případ dostatečně malé svarové lázně, kdy nedochází k roztavení svařovaného materiálu v příliš velké vzdálenosti před svarem.

3.3. Optická emisní spektroskopie

Laserové svařování je doprovázeno množstvím světelného záření. Jeho Zdrojem je nejen vlastní laserový svazek, ale i tepelné záření roztaveného kovu a v neposlední řadě i plazmový obláček. Svařovací proces nevyzařuje na všech vlnových délkách stejně. Optické emisní spektrum se měří spektrometrem a skládá se ze spojitého spektra a čárového spektra ionizovaných a slabě ionizovaných prvků. Spojité spektrum popisuje Planckův vyzařovací zákon 3.2

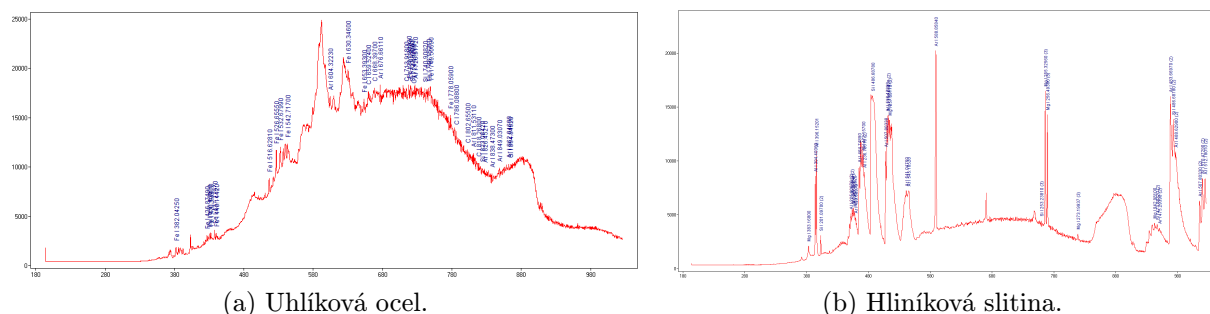
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2 \varepsilon}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1}, \quad (3.2)$$

kde I je intenzita vyzařování, tj. zářivý výkon jednotky povrchu, T teplota absolutně černého tělesa, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js Planckova konstanta, $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ Jk⁻¹ Boltzmannova konstanta, ε emisivita povrchu zářiče a c je rychlost světla. Emisivita se často uvažuje jako materiálová konstanta, ale ve skutečnosti je funkcí řady parametrů - teploty, vlnové délky, struktury povrchu a úhlu pozorování. Absolutně černé těleso má emisivitu $\varepsilon_0 = 1$ a reálná šedá tělesa $\varepsilon = (0; 1)$.

Z Planckova zákona lze integrací přes všechny vlnové délky získat Stefan-Boltzmannův zákon popisující celkové záření tělesa na dané teplotě. Pro šedé těleso jej lze zapsat ve tvaru

$$P = \varepsilon \sigma S T^4, \quad (3.3)$$

kde S plocha zářiče a $\sigma = 5,670400 \cdot 10^{-8}$ Wm⁻²K⁻⁴ Stefanova-Boltzmannova konstanta. Z Wienova posunovacího zákona lze určit vyzařovanou vlnovou délku černého tělesa s maximální energií.



Obrázek 3.4: Optické emisní spektrum změřené spektrometrem v průběhu laserového svařování.

3.3. OPTICKÁ EMISNÍ SPEKTROSKOPIE

Na obrázku 3.4 jsou optická spektra naměřená v průběhu svařování. Jedná se o směr spojitého spektra popisující záření černého, resp. šedého tělesa a čárového spektra odpovídající excitovaným čarám jednotlivých prvků. Čárové spektrum se liší podle svařovaného materiálu a složení ochranné atmosféry. Na spektru uhlíkové oceli 3.4a jsou v emisním čárovém spektru zastoupeny čáry železa, uhlíku, křemíku a také argonu, který pochází z ochranné atmosféry. Čárové spektrum hliníkové slitiny 3.4b obsahuje hliník, hořčík, křemík a opět argon. Zdaleka nejsilnější spektrální čára je vlnová délka použitého laseru, avšak v tomto případě se nenachází v rozsahu spektrometru.

Ačkoliv jsou data o zastoupených prvcích užitečná informace, daří se ji použít pouze ve speciálních případech. Například když se svařují dva různé materiály na sobě a pomocí spektrometru se hlídá spojení obou materiálů [27]. Spektrální měření se také používají pro nepřímé měření teploty plazmového obláčku [28]. Spektrometr produkuje velké množství dat a obecně nelze říci přesnou vlnovou délku nebo pásmo na které se zaměřit. Vyhodnocovat všechny vlnové délky zároveň je neefektivní, jelikož užitečnou informaci nese jen malá podmnožina. Jistým kompromisem a zjednodušením jsou kombinované fotodiodové senzory, které rozdělí spektrum na několik oblastí. Toto řešení však nemusí být dostatečné a není tolik univerzální.

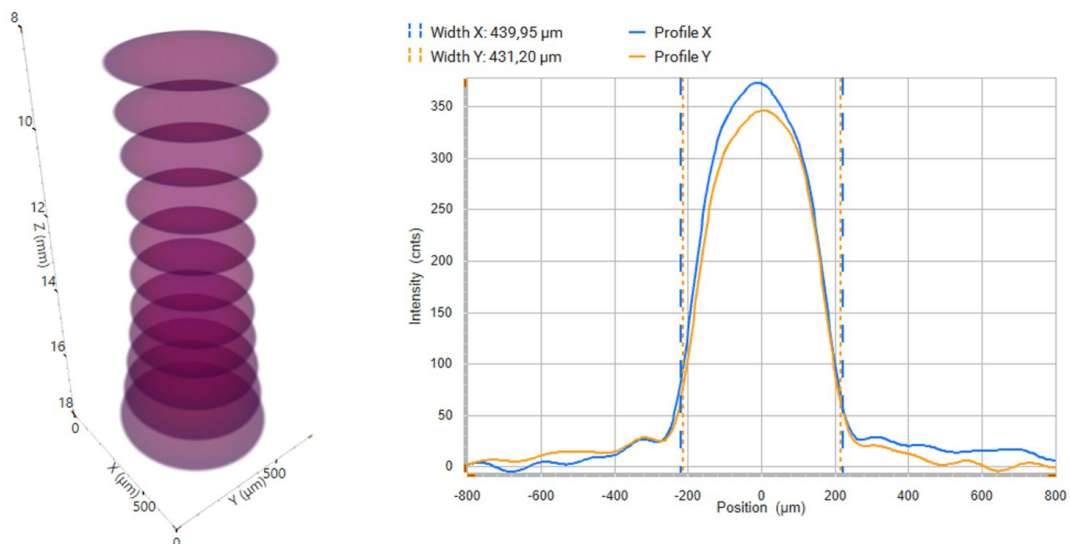
4. Zvolené metody

4.1. Experimentální sestava

Svařovací experimenty i vývoj optických monitorovacích sestav a probíhal na laserovém pracovišti Ústavu přístrojové technologie Akademie věd České republiky. Kde je k dispozici pevnolátkový vláknový laser IPG YLS-2000 pracující na vlnové délce 1070 ± 10 nm s maximálním výkonem 2 kW. Používaná je procesní hlava Precitec YW30 s dopravním optickým vláknem o průměru 200 μm , což v kombinaci s kolimační čočkou ohniskové vzdálenosti 100 mm a fokusační čočkou ohniskové vzdálenosti 200 mm vyústí v laserový svazek s průměrem v pasu, tj. ohnisku, 400 μm . Variantně je v některých experimentech použito užší dopravní vlákno s průměrem 100 μm jemuž odpovídá průměr svazku v ohnisku 200 μm .

4.1.1. Parametry laserového svazku

Vlastnosti laserového svazku byly ověřeny pomocí bezkontaktního profilometru Beam-Watch, Ophir Photonics [29]. Profilometr funguje na principu Rayleighova rozptylu. Pomocí dvojice kamer zaznamenává profil laserového svazku ve dvou kolmých směrech a zrekonstruuje profil svazku v dostatečné kvalitě pro průmyslové i vědecké aplikace, viz obrázek 4.1. Laserový svazek prochází dutinou měřícího přístroje a následně je absorbován v pohlcovači svazku. Průměr svazku v ohnisku byl určen $D4\sigma$ metodou, která je obecnější než $1/e^2$ metoda a splňuje mezinárodní standard ISO 11146-1:2005. Metoda $1/e^2$ je definovaná jako vzdálenost bodů marginálního rozdělení v $1/e^2 \doteq 0,135$ násobku maximální intenzity. Kdežto metoda $D4\sigma$ definuje šířku svazku jako čtyřnásobek směrodatné odchylky jeho marginálního rozdělení a je vhodnější pro negaussovské svazky.



Obrázek 4.1: Zobrazení laserového svazku profilometrem BeamWatch.

Měření profilu laserového svazku, které popisuje tabulka 4.1, bylo provedeno pro výkony laseru 1000 a 2000 W. Šířka pasu v ohnisku pro 1000 W odpovídá teoretické šířce

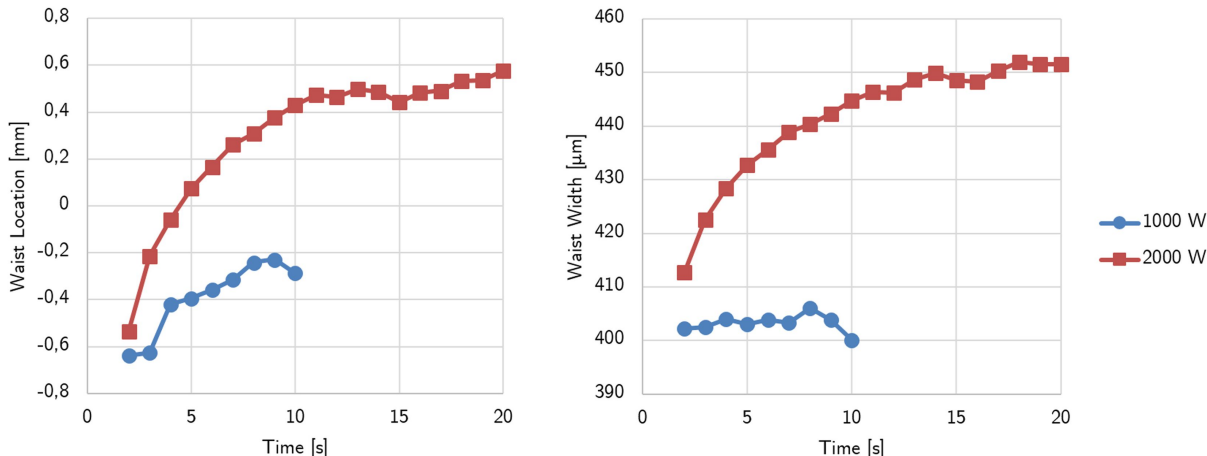
4.1. EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVA

400 μm , pro 2000 W je naměřena hodnota o přibližně 40 μm vyšší. Poloha ohniska se pohybuje přibližně 0,4 mm kolem nulové polohy, ale s poměrně velkou směrodatnou odchylkou, zvláště pro výkon 2000 W. Vzhledem k poměrně velké Raileigho délce laserového svazku necelých 6 mm by měl být svařovací proces poměrně necitlivý na změny polohy ohniska v řádu desetin milimetru. Citlivá detekční metoda však i takové změny může zaznamenat. Vysoká hodnota M^2 poukazuje že svazek není gaussovský což je v souladu s tím, že použitý laser je multimódový.

	1000 W	2000 W
Waist Width [μm]	$398,3 \pm 18,14$	$445,72 \pm 10,15$
Waist location [mm]	$-0,39 \pm 0,13$	$0,45 \pm 0,31$
Rayleigh Length [μm]	$5,64 \pm 0,48$	$5,85 \pm 0,07$
M^2 [-]	$20,77 \pm 0,57$	$24,95 \pm 0,10$
Divergence [mrad]	$71,49 \pm 5,38$	$76,24 \pm 1,49$

Tabulka 4.1: Naměřené parametry laserového svazku pro hodnoty výkonu 1000 a 2000 W.

Profilometr umožňuje zaznamenat i změnu parametrů svazku v čase, byl podrobněji proměřen vývoj polohy ohniska a šířky pasu jakožto klíčových parametrů. Měření probíhalo do doby než se sledované parametry jevíly stabilní, tedy po dobu 10 a 20 s. Tato doba také odpovídá typické době trvání svarů v rámci experimentů.



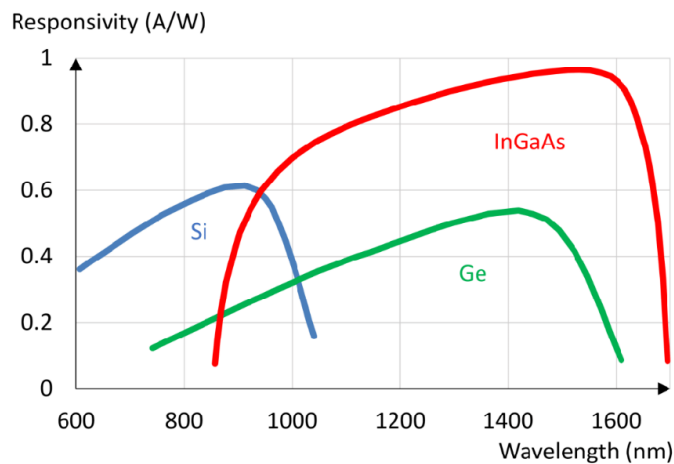
Obrázek 4.2: Vývoj polohy ohniska a šířky pasu laserového svazku v čase pro výkon laseru 1000 a 2000 W.

Průběhy zobrazuje 4.2 a opravdu je viditelný posun polohy ohniska směrem nahoru spolu se zvětšováním šířky pasu. Výraznější jsou posuny u výkonu 2000 W. Takové chování bývá způsobeno zahříváním elementů výkonové optické trasy. Při výstupním laserovém výkonu 1000 W (modrá) není vliv zahřívání optiky tak výrazný a například šířka pasu laserového svazku se nemění prakticky vůbec. Měření parametrů svazku při nižších hodnotách výkonu laseru je obtížné BeamWatchem spolehlivě proměřit. Výrobce udává

použitelnost přístroje od 500 W výše. Dosud výrobce ověřil možnost měření až do výkonu 100 kW. Jelikož se tato práce zaměřuje převážně na penetrační režim svařování, lze vzhledem k maximálnímu výkonu použitého laseru považovat proměření svazku na hodnotách výkonu 1000 a 2000 W jako dostatečné pro ohrazení parametrů použitého laserového svazku.

4.1.2. Fotodiodové senzory

Nejjednodušší optická metoda získávání údajů o svařovacím procesu je pomocí fotodiody. Tou lze sledovat svařovací proces buď z boku nebo koaxiálně s laserovým svazkem. Její výhodou je nízká pořizovací cena a možnost vysokých vzorkovacích frekvencí. Pomocí optických filtrů se lze zaměřovat na konkrétní části spektra. Ohled také musí být brán na spektrální citlivost detektoru.



Obrázek 4.3: Typická spektrální citlivost pro Si, InGaAs a Ge detektory [30].

Laser používaný pro svařovací experimenty pracuje na vlnové délce 1070 ± 10 nm. Z obrázku 4.3 plyne, že pokud bychom chtěli pozorovat například zmíněnou spektrální čáru laseru, bylo by nejvhodnější používat polovodičové detektory založené na indium-galium-arsenidu případně germaniu, protože na dané vlnové délce mají větší citlivost. Avšak připravili bychom se o část rozsahu ve viditelném spektru. S použitím optických filtrů typu pásmová propust' bylo experimentálně ověřeno, že i detektory založené na křemíku jsou dostatečně citlivé na vlnové délce 1070 nm. Nízká citlivost na této vlnové délce je kompenzována vysokou intenzitou laserového záření. V některých případech je naopak potřeba intenzitu dopadajícího laserového záření tlumit. Z těchto důvodů budou používány křemíkové fotodiody. Tato volba má přesah i do oblasti kamer. V případě fotodiody není velký problém použít různé typy, ale v případě kamer je větší nabídka v křemíkových verzích. Z tohoto důvodu budou pro další experimenty přednostně využity křemíkové fotodiody a kamery.

Pro snímání svařovacího procesu byla v první fázi připevněna ke svařovací hlavě boční fotodiody ve vzdálenosti 75 mm od místa interakce laserového svazku s materiálem a svírá úhel 20° s povrchem svařovaného materiálu, viz obrázek 4.4.

Křemíková fotodiody Hamamatsu S1336-BQ je zasazena v mosazném pouzdru, které obsahuje prostor pro ochranné okénko a optické filtry. Při experimentech byl používán šedý filtr pro potlačení intenzity a zamezení její saturace. Boční fotodiody tudíž zazname-

4.1. EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVA



Obrázek 4.4: Boční fotodioda připevněná ke svařovací hlavě.

nává široké spektrum vlnových délek. Pouzdro chrání optiku a detektor před nepříznivými vlivy svařovacího procesu a zároveň omezuje zorný úhel. Správně zvolený úhel má vliv na to, jaká část procesu se bude snímána. Při volbě příliš širokého úhlu záběru fotodiody se bude v měřené intenzitě sčítat příspěvek ze záření obláčku plazmatu, svarové lázně a případně odraženého či rozptýleného laserového záření. Naopak při úzkém úhlu záběru se sice některé příspěvky potlačí, ale bude kritické správné nasměrování fotodiody a měření mohou mít z tohoto důvodu problém s opakovatelností při častém rozebírání a znovu sestavování měřící sestavy. Pouzdro fotodiody omezuje pozorovací úhel na $10,5^\circ$, což v dané vzdálenosti představuje kruh o průměru 14 mm a pokrývá téměř celý svařovací proces. Napětí na výstupu zesilovače odpovídající měřené intenzitě je zaznamenáváno pomocí software LabVIEW přes měřící kartu National Instruments USB-6221 se vzorkovací frekvencí 40 kHz a následné vyhodnocení je prováděno na platformě MATLAB. Zkoušeny byly i vyšší snímkovací frekvence, ale tyto nepřinášely další přidanou hodnotu, tak z důvodu úspory místa byla zvolena s dostatečnou rezervou nižší frekvence než maximální možná.

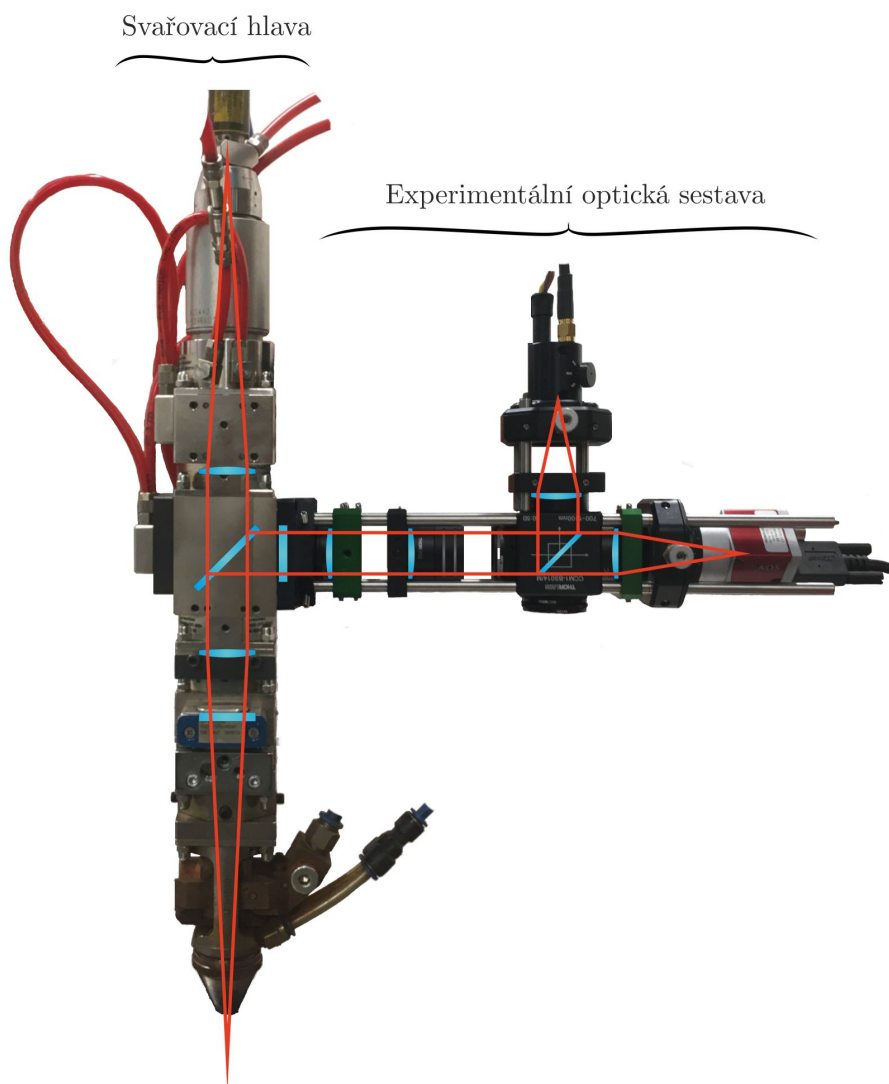
Dalším využívaným zdrojem informací o svařovacím procesu je senzor zpětně odraženého laserového záření v laseru. Jedná se o fotodiody vestavěnou v laserovém zdroji a primárně zajišťující jeho bezpečnost. Napětí odpovídající detekované intenzitě je standardně vyvedeno na komunikační konektor laseru odkud je připojeno na měřící kartu NI USB-6221. Přesné detaily o zapojení vestavěné fotodiody nejsou známy, jelikož se jedná o kow-how výrobce a zjištěné informace byly zjištěny metodami reverzního inženýrství.

Fotodiody vestavěná v laseru snímá laserové záření rozptýlené v dopravním vlákne a také laserové záření odražené zpět, například nečekaně intenzivní odraz z místa procesu. Jedná se vlastně o variantu koaxiálního sledování procesu fotodiody s optickým filtrem typu pásmová propust' na pracovní vlnové délce laseru. Tento vestavěný senzor bude využíván nestandardním způsobem ke sledování svařovacího procesu a ne pouze k ochraně zařízení. Intenzita zpětně odraženého laserového záření zkoumaná v této práci je pod kritickými limity nastavenými výrobcem zařízení. Kritické limity intenzity nelze překročit, jelikož při nich dojde k okamžitému ukončení emise laserového zdroje.

4.1.3. Koaxiální optický nástavec

Fotodiody poskytují pouze prostorově integrovanou informaci o záření, které je emitováno ze svařovaného místa. Nelze tudíž přímo získat přesnou představu o geometrických vlastnostech keyhole a svařové lázně. Rozšířením průběhu intenzity o prostorové souřadnice očekávám získání cenných informací o svařovacím procesu.

Za účelem koaxiálního sledování procesu jak fotodiodou, tak kamerou a to i souběžně byl navržen optický nástavec na modulární svařovací hlavu Precitec YW30, viz obrázek 4.5.



Obrázek 4.5: Experimentální optický nástavec připevněný ke standardní svařovací hlavě

Optický nástavec se připevňuje na blok děliče svazku svařovací hlavy a nahrazuje standardně dodávaný kamerový nástavec určený pouze k přesnému polohování laserového svazku vůči svařovanému dílu. Byla navržena a vyrobena redukce mezi svařovací hlavou a 30 mm klecovým systémem od firmy Thorlabs, jehož díly tvoří základ konstrukce. Redukce obsahuje ochranné okénko, které brání vniknutí nečistot do výkonové optiky svařovací hlavy. Používané optické elementy jsou opatřeny antireflexní (AR) vrstvou na vlnové délce

4.1. EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVA

laseru pro zamezení nežádoucích odlesků. Poté následuje volitelný expander skládající se ze dvou čoček jehož cílem je měnit průměr kolimovaného svazku vystupujícího ze zpětné větve děliče svazku ve svařovací hlavě. Kolimovaný svazek prochází přes optické filtry. Volbou filtrů je možno vybrat různý rozsah vlnových délek. Primárním cílem optické sestavy je však sledovat svařovací proces na vlnové délce pracovního laseru a to 1070 nm. Proto je zařazen filtr Thorlabs FBH 1070 typu pásmová propust, který propustí pouze vlnové délky v rozsahu 1070 ± 5 nm. Pro potlačení intenzity jej doplňuje šedý filtr Thorlabs NDUV30B s optickou hustotou $OD = 3$. Propustnost filtrů v oblasti cílové vlnové délky laseru popisuje přesněji tabulka 4.2.

Vlnová délka [nm]	$T_{NDUV30B}$ [%]	T_{BP1070} [%]	$T_{NDUV30B+BP1070}$ [%]
1050	0,2928	0,0006	0,0000
1060	0,3072	0,1733	0,0005
1070	0,3306	96,5162	0,3191
1080	0,3370	0,0756	0,0003
1090	0,3150	0,0007	0,0000

Tabulka 4.2: Propust použitých optických filtrů v oblasti kolem vlnové délky laseru.

Posledním prvkem před děličem je irisová clona blokující paprsky jdoucí mimo optickou osu. Před děličem je co nejvíce společných prvků a to z důvodu aby obě větve vystupující z děliče v poměru 50:50 byly co nejvíce rovnocenné a nedocházelo ke zbytečné duplikaci optických elementů.

Na jedné větvi se za fokusační čočkou nachází fotodioda zabudovaná v pouzdru spolu se zesilovačem. Díky zmiňovaným optickým filtrům v nastavci je fotodioda citlivá pouze na vlnovou délku laseru stejně jako vestavěná fotodioda v laseru a také sleduje proces koaxiálně. Jediným rozdílem mezi nimi je zařazení ještě před dopravní optické vlákno. Z toho důvodu by měla být citlivější, protože zaznamená i záření, které se nenaváže do dopravního vlákna. Fotodioda je zasazena do mechanického křížového posuvu a je tak umožněno upravovat její polohu ve dvou osách pro přesné sesazení s optickou osou.

Na druhé větvi, opět za fokusační čočkou, je kamera. Při volbě kamery bylo potřeba zvážit několik omezení. Ze spektrálního hlediska by byla vhodná InGaAs kamera, avšak tento typ kamer má typicky nižší snímkovací frekvenci a rozlišení oproti Si kamerám. Jelikož jevy při laserovém svařování jsou vysoce dynamické, je důležité mít vysokou snímkovací frekvenci. Kamery s vysokou snímkovací frekvencí ovšem mívají větší rozměry a hmotnost. Po zvážení všech požadavků byla jako kompromisní řešení zvolena kamera AOS Promon U750. Jedná se o malou a relativně rychlou kameru s křemíkovým čipem. Kamera je provozována na 200 fps při plném rozlišení a 3003 fps při vybrané oblasti zájmu se sníženým rozlišením 144×140 px. Expoziční doba je vždy volena nejkratší možná pro ostré zachycení i rychlých dějů, pro tuto kameru je nejkratší expoziční doba 59 μ s.

Celá sestava je při svařování chráněna hliníkovým krytem. Zvýšenou pozornost je potřeba věnovat ostření, protože rovina ostrosti na vlnové délce 1070 nm je oproti rovině ostrosti ve viditelném světle posunutá. Je to způsobeno závislostí indexu lomu světla na vlnové délce.

4.1.4. Zvolené materiály

Na svařovací experimenty byly použity tři různé materiály. Jedná se o dvě běžně používané oceli a jednu hliníkovou slitinu. Cílem bylo zajistit dostatečnou variabilitu materiálů a co nejvíce se přiblížit typickým podmínkám využití laserů v průmyslu.

Byla zvolena univerzální nelegovaná konstrukční ocel vyšší kvality S355J2 (W.Nr. 1.0577), která se vyznačuje vysokou pevností, tažností i zaručenou svařitelností. Používá se pro výrobu strojních součástí a stavebních ocelových konstrukcí. Ocel je vhodná pro svařované konstrukce a strojní součásti s vyšší mezí kluzu, staticky i dynamicky namáhané. Tato ocel je vhodná ke svařování, avšak s rostoucí tloušťkou výrobku a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti svaru [31].

C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Fe
≤ 0,2	≤ 0,55	≤ 1,6	≤ 0,025	≤ 0,025	-	≤ 0,55	zbytek

Tabulka 4.3: Hmotnostní podíl prvků v uhlíkové oceli S355J2 dle ČSN EN 10025-2 [32]

Pro porovnání vlivu materiálu byla zvolena ještě druhá ocel a to nejpoužívanější korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 (W.Nr. 1.4301), což je legovaná, ušlechtilá austenitická chrom-niklová ocel. Je odolná proti vodě a slabým kyselinám, lešitelná a vhodná ke svařování všemi obvyklými způsoby svařování. Avšak v oblasti svaru je náchylná na mezikrystalickou korozi. Nepodléhá fázovým přeměnám a je nemagnetická. Často se používá v potravinářském, farmaceutickém a chladírenském průmyslu, ale i pro interiéry a stavebnictví. Strukturu této oceli tvoří převážně austenit tj. tuhý roztok uhlíku v železe γ . Austenitická struktura vzniká při dostatečném obsahu tzv. austenitotvorných prvků (Ni, Mn, N) viz tabulka složení 4.4. Korozní odolnost zajišťují prvky Cr, Mo, Cu, Si, Ni a pevnost je zvyšována legováním dusíkem [33].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Cu	Fe
≤ 0,07	≤ 1	≤ 2	≤ 0,045	≤ 0,015	17,5 - 19,5	-	8 - 10,5	≤ 0,1	-	zb.

Tabulka 4.4: Hmotnostní podíl prvků v korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 dle ČSN EN 10088-2 [34]

Jako zástupce neželezných kovů byla vybrána hliníková slitina EN AW 5083 (W.Nr. 3.3547). Tato slitina třídy 5000 vyniká chemickou odolností a pevností, kterou si zachovává i po svařování. Svařitelnost je vynikající, stejně tak je slitina dobře obrobitelná, lešitelná a eloxovatelná. Její typické použití je při výrobě tlakových nádob, stavbu lodí a karoserií v automobilovém a drážním průmyslu.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,1	0,4 - 1	4 - 4,9	0,05 - 0,25	-	≤ 0,25	≤ 0,15	zbytek

Tabulka 4.5: Hmotnostní podíl prvků v hliníkové slitině EN AW-5083 dle ČSN EN 573-3 [35]

4.2. Matematické metody

Ve statistickém vyhodnocení se často vyskytuje normální rozdělení pravděpodobnosti. Předpoklad normality zpracovávaných dat je také běžný při testování statistických hypotéz a v metodice statistického řízení kvality [36, 37]. Stručně budou popsány testy normality a metody transformace dat na normální rozdělení.

Normální, nebo-li Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti se vyskytuje převážně tam, kde je kolísání náhodné veličiny zapříčiněno součtem velkého počtu nepatrných, vzájemně nezávislých vlivů. Ke konstantě μ vyjadřující přesnou hodnotu náhodné veličiny se přičítá variabilita vyjádřená parametrem σ . Spojitá náhodná veličina X má normální rozdělení $N(\mu, \sigma^2)$, právě když funkce hustoty má tvar

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

Distribuční funkce normálního rozdělení je definována

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt.$$

Parametr μ se nazývá střední hodnota a parametr σ^2 rozptyl normálního rozdělení [38]. Odmocnina z rozptylu se nazývá směrodatná odchylka a označuje se σ . Hodnoty parametrů rozdělení však nejsou ve většině případů známy a je nutné je odhadnout. Definujme r -tý obecný moment

$$m'_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^r.$$

První obecný moment je výběrovým průměrem $\bar{x} = m'_1$ a je odhadem střední hodnoty normálního rozdělení. Dále definujme r -tý centrální moment

$$m_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^r.$$

Druhý centrální moment je pak odhadem rozptylu $s_n^2 = m_2$, který se častěji používá ve své nestranné podobě výběrového rozptylu $s^2 = \frac{n}{n-1} s_n^2$.

V popisné statistice se využívají také koeficienty šikmosti a špičatosti. Nejsou-li si všechny hodnoty x_i stejné, zavádí se výběrový koeficient šikmosti a_3 a špičatosti a_4 pomocí centrálních momentů

$$a_3 = \frac{m_3}{m_2^{3/2}}, \quad a_4 = \frac{m_4}{m_2^2}.$$

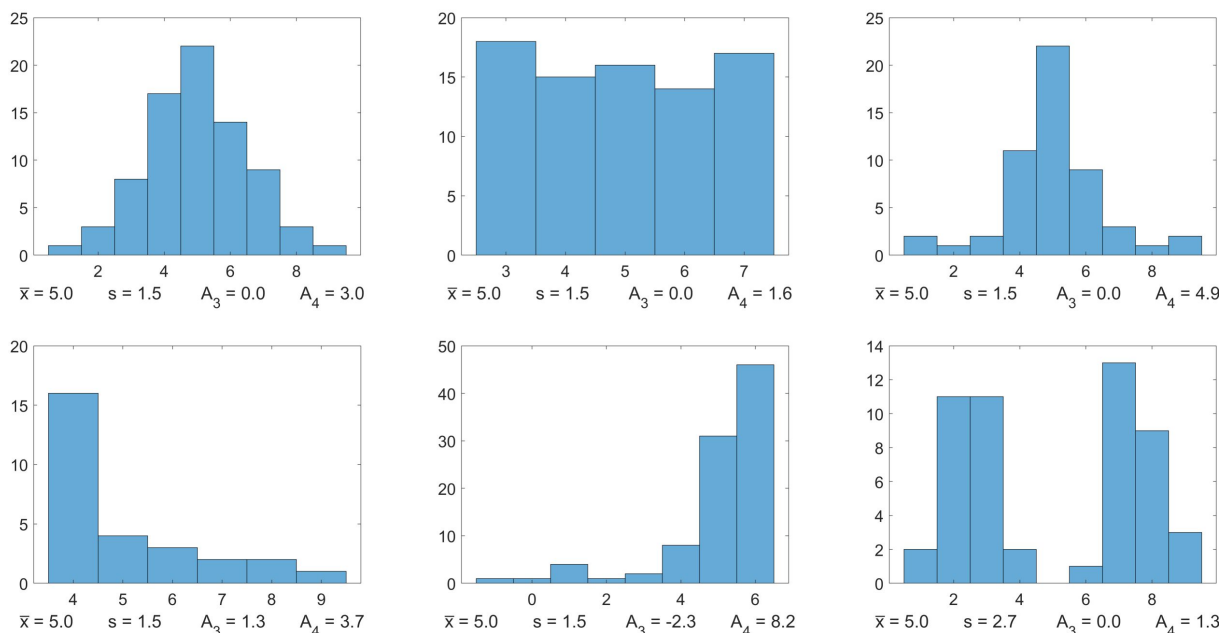
Jsou-li data x_1, \dots, x_n rozložena symetricky kolem \bar{x} , pak je výběrový koeficient šikmosti $a_3 = 0$. Při $a_3 < 0$ mluvíme o záporném zešikmení, přičemž je vyšší hustota větších hodnot a rozdělení četností je zešikmeno doprava. Analogicky pro $a_3 > 0$ je rozdělení četností zešikmeno doleva. Výběrový koeficient špičatosti a_4 popisuje, jakým způsobem se koncentrují data kolem \bar{x} . Je-li $a_4 > 3$, má rozdělení četností souboru špičatější tvar než by mělo kdyby data pocházela z normálního rozdělení. Analogicky je-li $a_4 < 3$, projeví se rozdělení četnosti více plochým tvarem. Pro normální rozdělení pravděpodobnosti platí $a_3 = 0$ a $a_4 = 3$. Některé definice hodnotu 3 přímo odečítají, aby normální rozdělení mělo

koeficient špičatosti nulový. Zde však byla zvolena varianta, která je v souladu s implementací v softwaru Matlab, kde bude probíhat většina výpočtů a to $a_4 = 3$ pro výběr z normálního rozdělení pravděpodobnosti.

Podobně jako u výběrového rozptylu je vhodné, zvláště pro menší výběry, používat nestranné (nevychýlené) odhady

$$A_3 = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} a_3, \quad A_4 = \frac{n-1}{(n-2)(n-3)} ((n+1)a_4 - 3(n-1)) + 3.$$

Histogramy náhodných výběrů na obrázku 4.6 názorně ukazují vlastnosti koeficientů šikmosti a špičatosti. Náhodné výběry mohou mít stejné charakteristiky polohy a variability, tj. výběrový průměr a výběrovou směrodatnou odchylku. Přesto je podle histogramů zřejmé, že se jedná o výběry z různých rozdělení. Číselně popsat rozdíly umožňují až výběrové koeficienty šikmosti A_3 a špičatosti A_4 .



Obrázek 4.6: Ukázka vlastností výběrového průměru, směrodatné odchylky, a výběrových koeficientů šikmosti a špičatosti spolu s histogramy náhodných výběrů pocházejících z různých rozdělení.

První histogram reprezentuje výběr z normálního rozdělení. Následují více ploché a více špičaté rozdělení, která se liší koeficientem A_4 avšak zbylé hodnoty statistiky mají stejné. Vychýlenost vlevo či vpravo popisuje znaménko koeficientu A_3 a míru vychýlení jeho velikost. Ačkoliv jsou tyto koeficienty popisné statistiky velmi užitečné, poslední graf obrázku 4.6 poukazuje na nutnost opatrnosti při hodnocení tvaru rozdělení pouze na jejich základě. Snadno může dojít k mylnému úsudku o tvaru například při směsi výběru ze dvou rozdělení.

Pokud je zjištěna výrazná šikmost výběru, může výběr pocházet z některého nesymetrického rozdělení pravděpodobnosti. Jedním z nich je logaritmicko-normální nebo zkráceně jen log-normální rozdělení. Logaritmicko-normální rozdělení s parametry μ a σ , označované $LN(\mu, \sigma)$ je spojitě rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny X takové, že

4.2. MATEMATICKÉ METODY

náhodná veličina $\ln(X)$ má normální rozdělení se střední hodnotou μ a směrodatnou odchylkou σ . Rozšířením je pak tříparametrické logaritmicko-normální rozdělení obsahující navíc parametr posunu λ a platí, že náhodná veličina $\ln(X - \lambda)$ má normální rozdělení se střední hodnotou μ a směrodatnou odchylkou σ [39].

4.2.1. Ověření normality

Většinou není k dispozici informace, zda data pocházejí z normálního rozdělení. Tato hypotéza musí být ověřena. Z grafických metod lze použít histogram, což je sloupcový graf, kde jsou četnosti výskytu hodnot rozřazeny do tříd. Dále pak q-q graf porovnávající kvantily teoretického rozdělení s empirickými kvantily nebo p-p graf založený na srovnání teoretické a empirické distribuční funkce. Shoda rozdělení v obou případech nastane v případě, kdy body budou ležet na přímce. Grafické metody jsou vhodné pouze k přibližnému hodnocení normality. Pro přesné hodnocení je nutno přistoupit k testům dobré shody. Ačkoliv testy dobré shody obecně porovnávají dvě rozdělení pravděpodobnosti, zde se omezím pouze na testování normality a ověření hypotézy, zda se pozorovaná distribuční funkce rovná distribuční funkci normálního rozdělení $H_0 : F_e(x) = F(x)$ proti alternativní hypotéze $H_A : F_e(x) \neq F(x)$. Prakticky se tak činí porovnáním testovacího kritéria s kritickou hodnotou. Testovací kritérium je náhodná veličina závislá na náhodném výběru, též nazývaná statistika, mající vztah k nulové hypotéze.

Klasickým testem je **Kolmogorovův-Smirnovův test**, který porovnává testovanou empirickou distribuční F_e s teoretickou distribuční funkcí F . V tomto případě s distribuční funkcí normálního rozdělení. Testovací statistika

$$D_n = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_e(x) - F(x)|$$

se pak porovnává s tabelovanou kritickou hodnotou $D_n(\alpha)$. Pokud je rozdíl distribučních funkcí dostatečně velký, tj. $D_n \geq D_n(\alpha)$, zamítáme hypotézu H_0 na hladině významnosti α , tj. testovaný výběr s nepochází z normálního rozdělení. Tabelované kritické hodnoty lze pro dostatečně velké výběry [40] aproximovat

$$D_n(\alpha) \approx \sqrt{\frac{1}{2n} \ln \frac{2}{\alpha}}.$$

Vylepšenou variantou Kolmogorovova-Smirnovova testu je **Andersonův-Darlingův test**, který opět měří vzdálenost mezi empirickou a teoretickou distribuční funkcí. Statistikou je kvadrát vzdálenosti, který má větší váhy na chvostech rozdělení

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1)(\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n+1-i}))),$$

kde F je distribuční funkce normálního rozdělení a x_i jsou vzestupně seřazené hodnoty výběru. Nulovou hypotézu H_0 zamítáme pokud je splněno testovací kritérium $A^2 \geq D(\alpha)$, kde $D(\alpha)$ je tabelovaná kritická hodnota.

Ryanův-Joinerův test vyhodnocuje normalitu na základě korelace mezi hodnotami výběru a kvantily normálního rozdělení. Korelační koeficient je vypočítán jako

$$R_p = \frac{\sum_{i=1}^n x_i u_i}{\sqrt{s^2(n-1) \sum_{i=1}^n u_i^2}},$$

kde x_i jsou seřazená pozorovaná data, u_i kvantily normovaného normálního rozdělení a s^2 je výběrový rozptyl. Čím je korelační koeficient blíží jedné, tím věrněji odpovídá náhodný výběr normálnímu rozdělení.

Test Ryan-Joiner je velmi podobný testu Shapiro-Francia [41], který je jednodušší alternativou testu Shapiro-Wilk [42]. Zmiňované testy se tudíž mohou zaměnit v případě, že v používaném softwarovém nástroji implementován pouze některý z nich.

Jarqueův-Beryho test se provádí na základě výběrové šikmosti a špičatosti. Testová statistika je definována jako

$$JB = \frac{n}{6} \left(a_3^2 + \frac{(a_4 - 3)^2}{4} \right)$$

kde S označuje výběrovou šikmost, K výběrovou špičatost a n počet hodnot ve výběru [43]. Hypotézu H_0 zamítáme pokud je testovací kritérium větší než kritická hodnota Pearsonova rozdělení $JB \geq \chi_{\nu=2}^2(\alpha)$.

Často se k rozhodnutí o zamítnutí, či nezamítnutí dané hypotézy používá p-hodnota. Je to nejmenší hladina významnosti na které ještě zamítáme nulovou hypotézu H_0 . V praxi to znamená, že nulovou hypotézu zamítáme pokud je p-hodnota menší než zvolená hladina významnosti.

Anderssonův-Darlingův a Kolmogorovův-Smirnovův test jsou založeny na porovnávání empirické a teoretické distribuční funkce, zatímco Ryanův-Joinerův test je založen na korelaci. Všechny tři testy si dobře poradí se sešikmenými daty, na druhou stranu jsou méně citlivé na špičatost. Řešením je Jarqueův-Beryho test, který normalitu náhodného výběru hodnotí pouze na základě šikmosti a špičatosti. Anderssonův-Darlingův a Ryanův-Joinerův test patří k nejsilnějším testům [44, 45]. S tím ale souvisí i vyšší pravděpodobnost, že zamítnou normalitu i když testovaný výběr z normálního rozdělení pochází. Každý uvedený test normality přistupuje k hodnocení jiným způsobem, má své výhody a nevýhody a pokud je možnost, stojí za zvážení provést na náhodném výběru testů více.

Výsledek testů normality může být zkreslen přítomností odlehlých hodnot. V případě podezření je možné jejich výskyt testovat. Jednoduchou metodou je spočítat výběrový průměr a směrodatnou odchylku bez testované hodnoty. Pokud testovaná hodnota leží dále než $\bar{x} \pm 3s$, je podezření, že je odlehlá. Přesnější možností je pak provést některý z testů odlehlých hodnot, například Grubbsův test nebo Dean-Dixonův test.

4.2.2. Transformace dat

V případě, že data nemají normální rozdělení, je vhodné je transformovat a získat tak data s normálním nebo alespoň přibližně normálním rozdělením. Transformace funguje na principu předpokladu, že analyzovaná data jsou nelineární transformací normálně

4.2. MATEMATICKÉ METODY

rozdělené náhodné veličiny a hledáme její inverzní transformaci. Hojně používanou je Box-Coxova mocninná transformace tvaru

$$y_i = \begin{cases} \frac{x_i^\lambda - 1}{\lambda} & , \lambda \neq 0 \\ \ln x_i & , \lambda = 0, \end{cases}$$

kde x_i je původní a y_i transformovaná datová řada. Optimalizační úlohou je pak nalezení vhodného parametru λ . Optimální hodnota parametru λ zajistí nejlepší aproximaci normálního rozdělení tím, že minimalizuje směrodatnou odchylku určité statistiky [46]. Tuto úlohu však běžně řeší statistický software který vypočte optimální hodnotu λ nebo její interval. V případě intervalu máme možnost volby a zvykem je volit "rozumná" čísla. Dalším nutným krokem je ověření normality transformovaných dat, jelikož tato není z principu zaručena. Box-Coxova transformace je platná pouze pro $x_i > 0$, nicméně přičtením kladné konstanty k x_i ji lze rozšířit i pro záporné hodnoty.

Pokud se nedaří data transformovat pomocí Box-Coxovy metody, je možné vyzkoušet Johnsonovu transformaci [47]. Johnsonova transformace pokrývá široké třídy funkcí a je definována jako

$$y_i = \begin{cases} \gamma + \eta \ln \left(\frac{x_i - \varepsilon}{\lambda + \varepsilon - x_i} \right) & \text{pro ohraničené funkce,} \\ \gamma + \eta \ln \left(\frac{x_i - \varepsilon}{\lambda} \right) & \text{pro logaritmicko-normální funkce,} \\ \gamma + \eta \operatorname{argsinh} \left(\frac{x_i - \varepsilon}{\lambda} \right) & \text{pro neohraničené funkce,} \end{cases}$$

kde x_i je původní hodnota, y_i transformovaná hodnota, γ, η jsou tvarové parametry, ε parametr polohy a λ parametr měřítka. V praxi stačí zvolit odpovídající třídu funkcí a o zbytek se opět postará statistický software, který vybere transformaci s nejvyšší p-hodnotou vybraného testu normality.

Pokud data stále odolávají pokusům o transformaci, je nutné zvážit, zda se nejedná o směs více rozdělení. Pokud lze data na základě známého faktoru separovat, jedná se zpravidla o vhodnější přístup. Obecně je lepší nejprve hledat příčiny nenormality dat a příčinu odstranit, protože při transformaci dojde k zamlžení fyzikálního významu dat a pro interpretaci výsledků v původních veličinách musí být na datech provedena zpětná transformace.

4.2.3. Frekvenční analýza

Přímou diskrétní Fourierovu transformaci časové řady x_j , kde $j = 1, \dots, n$ lze zapsat jako

$$y_k = \sum_{j=1}^n x_j e^{-2\pi i(j-1)(k-1)/n}.$$

V jazyce programového prostředí MATLAB je diskrétní Fourierova transformace implementována pomocí efektivního algoritmu rychlé Fourierovy transformace (FFT).

Pojmem krátkodobá Fourierova transformace (STFT) označuje Fourierovu transformaci aplikovanou po krátkých časových úsecích - oknech. Tímto způsobem lze sledovat

průběh frekvence v čase u nestacionární časové řady (signálu). Tato transformace tedy provádí časově-frekvenční analýzu a lze ji zapsat

$$X_m(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n w(n - mR) e^{-2\pi i f n},$$

kde $w(n)$ je funkce popisující okno, R posun okna a $X_m(f)$ je diskrétní Fourierova transformace m -tého okna se středem v čase mR . Výsledná matice je tvaru

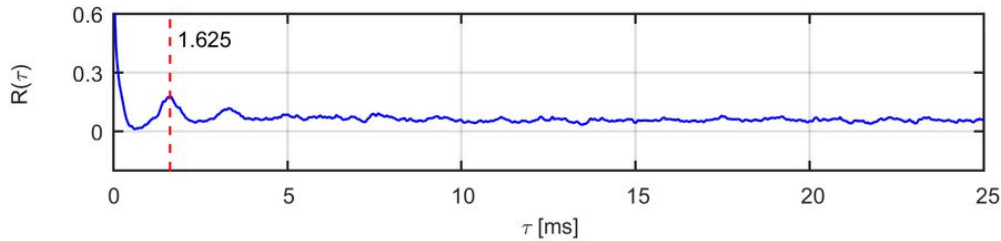
$$\mathbf{X}(f) = [X_1(f) \quad X_2(f) \quad X_3(f) \quad \cdots \quad X_k(f)], \quad k = \frac{N - L}{M - L},$$

kde N je délka původní řady a $L = M - R$ je překrytí oken. Výsledek krátkodobé Fourierovy transformace se vizuálně zobrazuje ve formě spektrogramu, což je graf na jehož x -ové ose je vynesena čas, na y -ové ose frekvence a barevná osa z reprezentuje amplitudu na dané frekvenci pomocí výkonové spektrální hustoty, kterou lze vyjádřit jako $|X_m(f)|^2$.

Další metodou hledání opakujících se vzorů a nalezení jejich frekvence v průběhu intenzity je pomocí korelace. Autokorelační funkce (ACF) hledá opakující se sekvenci tím, že měří korelaci mezi jednorozměrnou časovou řadou x_t a $x_{t+\tau}$, kde $\tau = 0, \dots, K$ je zpoždění čili posunutí řady

$$R_\tau = \frac{\sum_{t=1}^{T-\tau} (x_t - \bar{x})(x_{t+\tau} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})^2}.$$

Jedná se vlastně o autokovarianční funkci normalizovanou rozptylem a může nabývat hodnot pouze v intervalu $\langle -1, 1 \rangle$. Z nalezených časových zpoždění s největším korelačním koeficientem lze dopočítat frekvenci. Převrácenou hodnotou polohy prvního maxima autokorelační funkce se získá frekvence, viz obrázek 4.7. Frekvenci lze počítat i na základě následných maxim, resp. minim, ale první maximum bývá nejsilnější.



Obrázek 4.7: Ukázka autokorelační funkce s vyznačeným časovým zpožděním, které odpovídá frekvenci, jež je v analyzované časové řadě přítomna.

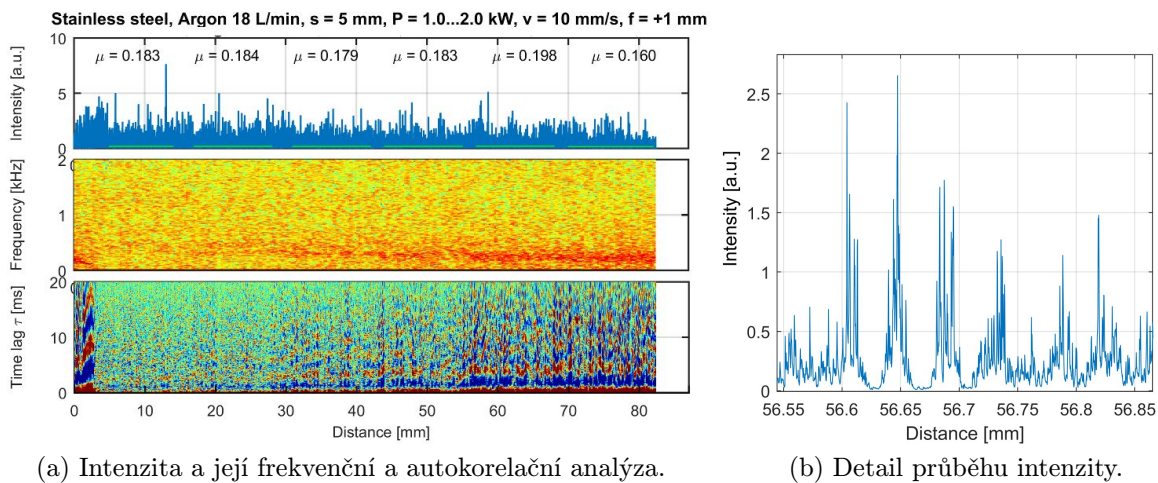
Analogickou aplikací plovoucího okna na časovou řadu, jako v případě krátkodobé Fourierovy transformace, získáme graf závislosti zpoždění na čase s osou z udávající míru korelace, který se nazývá autokorelogram.

5. Výsledky měření fotodiodovými senzory

V první fázi byl svařovací proces pozorován fotodiodovými senzory. Základní konfigurace byla s boční fotodiodou, viz obrázek 4.4 v kapitole experimentální sestava, která byla rozšířena o další boční fotodiodu a koaxiální fotodiodu. Ačkoliv monitorovací systémy na podobných principech existují, zde je kromě klasického vyhodnocování na základě intenzity zvolen i netradiční přístup zaměřující se na frekvenční oblast. V této kapitole budou prezentovány nejzajímavější výsledky s využitím fotodiodových senzorů.

5.1. Boční fotodioda

Během svařování bylo záření emitované procesem snímáno širokospektrální fotodiodou připevněnou ke svařovací hlavě. Na uhlíkové a korozivzdorné oceli byl v rámci jednoho svaru skokově navyšován výkon z 1 kW na 2 kW po 200 W přírůstcích. Celý proces byl zopakován pro tři hodnoty rychlosti a to 10, 20 a 30 mm·s⁻¹. Byl zkoumán vliv procesních parametrů na frekvence detekované ve změně intenzity. Typické vyhodnocení jednoho svaru je na obrázku 5.1a, kde je zachycen průběh intenzity spolu s průměrnými hodnotami pro jednotlivé výkonové skoky. S rostoucím výkonem laseru je menší množství detekovaného záření, což se projeví menší průměrnou hodnotou v rámci jednotlivých úseků. Obrázek 5.1b zobrazuje detail průběhu intenzity, kde jsou vidět oddělené píky. Jednotlivé píky se zdají být místy pravidelné, jinde se pravidelnost vytrácí, proto byla provedena frekvenční analýza intenzity. Spektrogram ukazuje zřetelnou pravidelnost na začátku svaru a méně jasné frekvence kolem 500 Hz v průběhu svaru. Volbou různě velkých časových oken lze dávat přednost časovému nebo frekvenčnímu rozlišení spektrogramu. Ačkoliv pozorované frekvence odpovídají teoreticky předpovězeným a pozorovaným i jinými autory, byla frekvenční oblast prohledána až do Nyquistovy hranice, která je pro tuto sestavu 20 kHz. Nad hranicí 1 kHz však nebyly při tomto ani jiném experimentu pozorovány píky takové frekvence. Proto lze považovat nastavený rozsah grafu 2 kHz za dostatečný.



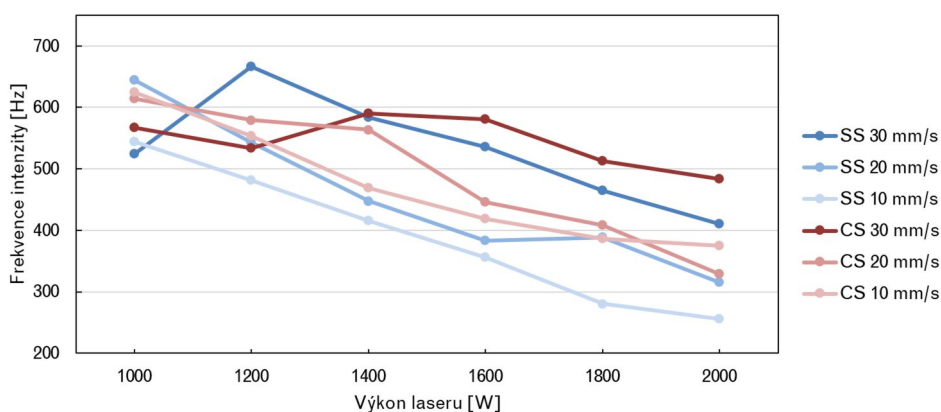
(a) Intenzita a její frekvenční a autokorelační analýza.

(b) Detail průběhu intenzity.

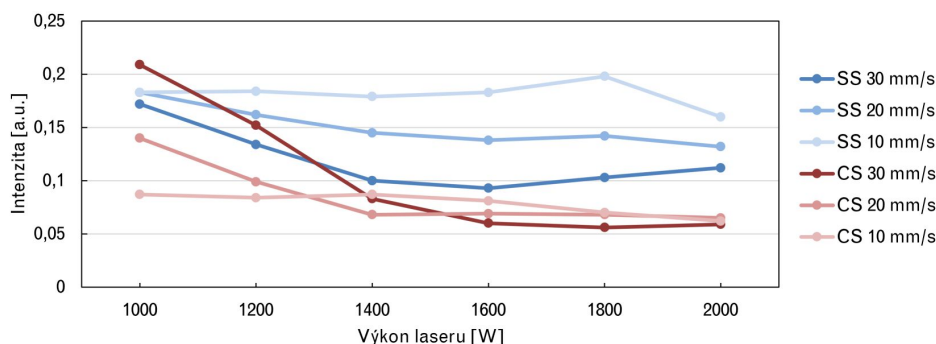
Obrázek 5.1: Vyhodnocení záznamu intenzity z boční fotodiody.

5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ FOTODIODOVÝMI SENZORY

Zjištěné frekvence nejsou vždy zřetelně viditelné a někdy chybí úplně. Předpokládá se, že mají původ v teoreticky předpovězeném periodickém pohybu keyhole, který se promítá i do periodických či spíše kvaziperiodických výtrysků plazmatu. Při reálném procesu však může dojít i k výtryskům mimo teoretický model zapříčiněných vnějšími vlivy a nehomogenitami, které způsobí nepravidelnost. Navíc dosud není prokázána souvislost konkrétních změn frekvence se svarovými vadami. V tomto případě se s rostoucím laserovým výkonem snižovala detekovaná frekvence. Pokles frekvence může souviset s rostoucími rozměry svaru a to jak šířky, tak hloubky. Na grafu 5.2a je vynesena frekvence změn intenzity na výkonu laseru pro použité rychlosti. Průměrná frekvence z daného výkonového úseku s rostoucím výkonem klesá. Stejně tak frekvence klesá s klesající rychlostí. Vztah ale neplatí ve všech případech. Souhrnně lze trend popsat tak, že nepřímo měřená frekvence oscilací taveniny klesá s rostoucím vnášeným teplem. S rostoucím vnášeným teplem roste i objem taveniny, která hraje v tomto chování pravděpodobně zásadní vliv. Důležité je zmínit, že pomocí samotné průměrné intenzity snímané boční širokospektrální fotodiodou nejsou systematické změny v závislosti na výkonu laseru viditelné. Na začátku grafu průměrných intenzit 5.2b je sice pro nižší výkony a vyšší rychlosti náznak klesajícího trendu, který ale lze vysvětlit odezníváním přechodného režimu svařování a nástupem plného penetračního režimu. Pro vyšší výkony pak na grafu 5.2b nelze hovořit o trendu v závislosti na výkonu. Lze pouze pozorovat, že záření emitované při procesu svařování korozivzdorné oceli má systematicky vyšší intenzitu než záření při svařování uhlíkové oceli.



(a) Závíslost frekvence změn intenzity na výkonu a rychlosti.

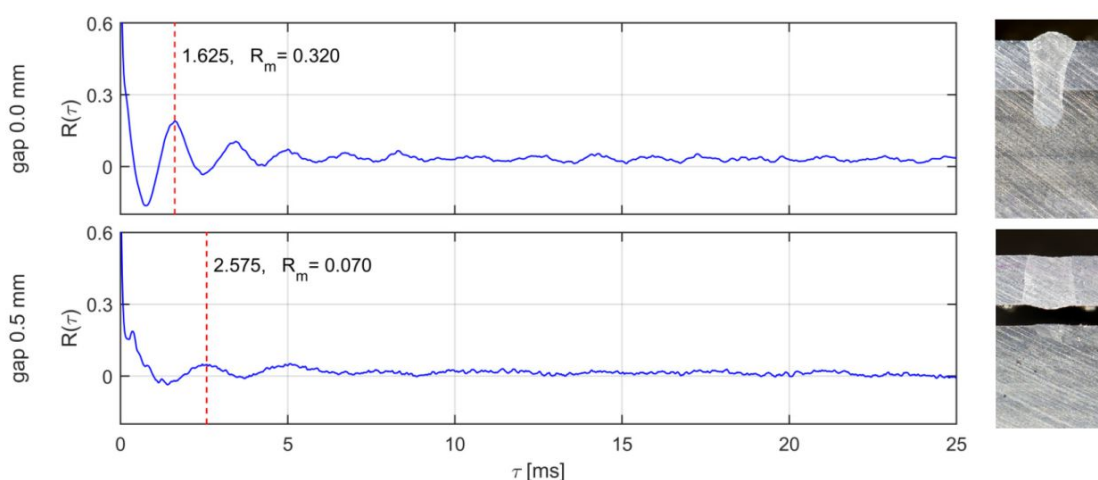


(b) Závíslost intenzity na výkonu a rychlosti.

Obrázek 5.2: Závíslosti z boční fotodiody.

5.1. BOČNÍ FOTODIODA

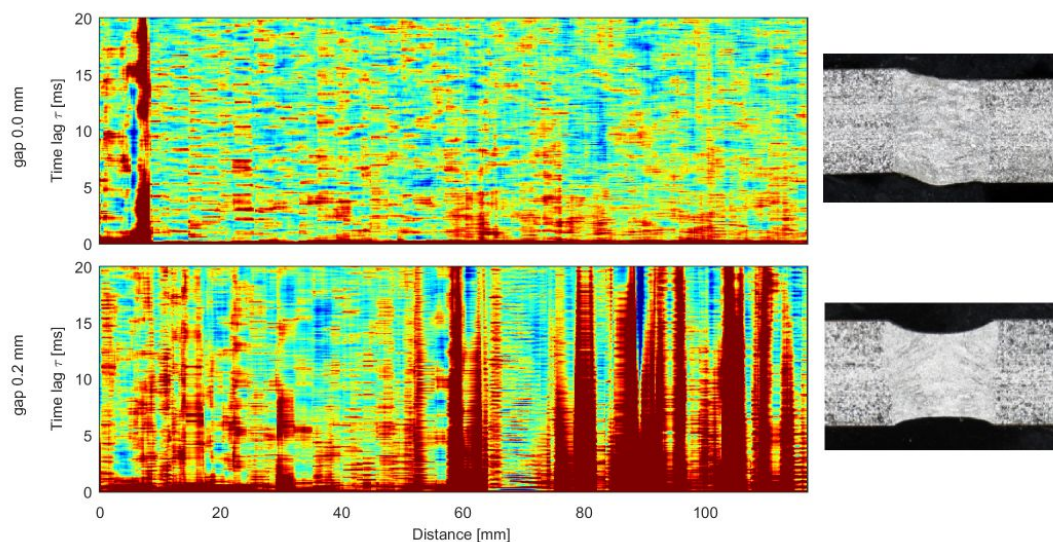
V článku na kterém jsem spolupracoval [48] již byly dosaženy a publikovány výsledky sledování procesu svařování pomocí boční fotodiody s následnou frekvenční analýzou. Konkrétně se jednalo o detekci geometrických nepřesností při svařování plechů. Přítomnost příliš velké mezery mezi svařovanými díly může vést k výskytu svarových vad. Byly provedeny svary s mezerami 0 - 0,5 mm zvětšující se po 0,1 mm a to jak u tupého tak přeplátovaného spoje. Se zvětšující se mezerou mezi plechy svařovanými natupo i přeplátovaně byla zjištěna klesající frekvence výskytu plazmových výtrysků. Zároveň byla zaznamenána menší míra korelace. Situaci ukazuje obrázek 5.3, kde je zobrazena autokorelační funkce z celého stabilního svaru, tj. bez počátku a konce svaru. Frekvence, resp. perioda, během svařování kolísala, avšak časový průběh neodpovídal přesně povrchu ani kořeni svaru. Takové chování může mít na svědomí skutečnost, že ne veškerá historie taveniny se promítne do výsledného ztuhlého svaru. Svarová lázeň zůstává ještě chvíli po projetí laserového svazku v kapalném stavu a vlivem povrchového napětí a vnitřního proudění se může změnit oproti dříve pozorovanému stavu.



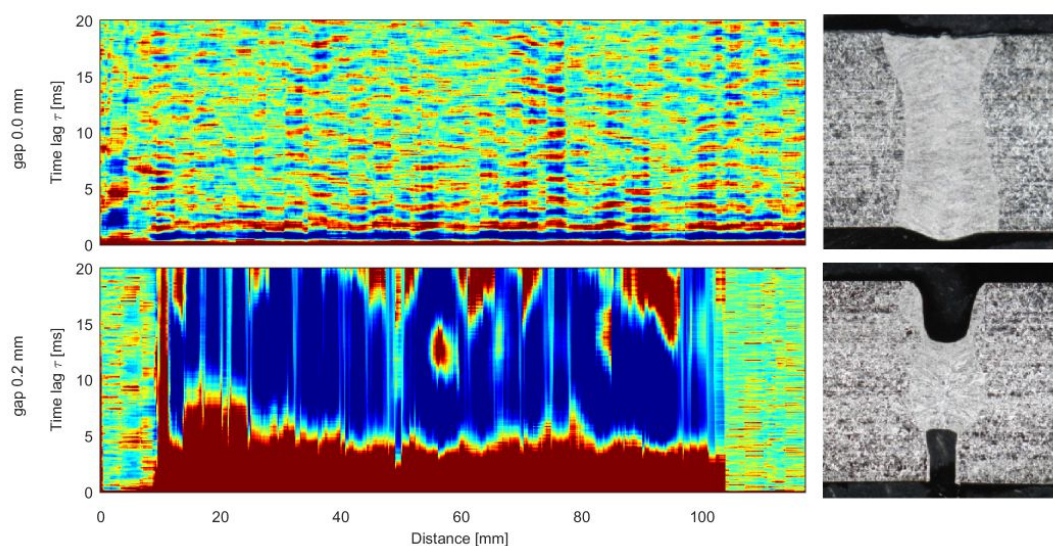
Obrázek 5.3: Detekce vady neprůvaru typu false friend pomocí autokorelační funkce, publikováno v [48].

Při experimentu svařování plechů tloušťky 1 mm z korozi-vzdorné oceli, obr. 5.4a, je zřejmý rozdíl mezi svarem natupo bez mezery a s mezerou 0,2 mm. Časová osa popisující vývoj autokorelační funkce je přepočítána pomocí známé rychlosti na vzdálenost od počátku svaru z důvodu lepší použitelnosti v praxi. Při svařování tenkých plechů se pravidelnosti ve změně intenzity občas nevyskytují. V případě 0 mm mezery není jejich perioda příliš zřetelná a její perioda je 0,95 ms (1053 Hz). Při mezeře 0,2 mm jsou patrné lokální úseky s kratší periodou a úseky s vyšší mírou korelace, avšak zaznamenaná intenzita má příliš nestabilní průběh na důvěryhodnější závěry. Provedený metalografický výbrus ukázal, že vlivem povrchového napětí roztaveného kovu dochází k propadení kořene i hlavy svaru.

Během svařování plechů dvojnásobné tloušťky, obr. 5.4b, je při nulové tloušťce patrná perioda 1,7 ms (588 Hz). Na metalografickém výbrusu je vidět, že při mezeře 0,2 mm již nedochází k dostatečnému spojení obou plechů a perioda intenzity detekované boční fotodiody je nižší. Perioda je přibližně 25,7 ms (39 Hz) a opět značně kolísá v průběhu svaru.



(a) Tloušťka plechu 1 mm.



(b) Tloušťka plechu 2 mm.

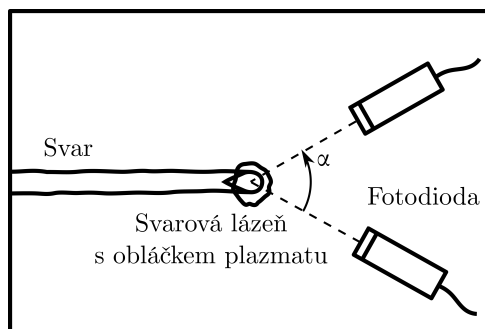
Obrázek 5.4: Vývoj autokorelační funkce spolu s příčným metalografickým výbrusem při svařování korozivzdorné oceli dvou tlouštěk natupo s mezerami mezi plechy 0 a 0,2 mm.

5.2. Horizontální úhel mezi dvěma fotodiodami

Boční fotodiodu je možno umístit vzhledem ke směru svařování mnoha způsoby. Vystává tedy otázka zda některý směr preferovat. Při svařování reálných součástí velmi často nelze zaručit stejnou orientaci fotodiody vůči aktuálnímu vektoru rychlosti. Ideální detekční metoda by tedy měla být invariantní vůči směru svařování.

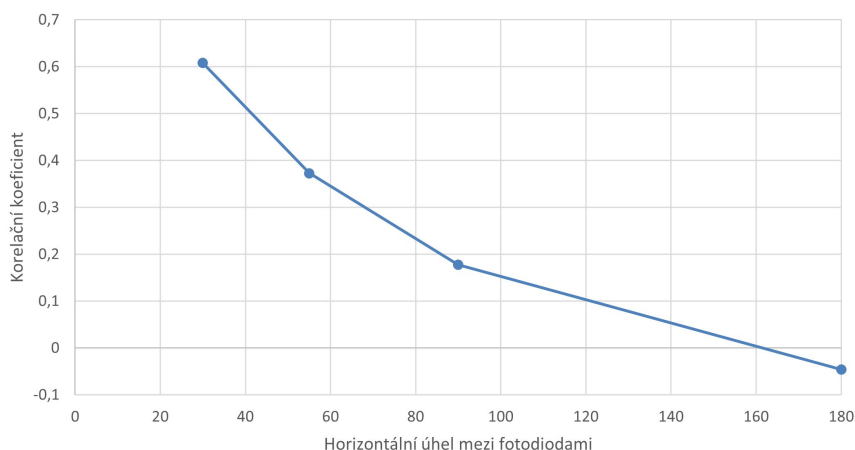
Cílem dalšího měření bylo zmapovat vliv umístění fotodiody. Průběh každého svaru je ale unikátní a z tohoto důvodu nebyly různé polohy fotodiod měřeny postupně, ale svařované místo bylo snímáno současně dvěma fotodiodami symetricky podle osy svaru, viz obrázek 5.5. Fotodiody byly umístěny ve stejné vzdálenosti od svařovaného místa a variována byla velikost vzájemně svíraného úhlu v rozsahu 30 - 180°.

5.3. VERTIKÁLNÍ ÚHEL MEZI DVĚMA FOTODIODAMI



Obrázek 5.5: Schéma sestavy dvou fotodiód s proměnným horizontálním úhlem.

Průměrné hodnoty intenzity spočítané z celé délky svaru jsou podobné, z tohoto hlediska na poloze fotodiody pravděpodobně nezáleží. Drobné nesystematické odchylky jsou způsobeny nejspíše nepřesností polohování fotodiód vzhledem k malému zornému úhlu. Tento možný nedostatek s polohování sestavy vůči svařovacímu procesu byl podrobněji rozebírán v podkapitole 4.1.2. Časové průběhy měřených intenzit mají sice globálně (na nízkých frekvencích) podobný průběh, ale lokálně (na vysokých frekvencích) se odlišují. Proto byla následně porovnána podobnost obou průběhů intenzit pomocí Pearsonova korelačního koeficientu. Z grafu 5.6 je vidět, že s rostoucím úhlem mezi fotodiódami klesá korelace mezi jejich intenzitami. Pro úhel 180° vychází korelační koeficient blízky nule, tedy obě časové řady již spolu nekorelují. Jiné hodnoty intenzit pozorované z různých úhlů mohou být způsobeny pohybem svarové lázně. Vlna na hladině roztaveného kovu svarové lázně může zastínit keyhole jako nejintenzivnější zdroj záření nebo takové vlny mohou odrážet záření do různých směrů.



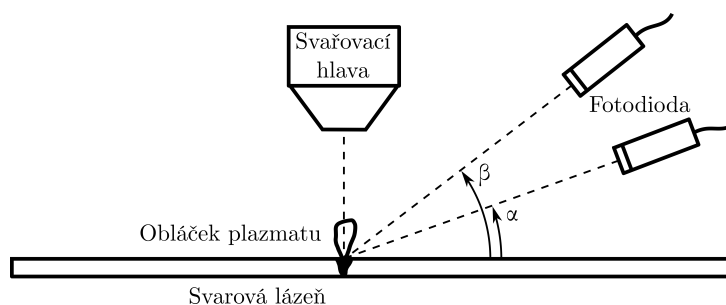
Obrázek 5.6: Korelace mezi fotodiódami v závislosti na horizontálním úhlu mezi nimi.

5.3. Vertikální úhel mezi dvěma fotodiódami

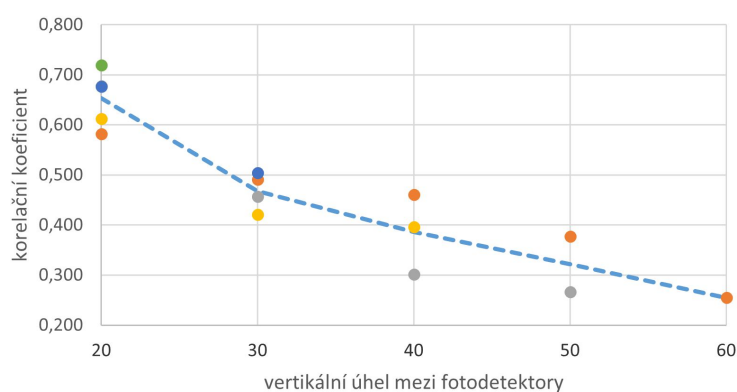
Podobné měření bylo provedeno i pro relativní polohu dvou fotodiód ve vertikálním směru, viz schéma 5.7. Fotodiody byly umístěny nad sebou a mohly s povrchem svařovaného dílu svírat úhel $0, 10, \dots, 60^\circ$. Byly vyzkoušeny všechny fyzicky možné kombinace umístění dvou fotodiód dané rozměrovými omezeními a závislost rozdílu jejich úhlových

5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ FOTODIODOVÝMI SENZORY

poloh na korelačním koeficientu zanesena do grafu 5.8. Opět je zřejmé, že čím více jsou od sebe fotodiody úhlově vzdáleny, tím méně spolu záznamy korelují a tedy tím odlišnější je časový průběh zaznamenávaných intenzit.



Obrázek 5.7: Schéma sestavy s variací vertikálního úhlu.



Obrázek 5.8: Korelace mezi fotodiodami v závislosti na vertikálním úhlu mezi nimi.

Na rozdíl od případu horizontální změny polohy fotodiody, se při vertikální změně polohy fotodiody mění i měřená intenzita. Průměrné hodnoty intenzit se zvětšují s rostoucím vertikálním úhlem. Pro daný úhlový rozsah však nelze z naměřených dat rozhodnout, zda široce spektrální optická emise věrně kopíruje Lambertův kosinový zákon, nebo má svařovací proces pro velké úhly od povrchu svařovaného vzorku, resp. malé úhly měřené od normály povrchu, vlivem existence keyhole odlišnou vyzařovací charakteristiku.

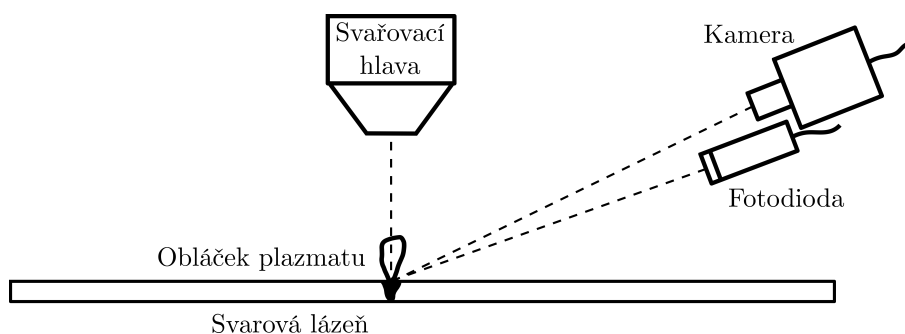
Bylo provedeno také ověření správné funkčnosti měřicí sestavy, kdy svařovací proces byl nahrazen blikající super svítivou diodou. V tomto případě byl naměřen shodný korelační koeficient nezávisle na úhlu mezi diodami. Změny korelačního koeficientu tedy musí mít původ ve svařovacím procesu a ne v sestavení monitorovací aparatury.

5.4. Porovnání fotodiody s kamerou

Pro přesnější určení z jaké oblasti svařovacího procesu snímá fotodiody záření, byl proces snímán současně boční fotodiodou a vysokorychlostní kamerou X-Stream XS-3. Situaci ilustruje obrázek 5.9. Úhlová vzdálenost mezi kamerou a fotodiodou byla nejmenší možná a to přibližně 10° . Kamera byla provozována se snímkovací frekvencí 10 kHz při sníženém rozlišení a žádné optické filtry nebyly přítomny. Kamera tudíž zaznamenávala široké spektrum vlnových délek, stejně tak jako fotodiody. Navíc byla zaznamenávána také

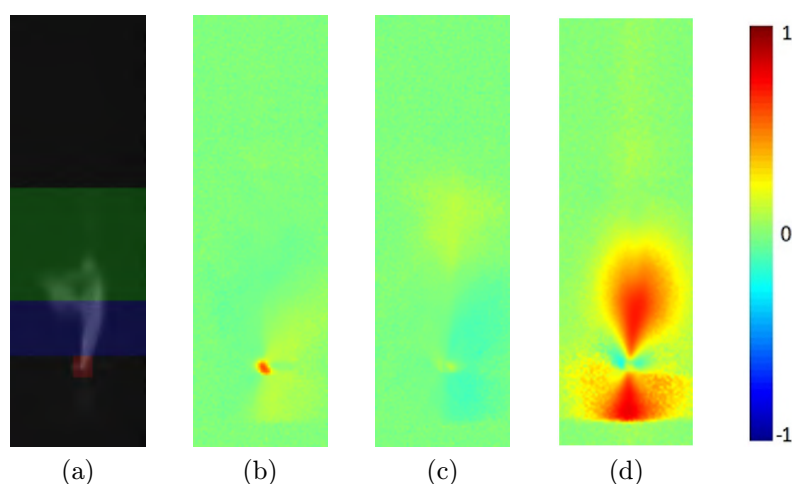
5.4. POROVNÁNÍ FOTODIODY S KAMEROU

intenzita zpětně odraženého laserového záření fotodiódou vestavěnou v laseru, která sleduje vracející se záření na vlnové délce 1070 nm ve směru koaxiálně s laserovým svazkem. Data z obou diod byla zaznamenávána s frekvencí 40 kHz a následně podvzorkována na snímkovací rychlost kamery. Svařována byla korozivzdorná ocel tloušťky 5 mm svařovací rychlostí $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ s ohniskem laserového svazku na povrchu materiálu. Měnil se výkon laseru s hodnotami 1000, 1500 a 2000 W. Ve všech případech se jedná o penetrační režim svařování. Kombinace dostatečné tloušťky a procesních parametrů zajistila, že plech nebyl provařen skrz a neměnily se tak podmínky v důsledku otevření keyhole v kořeni svaru.



Obrázek 5.9: Sestava pro měření korelace mezi fotodiódou a kamerou.

Snímky z kamery byly rozděleny na oblasti zájmu zahrnující oblast svarové lázně (červená), spodní (modrá) a horní (zelená) část obláčku plazmatu a celý snímek, viz obr. 5.10a. Z jednotlivých oblastí pak byla počítána integrální intenzita a takto vzniklé jedno-rozměrné časové řady porovnávány s hodnotami z boční fotodiody a detektoru v laseru. Integrální intenzitou je myšlen součet hodnot pixelů kamery, čímž se čip kamery či jeho část zredukuje na pouhou fotodiodu. Pro porovnání časových řad byl použit Spearmanův korelační koeficient, který je na rozdíl od Pearsonova korelačního koeficientu obecnější a místo míry lineární závislosti hodnotí míru monotónní závislosti [49].



Obrázek 5.10: (a) Snímek kamery s vyznačenými oblastmi zájmu, (b) korelační mapa kamery a boční fotodiody, (c) korelační mapa kamery a koaxiální diody na 1070 nm, (d) korelační mapa jednotlivých pixelů s celým čipem kamery.

5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ FOTODIODOVÝMI SENZORY

Přehledně korelaci jednotlivých oblastí popisuje tabulka 5.1. V tabulce je vidět, že průběh intenzity z boční fotodiody nekoreluje s průběhem integrální intenzity kamery. Po rozdělení obrazu na tři oblasti zájmu tabulka zřetelně ukazuje, že s boční fotodiadou nejsilněji koreluje oblast keyhole potažmo svarovou lázní. Korelace je tím silnější čím je vyšší výkon laseru. Avšak ani horní ani spodní část obláčku s boční fotodiadou nekoreluje.

Laser power	Korelační koeficient							
	Fotodioda - kamera	Fotodioda - odražený laser	Fotodioda - kamera (keyhole)	Fotodioda - kamera (obláček horní)	Fotodioda - kamera (obláček spodní)	Odražený laser - kamera (keyhole)	Odražený laser - kamera (obláček horní)	Odražený laser - kamera (obláček spodní)
1000 W	0,054	-0,030	0,379	0,069	-0,021	0,042	-0,162	-0,074
1500 W	0,068	-0,031	0,562	0,074	-0,036	0,055	-0,153	-0,074
2000 W	0,119	-0,073	0,700	0,037	0,005	-0,058	-0,136	-0,083

Tabulka 5.1: Korelace mezi jednotlivými oblastmi zájmu z kamery, boční fotodiadou a zpětně odraženým zářením detekovaným v laseru.

Tabulka sice souhrnně popisuje korelaci předem definovaných oblastí, je však možné zvolit oblasti lépe? Limitním případem je pokud se za oblast zájmu, která je porovnávána s fotodiadou, zvolí jediný pixel. Výhodou výpočtu korelace po pixelech je jeho obecnost oproti předešlým pevně definovaným oblastem na základě očekávaného pozorovaného objektu (oblast svarové lázně a obláček plazmatu). Výsledkem je korelační mapa, kde zelený odstín značí nulovou korelaci a červený odstín kladnou korelaci. V podrobnější grafické podobě to je vidět na 5.10b, kde je počítána korelace boční fotodiody s každým pixelem kamery zvlášť. Výsledek potvrzuje předešlé závěry, že boční fotodioda sleduje převážně oblast svarové lázně. Pouze v náznaku je vidět obláček plazmatu ochranné atmosféry a jeho odraz od svařovaného plechu. Bylo spočteno množství korelačních map při této konfiguraci a lze konstatovat, že pro větší výkony laseru je obláček více viditelný, stejně tak jeho odraz od svařovaného materiálu.

Analogickým způsobem byla spočítána také korelační mapa mezi kamerou a bezpečnostní fotodiadou zpětně odraženého záření v laseru, obrázek 5.10c. Tato fotodioda snímá proces koaxiálně na vlnové délce laseru. Tedy z jiného úhlu a na jiné vlnové délce než kamera. V souladu s předešlými výsledky z porovnání korelací mezi fotodetektory s různými horizontálními a vertikálními úhly spolu tyto dva záznamy, které svírají úhel 70°, významně nekorelují a to v žádném bodě kamery. Výsledky jsou také ve shodě s tabulkou 5.1. Velmi slabě s kamerou koreluje pouze horní oblast obláčku, což může být způsobeno rozptylem odraženého laserového záření.

Lze však provést úvahu, že celý čip kamery je také jeden fotodetektor, který má shodné vlastnosti s individuálními pixely. Při výpočtu korelační mapy tohoto virtuálního fotodetektoru s jeho jednotlivými pixely dostáváme obrázek 5.10d. Je zřejmé, že v tomto případě jsou hodnoty jasu virtuálního fotodetektoru tvořeného celým čipem kamery nejvíce ovlivňovány obláčkem, protože součet hodnot jeho pixelů je větší než součet hodnot pixelů oblasti svarové lázně i když mají vyšší jas. Z toho je zřejmé, že vysoká hodnota jasu pixelu odpovídající intenzitě dopadajícího záření nezaručuje vysokou korelaci. Způsob vyhodnocování přes korelační koeficient oproti porovnávání průměrných hodnot má tu výhodu, že zohledňuje i časový průběh měřených intenzit.

Výsledný kamerový snímek je závislý na nastavení kamery, především na použitých šedých filtrech a expoziční době. Nelze na kameru zachytit celý dynamický rozsah procesu a buď bude viditelný obláček s občasnou saturací v oblasti svarové lázně nebo oblast

5.5. OVĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍCH VLASTNOSTÍ LASERU

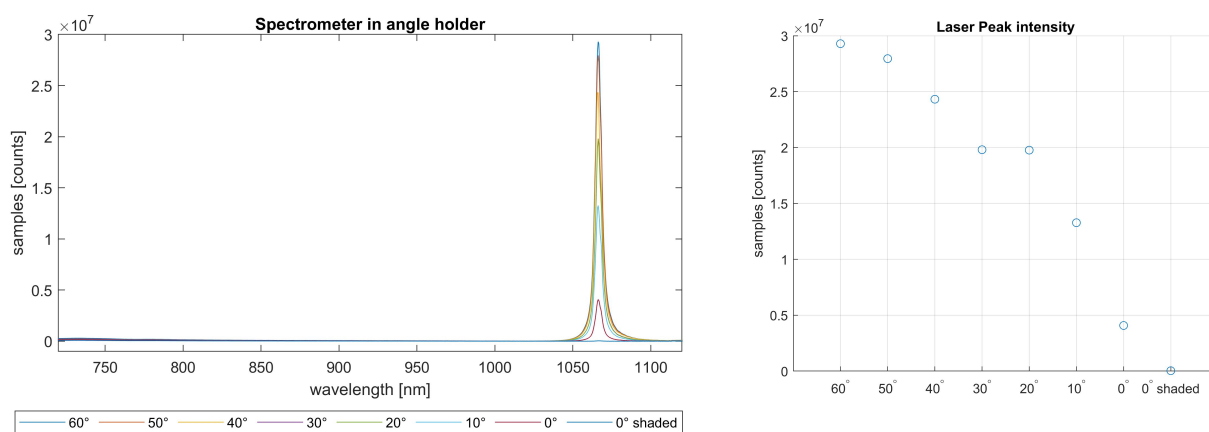
svarové lázně bez saturace, ale také bez viditelného obláčku. V tomto případě byla snaha o nalezení kompromisu. Fotodioda i kamera mají samozřejmě mírně odlišné parametry byt se jedná v obou případech o křemíkové čipy. Odlišují se například jinou citlivostí čipu, zorným úhlem, polohou, časováním a podobně. Použitá kamera je nejcitlivější na vlnové délce 500 nm zatímco fotodioda na 950 nm.

Zřetelně je tedy ukázáno, jak klíčový vliv na výslednou snímanou intenzitu má poloha fotodiody a expoziční čas. Boční fotodioda při aktuálním nastavení zachycuje svařovací proces podexponovaněji než kamera a snímá tak v tomto případě pouze oblast svarové lázně, avšak obláček plazmatu téměř nedetekuje. Naopak většinový jas detekovaný kamerou je v tomto případě tvořen zářením pocházejícím z obláčku plazmatu. Měřená intenzita a její původ tedy velmi záleží na polohování a nastavené citlivosti detektoru.

5.5. Ověření spektrálních vlastností laseru

Spektrální čára laseru se má dle specifikace laserového zdroje nacházet na vlnové délce 1070 ± 10 nm. Spektrometrem Ocean Optics Maya 2000 bylo ověřeno, že spektrální čára je skutečně v tomto rozsahu, viz graf 5.11a. Konkrétně při tomto měření se nacházela na vlnové délce 1070 ± 2 nm. Šířka čáry byla měřena standardně v polovině maximální intenzity.

V průběhu měření polohy a intenzity spektrální čáry laseru byl měněn vertikální úhel spektrometru vzhledem k povrchu svařovaného plechu v rozsahu $0-60^\circ$. Poloha zorného pole spektrometru vůči místu interakce laseru s materiálem byla kontrolována zpětným posvícením ukazovacího laseru do vlákna spektrometru. Svařovací parametry uhlíkové oceli 1.0577 byly $P = 1500$ W, $v = 20$ mm·s⁻¹ s polohou ohniska 1 mm pod povrchem materiálu. Při poloze spektrometru 0° byl pro kontrolu zablokován přímý výhled vlákna spektrometru na svařovací proces. Téměř nulovou hodnotou bylo ověřeno, že se jedná převážně o záření jsoící přímo z místa svařovacího procesu ke spektrometru a ne o záření rozptýlené na obláčku plazmatu. Výška laserové spektrální čáry s rostoucím úhlem roste, jak ukazuje graf 5.11b a zdá se, že kopíruje Lambertův kosinový zákon.



(a) Poloha spektrální čáry laseru.

(b) Výška spektrální čáry laseru v závislosti na úhlu.

Obrázek 5.11: Poloha a velikost spektrální čáry laseru v závislosti na úhlu pozorování.

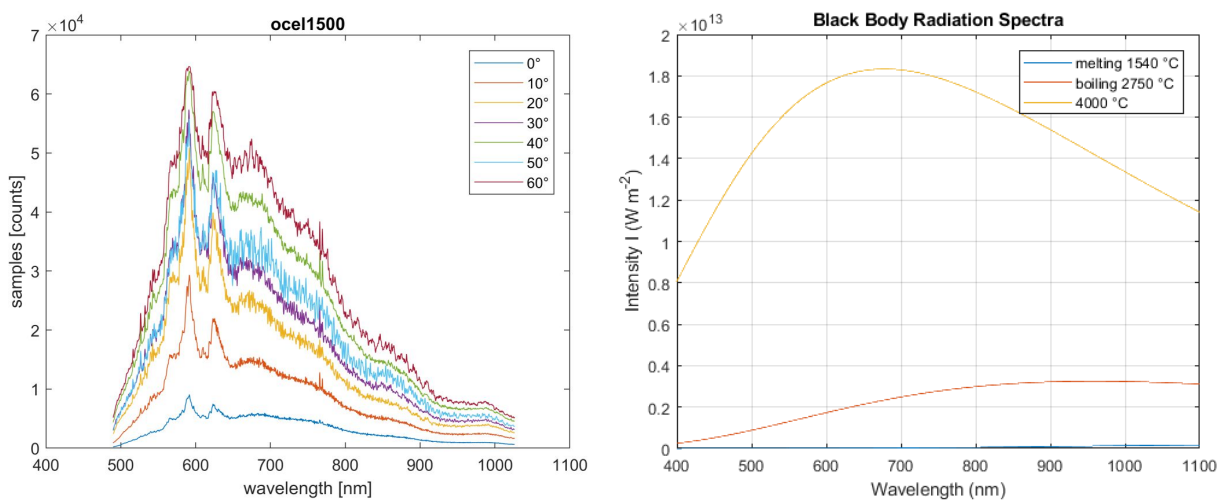
5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ FOTODIODOVÝMI SENZORY

Z obrázku 5.11a jde také vidět velký rozdíl mezi intenzitou laseru a svařovacího procesu, který se nachází převážně ve viditelném rozsahu vlnových délek. Spektrum svařovacího procesu není při daném měřítku příliš odlišitelné od nulové hodnoty. Z měření vyplývá, že pokud bude dostatečně snížena intenzita dopadající na detektor, například použitím šedých filtrů, budou příspěvky z procesu sníženy pod detekovatelnou úroveň a efektivně bude snímána pouze intenzita záření na vlnové délce laseru i bez použití selektivních spektrálních filtrů.

Spektrum svařovacího procesu bylo následně proměřeno detailněji spektrometrem Avantes s integrační dobou 5 ms a průměrováním 200 snímků. Opět byly proměřeny úhly 0 - 60°. Graf 5.12a ukazuje, že obecně při menším úhlu od materiálu jsou měřeny větší hodnoty. I přes snahu zajistit co nejpreciznější polohování se vyskytují nepřesnosti v důsledku polohování, které byly pozorovány i při jiných měřeních. Tato vlastnost komplikuje porovnávání jednotlivých měření a dále bude snaha tento vliv eliminovat.

Porovnáním kontinuálního spektra z reálného procesu s teoretickým spektrem vyzařování černého tělesa 5.12b lze ověřit, že výsledky jsou v souladu s teorií a pozorováním jiných autorů. Shcheglov [6] pozoroval nejvyšší teplotu plazmatu 4500 K, což odpovídá mému přibližnému odhadu použitím Planckova zákona, že nejteplejší zdroj má teplotu kolem 4000°C (4273,15 K). Z toho lze usuzovat, že v rozsahu vlnových délek kolem 500 - 900 nm je nejintenzivnější zdroj záření plazmový obláček, pomineme-li procesní laser. Pozvolnější pokles spektra na delších vlnových délkách je zapříčiněn nižšími teplotami, například teplotou varu oceli kolem 2750°C a teplotou tavení 1540°C.

Analýze čárových spekter jednotlivých prvků se tato práce nevěnuje, byť je to další možný směr pro sledování teploty nebo přítomnosti prvků při svařování kompozitních materiálů.



(a) Emisní spektrum svařovacího procesu v závislosti na úhlu pozorování.

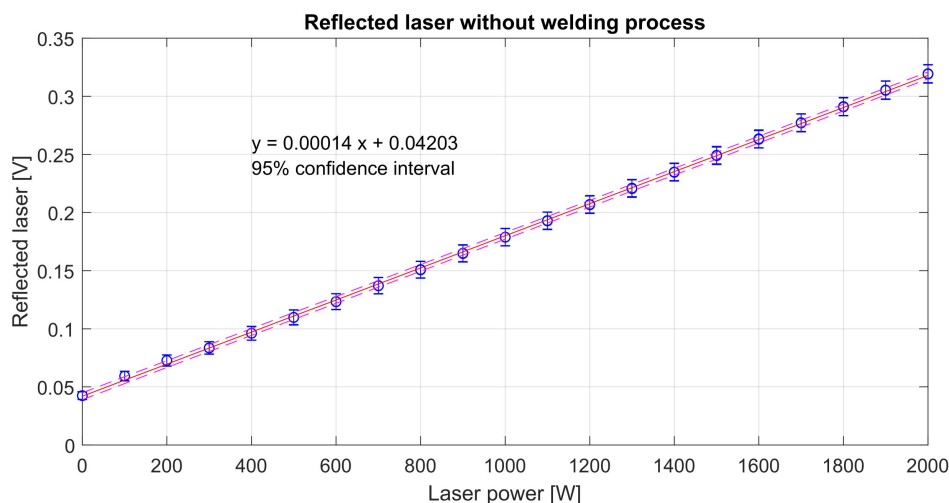
(b) Teoretická intenzita záření černého tělesa.

Obrázek 5.12: Optické emisní spektrum svařovacího procesu.

5.6. Zpětně odražené laserové záření

Na základě předchozích měření bylo vyhodnoceno, že jako nejvhodnější směr pozorování bude směr koaxiálně s laserovým svazkem a z celého viditelného spektra bude vybráno pouze úzké pásmo 1070 ± 10 nm obsahující pracovní vlnovou délku laseru. Odpadne tak problematika s polohováním fotodetektoru a měření budou nezávislá na směru pohybu svařovací hlavy. Volbou úzkého spektrálního pásma se také eliminuje vliv svařovaného materiálu protože dle provedených spektrálních měření se v blízké infračervené oblasti žádné výrazné spektrální čáry nenacházejí.

Vzhledem k tomu, že svařovací hlava a případně i přídatná optická soustava obsahuje množství optických elementů na kterých se laserové záření může odrážet nebo rozptylovat bylo provedeno měření závislosti zpětně odraženého záření na výkonu při průchodu svazku bez procesu svařování. Laserové záření prochází svařovací hlavou a po opuštění trysky je absorbováno v pohlcovači svazku. Pohlcovač svazku byl v některých variantách měření nahrazen betonovou plochou ve vzdálenosti 130 cm od ohniska a to bez rozdílu na výsledek. Veškeré odražené a rozptýlené světlo pochází pouze z vnitřní optické trasy. Intenzita byla měřena fotodiódou vestavěnou v laseru a to ve formě napětí na pinech datového konektoru. Napětí měřené kartou NI USB-6221 bohužel není převedeno na jednotku výkonu, protože kalibrace vestavěné fotodiody není známa. Výkon procesního laseru byl měněn v rozsahu 0 - 2000 W po 100 W intervalech. Pro každou hodnotu byly provedeny celkem 3 pulzy, každý o délce 0,7 s. Na grafu 5.13 je znázorněna změřená závislost zpětného odrazu na výkonu.



Obrázek 5.13: Závislost měřeného zpětného odrazu od svařovací hlavy a vlákna na výkonu.

Závislost je lineární. Drobná nepřesnost v oblasti nejnižších výkonů pod 300 W je způsobena nelineární závislostí výstupního výkonu laseru na proudu budících diod pod touto hranicí. Při výkonu pod 50 W není tento laser schopen za běžných podmínek emise vůbec.

Z provedeného měření však není zřejmé, jaká část záření připadá na rozptyl v dopravním optickém vlákne a jaká na odraz či rozptyl na elementech svařovací hlavy. Z tohoto důvodu bylo měření zopakováno, ale s tím rozdílem, že svařovací hlava byla odpojována od konektoru a měřil se tak pouze rozptyl v optickém vlákne průměru 200 μ m. Výsledný

5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ FOTODIODOVÝMI SENZORY

graf vypadá podobně s tím rozdílem, že závislost výkonu laseru na odražené intenzitě je popsána rovnicí

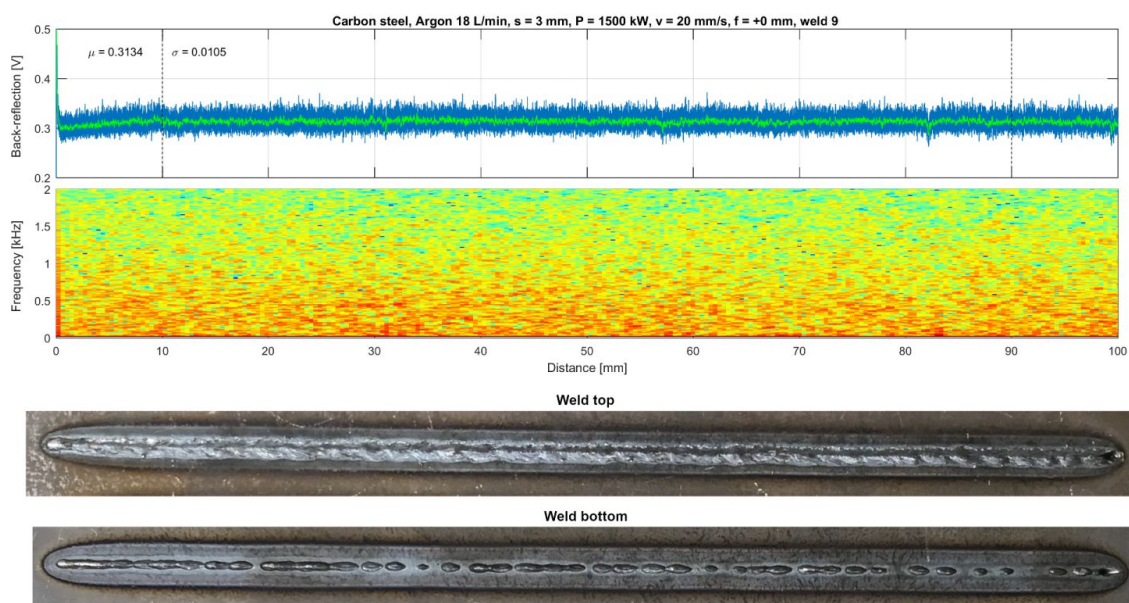
$$y = 0,00014x + 0,03824.$$

Z rovnic závislostí získaných z měření se svařovací hlavou a bez svařovací hlavy plyne, že zpětný odraz zapříčiněný svařovací hlavou přispívá systematicky hodnotou 0,00379 V ke zpětnému odrazu. Směrnice obou závislostí zpětného odrazu na výkonu je stejná. Při proměření vlákna jiného průměru jádra, konkrétně 100 μm byl opět zjištěn pouze konstantní rozdíl mezi případy kdy hlava byla nebo nebyla zapojena do konce dopravního optického vlákna. podle úrovně zpětně odraženého laserového záření lze tedy poznat zda je svařovací hlava připojena na konec dopravního vlákna. Podobně byla porovnána mezi sebou i samotná dopravní vlákna. Při použití optického vlákna o průměru 200 μm byl zaznamenán systematicky vyšší zpětný odraz o konstantu 0,00027 V než vlákno o průměru 100 μm a to při všech výkonech. Po předchozí kalibraci lze tedy rozlišovat i mezi vlákny na základě intenzity odraženého nebo v tomto případě spíše rozptýleného laserového záření.

5.6.1. Sledování svařovacího procesu pomocí zpětně odraženého laserového záření

Předchozí experimenty prokázaly dobrou schopnost poznat změny v optické trase na základě intenzity laserového záření detekovaného bezpečnostní fotodiodou vestavěnou v laseru. Stejný princip nyní bude vyzkoušen při změnách procesních parametrů a pro detekci svarových vad v průběhu procesu svařování.

Byly provedeny série měření s postupnou změnou parametrů a zbylými parametry konstantními tak, aby bylo možno porovnávat mezi jednotlivými měřeními. Svařována byla běžná konstrukční ocel 1.0577 tloušťky 3 mm, svařovací rychlost 20 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, poloha ohniska byla na povrchu materiálu a svar dlouhý 100 mm byl krytý argonovou atmosférou z koaxiální trysky s průtokem 18 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$. Zpětně odražené laserové záření bylo zaznamenáváno měřicí kartou NI USB-6003 se vzorkovací frekvencí 50 kHz.

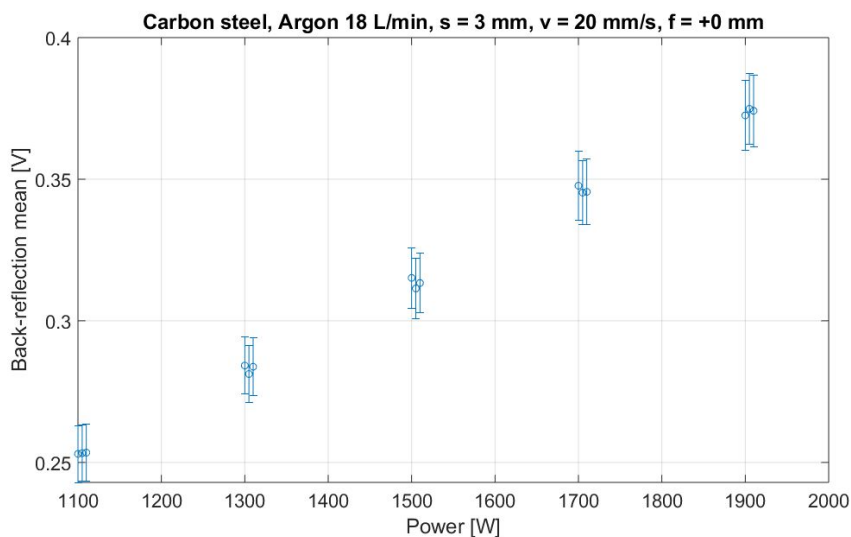


Obrázek 5.14: Záznam zpětně odraženého laserového záření spolu s povrchem svaru.

5.6. ZPĚTNĚ ODRAŽENÉ LASEROVÉ ZÁŘENÍ

Na grafu 5.14 je vidět průběh intenzity zpětně odraženého laserového záření (modře) spolu s jejím klouzavým průměrem (zeleně) a odhadem střední hodnoty a směrodatné odchylky spočítané ze středové části bez vlivu začátku a konce svaru. Spektrogramem bylo ověřeno, že se v datech nevyskytují lokální periodické změny a to jak ve zde vykresleném rozsahu do 0 - 2 kHz, tak v maximálním detekovatelném frekvenčním rozsahu 0 - 25 kHz daným Nyquistovým teorémem. Je prakticky vyloučena existence vyšších frekvencí v procesu, protože tyto by se přeložením z důvodu podvzorkování projeví jako falešné nízké frekvence. Nízké frekvence však nebyly ve zpětně odraženém laserovém záření pozorovány ani při zvolení jiné vzorkovací frekvence. Komplikacím s potenciální detekcí falešných frekvencí lze předejít instalací antialiasingového filtru. Vizuální kontrola spodní strany svaru ukazuje, že intenzitu odraženého laserového záření nelze jednoduše přímo spojit s hloubkou svaru, resp. úplnou penetrací kořene.

Graf 5.15 ze série měření, kde byl variován výkon v rozsahu 1100 - 1900 W ukazuje, že intenzita odraženého laserového záření je silně a lineárně závislá na výkonu. Pro každý výkon byly provedeny 3 svary a z každého svaru byl do grafu vynesena odhad střední hodnoty spolu se směrodatnou odchylkou. Průběh je velmi podobný grafu 5.13. Grafy bohužel nelze přímo porovnat, protože vznikly na mírně odlišných sestavách. Nicméně lze vyvodit, že hlavní složkou při běžném svařovacím provozu jsou v obou případech odrazy na vnitřní optické trase a příspěvek intenzity pocházející z procesu se podílí pouze malým dílem.

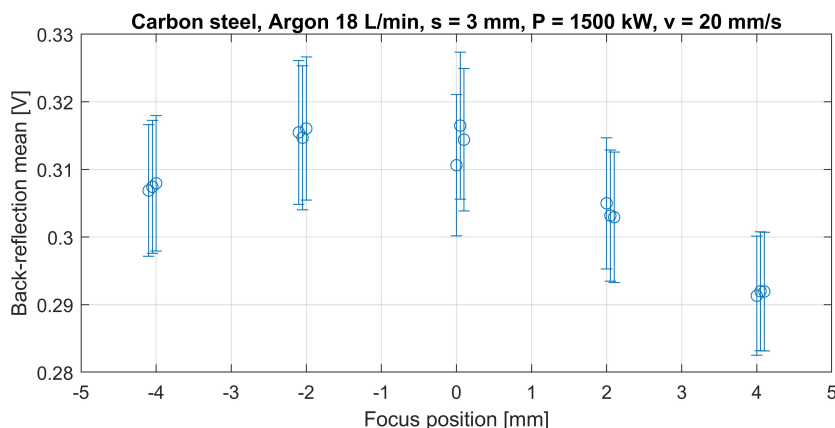


Obrázek 5.15: Závislost zpětně odraženého laserového záření na výkonu při svařování.

V další sérii měření byla měněna poloha ohniska a to v rozsahu -4 - 4 mm, přičemž nulová hodnota je na povrchu svařovaného plechu, záporné hodnoty směrem do materiálu a kladné směrem nad materiál. Z grafu 5.16 vyplývá, že pro daný případ je intenzita nejvyšší v rozmezí polohy ohniska -2 - 0 mm. Tento výsledek je slibný protože při penetračním laserovém svařování se obecně doporučuje mít ohnisko mírně pod povrchem svařovaného materiálu. Pro použitou tloušťku plechu 3 mm se doporučuje mít ohnisko na hodnotě -1 mm.

Svařované díly na sebe velmi často přesně nedosedají vlivem tolerancí a může vzniknout mezera mezi svařovanými díly. Čím tenčí je svařovaný plech, tím menší mezery jsou přípustné. S rostoucím poměrem mezery mezi díly ku tloušťce plechu roste riziko propa-

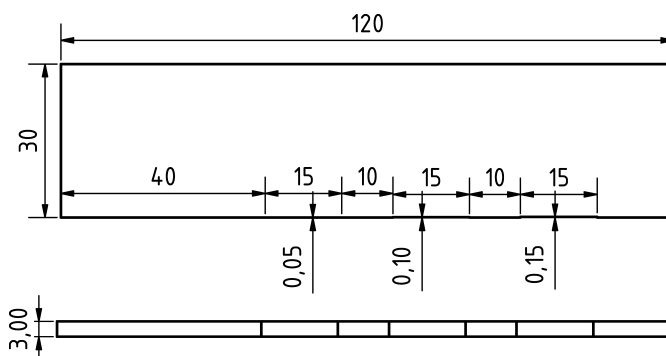
5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ FOTODIODOVÝMI SENZORY



Obrázek 5.16: Závislost zpětně odraženého laserového záření na poloze ohniska.

dení svaru vlivem nedostatku taveniny na vyplnění daného objemu. Při velikosti mezery u tupého svaru na úrovni velikosti laserového svazku již nedochází ke svaru a svazek prochází skrz. Naopak malá mezera mezi plechy může být přínosem, protože pomáhá šíření laseru a svar tak může dosáhnout hlubšího průvaru. Druhý benefit je v odvodu přetlaku plynů vzniklých odpařením případných nečistot nebo povrchových úprav, zvláště při přeplátovaném svaru.

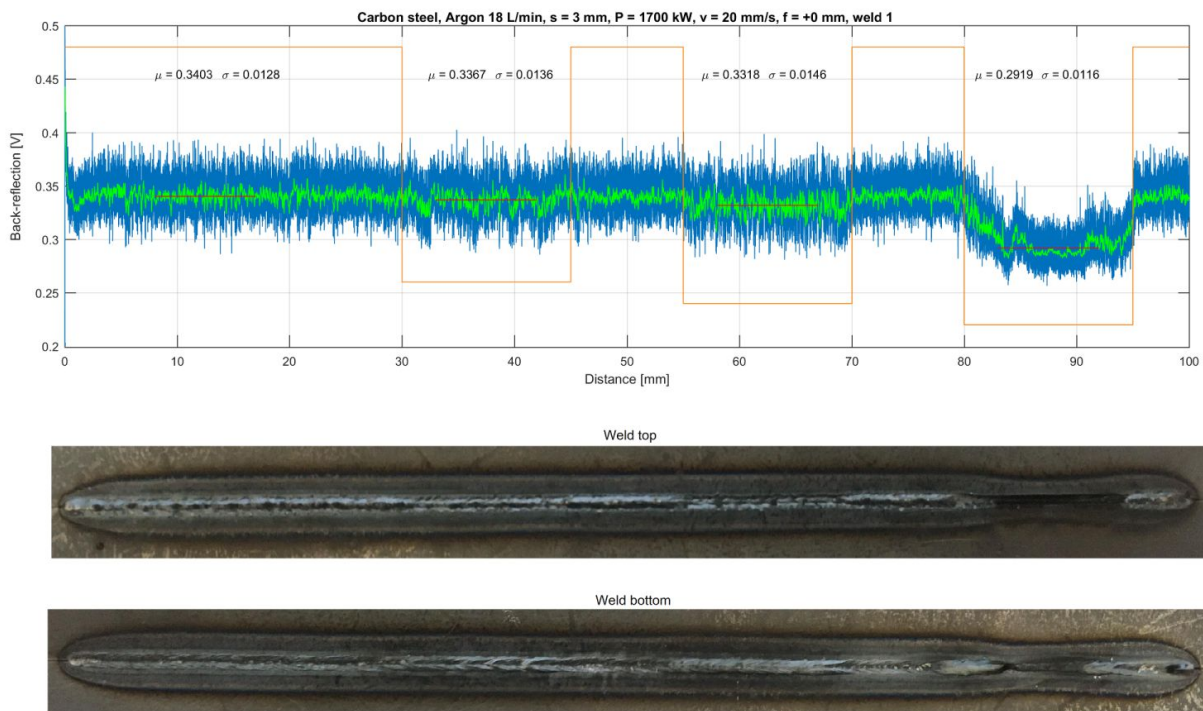
Zde použitý laserový svazek má v ohnisku průměr 0,4 mm, proto byla pro experiment detekce vlivu mezery na zpětně odražené laserové záření zvolena velikost mezery 0; 0,1; 0,2 a 0,3 mm. Do hrany plechu experimentálního vzorku byly za sebe vyfrézovány drážky s různou hloubkou a tak byly mezery přesně definovány, viz náčrtek 5.17. Dva takové vzorky byly sesazeny k sobě a laserový svazek tak procházel středem. Spojením obrábění a ne příliš dlouhé délky testovacích úseků bylo dosaženo přesnosti a dostatečné tuhosti. Použití tenkých dlouhých vzorků s distančními podložkami na krajích se neosvědčilo z důvodu, že tuhnutí svaru má tendenci stahovat díly k sobě a v průběhu svařování se tak mění podmínky.



Obrázek 5.17: Výkres dílu s definovanou mezerou simulující různé sesazení svařovaných dílů.

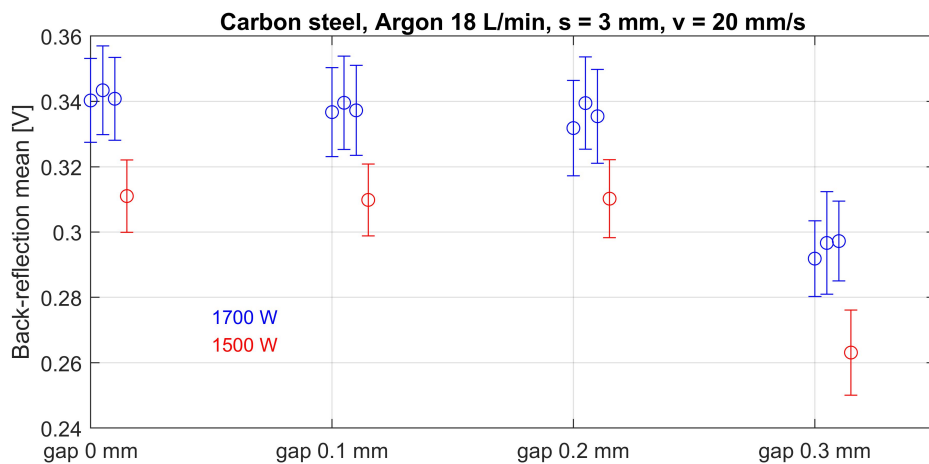
Byl zaznamenáván průběh intenzity zpětně odraženého laserového záření při svařování výkonem 1700 W a rychlostí $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Průběh je vykreslený na grafu 5.18 spolu s vyznačenou polohou drážky a povrchem hlavy i kořene svaru. Jednotlivé testovací úseky jsou vizuálně hodnoceny povrchu svaru zřetelně viditelné. Svary s větší mezerou jsou více propadlé a také změny v průběhu intenzity zpětně odraženého laserového záření jsou zřetelnější.

5.6. ZPĚTNĚ ODRAŽENÉ LASEROVÉ ZÁŘENÍ



Obrázek 5.18: Zpětně odražené laserové záření při tupém svaru s mezerou mezi plechy.

Svary byly několikrát zopakovány s výkonem laseru 1700 W a jednou s 1500 W, viz graf 5.19. S rostoucí velikostí mezery klesá průměrná hodnota intenzity, avšak až u mezery velikosti 0,3 mm je rozdíl prokazatelně odlišitelný. Výsledky jsou konzistentní a je tudíž důvodný předpoklad, že se budou chovat podobně i při dalších výkonech laseru.



Obrázek 5.19: Závislost zpětně odraženého laserového záření na tupé mezeře mezi plechy.

Složitější případ nastává v případě přeplátovaného spoje s mezerou mezi plechy, kdy mezerka není viditelná a při svařování kromě vady propadnutí hlavy svaru hrozí i vada nespojení materiálu nazývaná false friend, kdy při pohledu na hlavu i kořen se svar jeví v pořádku, ale díly spojeny nejsou. I v tomto případě je vada detekovatelná analogicky stejnou metodou.

5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ FOTODIODOVÝMI SENZORY

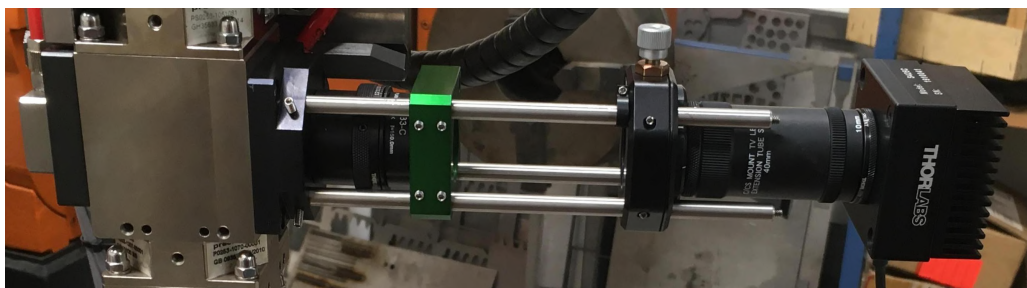
Vady vzniklé nesprávným sesazením byly detekovány také frekvenční analýzou intenzity obláčku plazmatu snímané boční fotodiodou. Při koaxiálním pohledu na vlnové délce procesního laseru ale nebyly zjištěny žádné oscilace hodnoty intenzity. Sofistikovanějším vyhodnocením odražené intenzity laseru nebo kombinací údajů z obou fotodetektorů by se dal systém detekce mezery zdokonalit.

Další provedená měření ukázala, že kvalita povrchu svařovaného dílu má při běžných svařovacích parametrech malý nebo žádný vliv na hodnotu intenzity zpětného odrazu laseru. Byly zkoušeny svary na povrchu ve výchozím stavu, broušeném povrchu a zkorodovaném povrchu. Důvodem může být, že většina povrchu, od kterého se laserové záření odráží je tvořen svarovou lázní, která se před laserový svazek dostává vedením tepla. Kvalita povrchu může hrát roli až při vysokých svařovacích rychlostech.

Náklon laserového svazku v rozmezí $\pm 10^\circ$ od normály svařovaného povrchu nemá zásadní vliv na úroveň zpětně odraženého laserového záření v průběhu svařování. Vliv úhlu je pozorovatelný pouze na začátku svařování, než se začne tvořit keyhole. Nebezpečný počáteční odraz se s rostoucím úhlem odklonu zmenšuje, protože se zpět do vlákna naváže menší část. Z tohoto důvodu je doporučeno nemít optickou osu svařovací hlavy při svařování kolmo na materiál, ale pokud možno pod mírným úhlem.

5.6.2. Měření výkonu zpětně se vracejícího laserového záření

Dříve popsaný způsob měření zpětně odraženého laserového záření pomocí fotodiody vestavěné v laseru je sice praktický, ale získané hodnoty nejsou v jednotkách výkonu, ve watech. Proto bylo provedeno měření odporovým měřičem výkonu připevněným ke svařovací hlavě. Měřič výkonu Thorlabs S425C s jednotkou PM101 umožňuje měřit výkon na vlnových délkách 160 nm - 20 μm s rozlišením 100 μW a je schopný měřit v rozmezí výkonu 2 mW - 10 W při vzorkovací frekvenci 1 Hz. Udávaná nejistota měření na vlnové délce 1064 nm blízké zde používané vlnové délce je $\pm 3\%$. Sestava je zachycena na 5.20. Měřič výkonu je umístěn ve stejné vzdálenosti jako bývá v optickém nástavci umístěna kamera a fotodioda. Jedinými rozdíly jsou absence dělicího hranolu, šedého filtru a fokusační čočky.



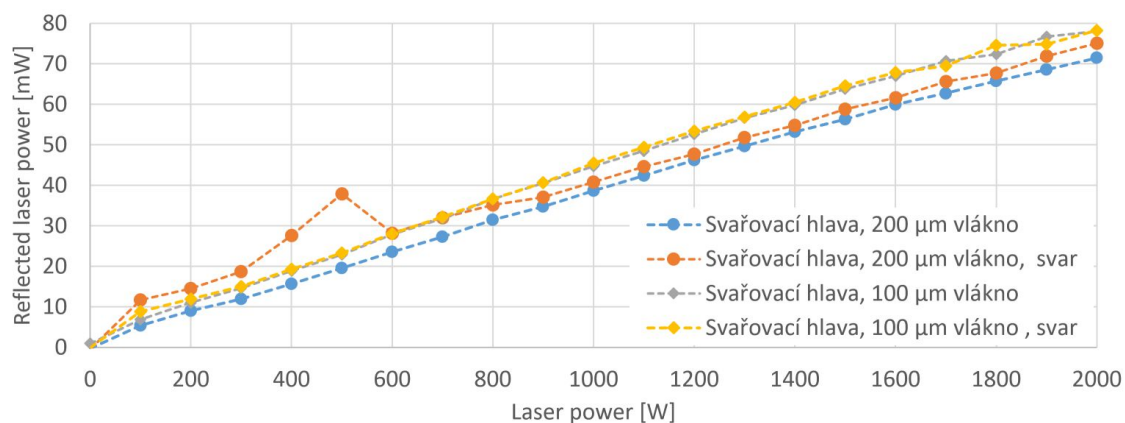
Obrázek 5.20: Sestava pro měření výkonu zpětně odraženého a rozptýleného laserového záření.

Parametry měřiče výkonu by měly být dostatečné v získání odhadu jaká část laserového výkonu se odráží zpět. Výsledky však není možné použít pro kalibraci fotodiody umístěné v laseru, protože ta je umístěna na jiné větvi výkonového děliče, jehož dělicí poměr na vlnové délce 1070 nm není znám a navíc za dopravním optickým vláknem. Nízká

5.6. ZPĚTNĚ ODRAŽENÉ LASEROVÉ ZÁŘENÍ

vzorkovací frekvence odporových měřičů výkonu z nich nedělá dobrý nástroj pro sledování dynamiky svaru.

Obrázek 5.21 ukazuje měření výkonu odraženého a rozptýleného laserového záření v optickém nastavci za děličem svazku. Na měřič výkonu dopadá kolimovaný svazek a žádné filtry nejsou použity. Byl změřen vliv použití 100 μm a 200 μm vlákna a také vliv svařovacího procesu oproti pohlcovanému svazku. Odražený výkon je lineárně závislý na výstupním výkonu laseru. Nastává tedy systematicky odraz či rozptyl na vnitřních optických elementech svařovací hlavy. Dále lze konstatovat, že laserový výkon odražený či rozptylovaný optikou svařovací hlavy se pohybuje pro výkony 300 - 2000 W pod 0,005 % výstupního výkonu laseru. Hodnota pro nižší výkony je přibližně dvojnásobná. Při použití dopravního optického vlákna s menším průměrem byly ve svařovací hlavě naměřeny vyšší hodnoty vracejícího se výkonu oproti vláknu s větším průměrem. Při nižších výkonových hustotách byl také patrnější rozdíl mezi měřením s a bez procesu. Největší příspěvky výkonu odražené ze svařovacího procesu byly naměřeny pro 200 μm vlákno a výkony přibližně 100 - 700 W. Takové hodnoty odpovídají kondukčnímu a přechodnému režimu svařování a pravděpodobně souvisí s nízkou výkonovou hustotou. Pokud se výkonová hustota zvýší buď zvýšením výkonu nebo zmenšením průměru ohniska, k odrazu již nedochází.



Obrázek 5.21: Výkon odraženého laserového záření detekovaného ve svařovací hlavě.

6. Výsledky měření kamerou

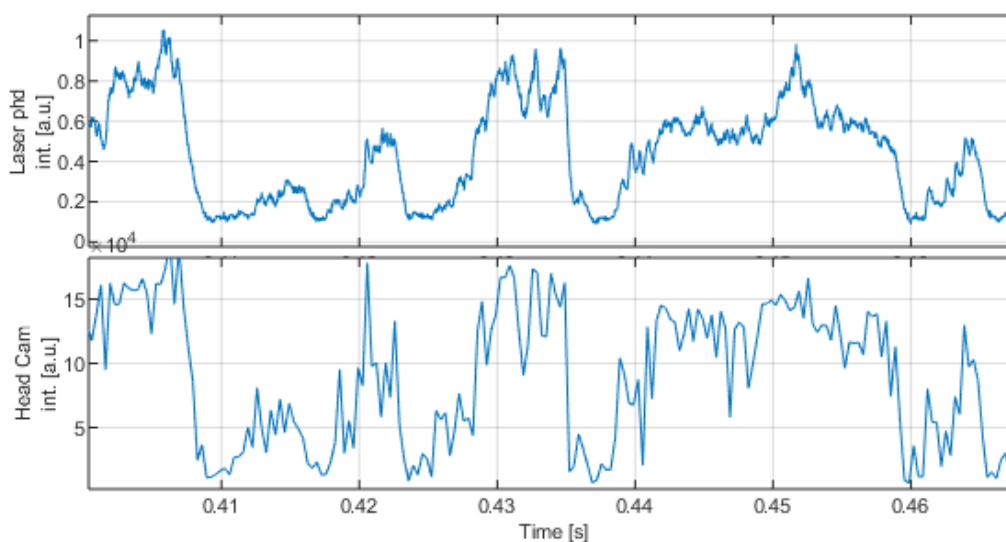
Intenzita záření měřená fotodiódou je plošná hustota výkonu popsaná jednou hodnotou. Rozšířením bodového měření o prostorové souřadnice použitím kamery oproti fotodiódě lze získat lepší vhled do procesu. Zaznamenaná data tvoří sérii snímků. Každý snímek je maticí s řádky a sloupci $I, J \in \mathbb{N}$. Hodnoty jasu $g_{ij} \in [0, 255]$, $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$ reprezentují intenzitu záření dopadající na plochu jednoho pixelu kvantovanou analogově digitálním převodníkem.

Další postup se tedy bude primárně zabývat pořizováním a vyhodnocováním obrazových dat. Pokud se podaří identifikovat a separovat místa a jevy s vlivem na kvalitu svaru, může se fotodióda v nějaké úzce cílené podobě pro sledování procesu využívat, ale do té doby bude dále rozvíjen směr koaxiálního pozorování svařovacího procesu kamerou na vlnové délce procesního laseru.



Obrázek 6.1: Série snímků při laserovém výkonu 1500 W, posuvné rychlosti $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a snímkovací frekvenci kamery 3003 Hz.

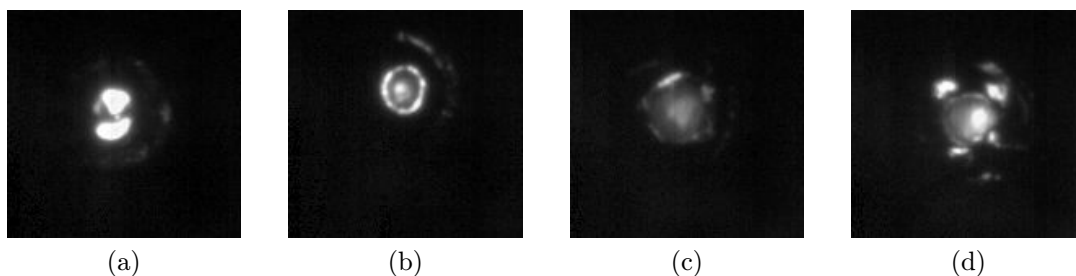
Obrázek 6.1 ukazuje sérii po sobě jdoucích snímků zaznamenaných se snímkovací frekvencí 3003 Hz. Je vidět, že použitá frekvence není dostatečná pro plynulé zachycení dynamiky procesu, protože snímky na sebe nenavazují. Jednotlivé snímky jsou také mírně rozmazané, což může souviset s relativně dlouhou expoziční dobou $59 \mu\text{s}$. Samotné ostření komplikuje fakt, že optická sestava pracuje na vlnové délce 1070 nm a je zapotřebí mít pro zaostření buď dostatečně silný zdroj osvětlení nebo rovinu ostrosti určit experimentálně.



Obrázek 6.2: Detail průběhu intenzity zpětně odraženého laserového záření detekovaného fotodiódou v laseru a kamerou ve svařovací hlavě.

Graf 6.2 ukazuje průběh intenzity z fotodiody vestavěné v laseru vzorkované na 40 kHz a integrální intenzitu z jednotlivých snímků kamery, tj. $\sum_{ij} g_{ij}$. Oba průběhy intenzit spolu korelují, což potvrzuje, že oba detektory snímají stejný jev. Odlišnosti v průběhu pocházejí z odlišné snímkovací frekvence a optické trasy. K fotodiodě v laseru musí záření projít skrze 15 m dlouhé optické dopravní vlákno, kdežto v hlavě je záření snímáno přímějí. Fotodioda v laseru může pracovat na vyšších frekvencích, v tomto případě 40 kHz oproti koaxiálně umístěné kameře ve svařovací hlavě, která v použité sestavě dosahuje maximálně 3003 Hz. Bylo provedeno také měření s koaxiálně připevněnou fotodiodou ke svařovací hlavě namísto kamery a průběhy zaznamenaných intenzit dopadly taktéž velmi podobně. Výhodou použití koaxiálně instalované fotodiody ve svařovací hlavě je dosažení stejné frekvence 40 kHz. Nevýhodou je větší citlivost na sesazení detektoru vzhledem k optické ose, protože fotodioda má menší detekční plochu než čip kamery.

Nejprve bylo ověřeno, že kamera je schopna snímat proces v celém rozsahu výkonovém rozsahu laseru, respektive všechny svařovací režimy. Typické snímky pořizované experimentální optickou sestavou pro vybrané výkony laseru jsou na obrázku 6.3. Režim svařování závisí z velké části na výkonu a tudíž jsou zde zachyceny základní svařovací režimy a to kondukční (a), přechodný (b) a penetrační (c, d).



Obrázek 6.3: Koaxiální snímky keyhole pro posuvnou rychlost $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a výkon laseru: (a) 500 W, (b) 1000 W, (c) 1500 W, (d) 2000 W.

Kondukční režim je charakteristický mělkou miskovitou prohlubní ve svarové lázni. Snímky kondukčního svařovacího režimu obsahovaly nejvíce saturovaných pixelů. Velké světlé plochy indikují malý gradient hloubky a navíc se mění méně dynamicky než v případě ostatních režimů.

Při přechodném režimu se vyskytuje podobná mělká prohlubeň jako při kondukčním režimu, ale je hlubší a protaženější a místy se dočasně může zformovat mělká keyhole, která nepravidelně kolabuje a znovu vzniká. Taková dočasná mělká keyhole je právě zachycena na snímku (b) a její průměr je menší než průměr svazku.

Při plném penetračním režimu svařování zůstává keyhole typicky přítomna po celou dobu a její okraj, tj. nejbližší povrch svarové lázně je velmi dynamický. Na okraji jsou na různých místech viditelné malé odlesky, jež vznikají na vlnkách roztaveného kovu. Jak bylo již demonstrováno na obrázku 6.1, změny intenzity na okraji a uvnitř keyhole probíhají na dané snímkovací frekvenci bohužel skokově, avšak s dostupným vybavením při rozumném prostorovém rozlišení vyšších snímkovacích frekvencí nelze dosáhnout.

Ostřejší snímky (a, b) zachycují méně hlubokou dutinu kdežto méně ostré snímky (c, d) zachycují hlubší dutinu - keyhole. Neostrost tedy vzniká buď vlivem malé hloubky ostrosti optického systému nebo rozptylováním laseru na kovovém plazmatu uvnitř keyhole, která narůstá s výkonem laseru a tudíž i hloubkou keyhole. Z různých testovaných šedých filtrů

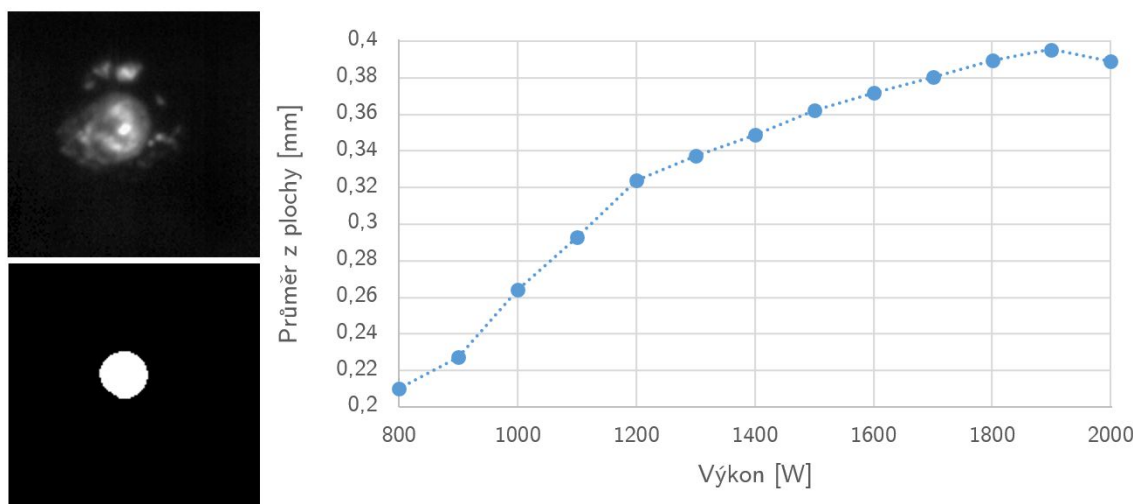
snižujících měřenou intenzitu se nejvíce osvědčil filtr s $OD = 3$, který byl zvolen jako kompromis mezi množstvím pixelů nad hodnotou saturace a pod prahem detekce.

6.1. Odhad průměru keyhole

Průměru keyhole je parametr, který má vliv na výsledný svar. Často se průměr keyhole odhaduje prahováním snímků. Pro srovnávací měření může být takový přístup dostačující, avšak z vlastních zkušeností výsledná velikost keyhole závisí na nastavení kamery a zvolené prahové hodnotě. Otázkou pak je, zda takto odhadnutá velikost ústí, tj. horního průměru, keyhole odpovídá realitě.

Nejprve byly provedeny svary na konstrukční uhlíkové oceli 1.0577 s výkonem laseru po 100 W přírůstcích při konstantní posuvné rychlosti $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Cílem bylo dosáhnout a pozorovat různé průměry keyhole. Na některých snímcích je obrys ústí keyhole zřetelně viditelný, ale z některých snímků nelze hranici určit, protože splývá vnitřek keyhole s povrchem svarové lázně. Laserové záření je často odraženo pouze z určité oblasti a zbytek je tmavý.

V první fázi byl vyzkoušen koncept odhadu velikosti keyhole ze snímků sestavené optické sestavy. Velikost keyhole byla nejprve odhadnuta, aby se získala předběžná závislost průměru keyhole na výkonu laseru. Z některých pořizovaných snímků však nelze určit rozměr svarové dutiny případně svarové lázně, protože vlivem změny tvaru svarové lázně nemusí některé části odrážet záření dostatečné intenzity směrem ke kameře. Z každé série snímků byl vybrán jeden reprezentativní snímek se zřetelným a interpretovatelným tvarem a podle něj obkreslena maska v grafickém editoru. Bylo dbáno na to, aby vybrané snímky dostatečně reprezentovaly celou sérii snímků. Získané hodnoty lze následně využít jako srovnávací kritérium při návrhu automatizovanějšího systému měření.



Obrázek 6.4: Odhad průměru keyhole z masky. Původní snímek, maska keyhole a průběh průměru keyhole odhadnutého z plochy masky.

Výsledná maska spolu s referenčním snímkem pro výkon 1300 W je na obrázku 6.4. Masky nevycházejí kruhové, protože kopírují reálný tvar keyhole. Z plochy masky byl spočítán průměr, který by odpovídal kruhu stejné plochy a hodnoty byly zaneseny do

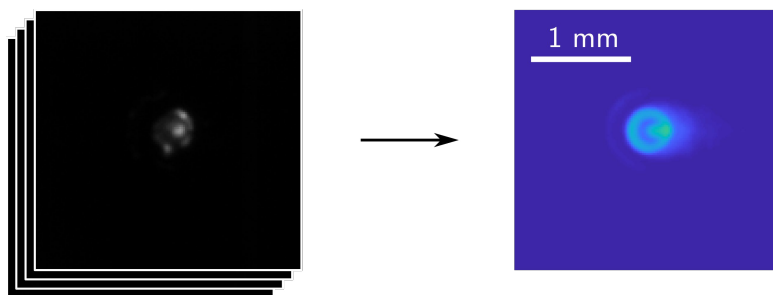
6.1. ODHAD PRŮMĚRU KEYHOLE

grafu 6.4. S rostoucím výkonem roste i odhadovaný průměr keyhole a limitně se blíží velikosti laserového spotu 400 μm . Keyhole by se v závislosti na svařovaném materiálu a vlastnostech laserového svazku měla pohybovat přibližně kolem velikosti laserového spotu.

Uvažovat o keyhole, resp. penetračním režimu při rychlosti 20 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a laserovým svazkem daných parametrů má v tomto případě smysl pro výkony 800 - 2000 W. Pro nižší výkony 0 - 700 W se stabilní keyhole netvořila a i v případě 800 W se jedná spíše o přechodný režim, kdy se v miskovité svarové lázni kondukčního režimu začíná tvořit keyhole.

Další výzvou je pak najít spolehlivou metodu binarizace tvaru keyhole a sledovat časový vývoj jejího tvaru. Pro zachycení časového vývoje keyhole může být řešením vybírat pouze takové snímky, které zachycují dostatečně velkou část procesu a části svarové lázně jsou dobře rozlišitelné. Tento přístup však nezaručí počet dobrých snímků v záznamu. Vybírání dobrých snímků má ještě jednu nepříjemnou vlastnost a to, že ignoruje ty snímky, na kterých nelze jednoznačně klasifikovat jednotlivé části svarové lázně. Což mohou být právě ta místa, ve kterých se děje v procesu něco neočekávaného. V nich se mohou měnit svarové podmínky nebo dokonce vznikat svarové vady.

Lepším řešením je tedy brát v úvahu všechny snímky, statisticky je zpracovat a identifikovat klíčové parametry obrazu, které mají vliv na kvalitu procesu. Za předpokladu konstantních svařovacích podmínek lze extrahovat klíčové parametry z celého záznamu svaru nebo za předpokladu alespoň lokálně konstantních svařovacích podmínek rozdělit svar na kratší úseky a dále provádět analýzu pouze na nich. Rozdělení celého procesu na kratší série snímků například zavedením plovoucího okna dává do budoucna možnost sledování změn během svařování.



Obrázek 6.5: Princip zpracování sekvence snímků statistickými metodami. V tomto případě je zobrazena variabilita intenzity.

Myšlenka zpracování snímků je zobrazena na obrázku 6.5. Výsledek je zobrazen v nepravých barvách, jak pro lepší čitelnost, tak pro zřejmé odlišení od nezpracovaných dat. V tomto případě se jedná o odhad směrodatné odchylky jednotlivých pixelů z dané sekvence. Světle modré odstíny značí místa s vysokou hodnotou odhadu směrodatné odchylky a tedy i variabilitou jasu, tj. intenzity odraženého laserového záření. V tomto případě světlé odstíny modré zobrazují obvod a spodní část keyhole. Z několika snímků s neúplnou informací je získán snímek zřetelněji zobrazující svařovací proces. Ještě důležitější je fakt, že takto může být statisticky popsán i dlouhodobý charakter svařovacího procesu. Volbou délky okna je možné se zaměřit jak na lokální změny, tak porovnávat i svařovací procesy mezi sebou. Podobným způsobem budou dále zpracovávána měřená data a výsledky porovnávány s parametry procesu a charakteristikami svaru.

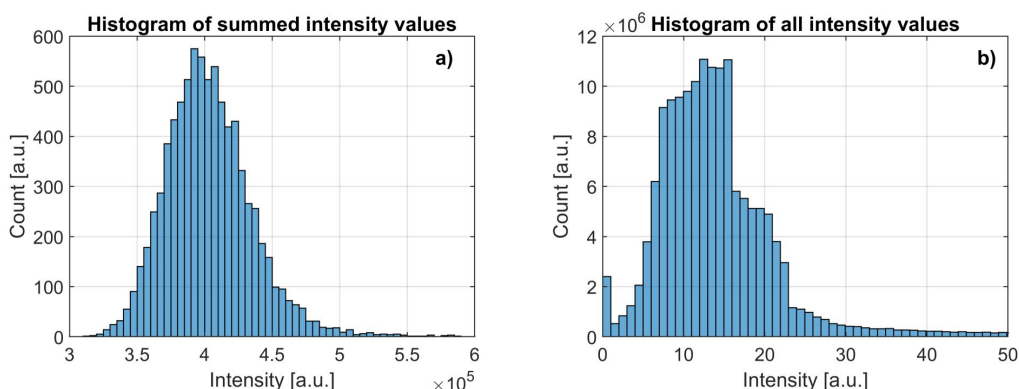
6.2. Distribuce intenzity odraženého laserového záření

Optickými metodami je detekována intenzita záření, tj. plošná hustota zářivého toku. Jednotkou intenzity je watt na metr čtverečný, avšak v této práci se z důvodu používání různých sensorů uvažuje jako ekvivalent intenzity také napětí nebo hodnota jasu obrazu. Neexistence kalibrace není ideální, avšak na možnosti ověření principu a provádění srovnávacích měření nic nemění.

Distribuci hodnot intenzity g_{ij} během procesu dopadající na celý čip kamery popisuje histogram 6.6a. Intenzitou dopadající na celý čip je myšlen součet hodnot všech pixelů jednoho snímku $\sum_{ij} g_{ij}$, čímž se kamera redukuje na fotodiodu. Podobný histogram má také intenzita z koaxiálně umístěné fotodiody, ať je umístěná v hlavě nebo v laserovém zdroji. Histogram připomíná normální rozdělení, je však mírně zešikmený.

Podrobnější vzhled do svařovacího procesu poskytuje histogram 6.6b, který je sestaven z četností hodnot jednotlivých pixelů ze všech snímků. Tvar histogramu ukazuje, že se pravděpodobně jedná o směs více rozdělení pravděpodobnosti. Histogram vznikl z identické série snímků jako histogram předešlý a názorně ukazuje, že pouhý fotodiodový snímač není schopen některé informace zachytit. Na histogramech je také vidět vlastnost plynoucí z centrální limitní věty, která říká, že rozdělení součtu nezávislých náhodných veličin se limitně blíží k normálnímu rozdělení pravděpodobnosti.

Pro popis procesu je klíčové separovat obraz na jednotlivé podmnožiny. Při použití fotodiody toto není možné, ale pomocí kamery lze jednotlivé pixely klasifikovat na základě odlišného průběhu intenzity. Klasifikace různých částí procesu v obrazových datech bude předmětem následujících vyhodnocení.

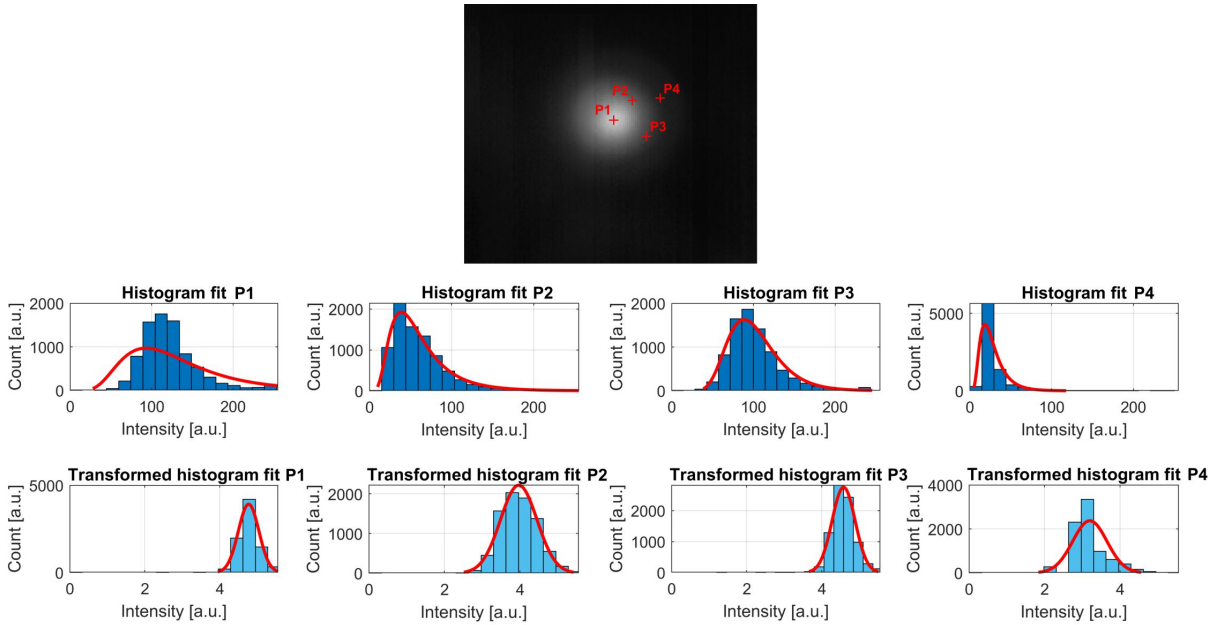


Obrázek 6.6: Histogram intenzit při laserovém svařování pro (a) integrální hodnotu všech pixelů kamery, tj. simulovanou fotodiodu a (b) individuální pixely kamery.

Na základě histogramů se ukazuje, že zmapování plošného rozložení intenzity zpětně odraženého laserového záření může být klíčové pro lepší identifikaci dějů ve svařovacím procesu. Proto byly spočítány histogramy z časových průběhů intenzit ve čtyřech bodech, viz obr. 6.7. Se vzdáleností bodu (pixelu) od osy laserového svazku se mění rozložení intenzity.

Průběhy intenzit zkoumány ve čtyřech bodech P1, ..., P4, které jsou zakresleny na snímku průměrných intenzit a jsou souhrnně popsány histogramy. Přičemž bod P1 je nejbližší ose laserového svazku a bod P4 nejdále. U pixelů blíže k ose svazku je zřetelná saturace jasu. Saturaci je dobré se vyhnout, ale ne vždy je to vzhledem k malému dynamickému rozsahu kamery možné. Většinou lze pozorovat buď nízké intenzity při výskytu

6.2. DISTRIBUCE INTENZITY ODRAŽENÉHO LASEROVÉHO ZÁŘENÍ



Obrázek 6.7: Histogramy intenzit v různých bodech svařovacího procesu s logarotmicko-normálním fitem a histogramy transformovaných hodnot a normálním fitem.

saturovaných oblastí nebo pozorovat vyšší intenzity bez schopnosti rozlišit nízké. Histogramy jsou zešíkmeny a mají různé parametry rozdělení pravděpodobnosti výskytu dané intenzity.

Dále se nabízejí dva přístupy, buď zjistit jaké rozdělení pravděpodobnosti mají naměřená data a pracovat s ním nebo data transformovat na normálně rozdělená. Korektním postupem by bylo nalézt Box-Coxovu případně Johnsonovu transformaci pro každý bod individuálně. Praktičtější by však bylo mít pro všechny body stejnou transformaci. Po mnohých pokusech o transformaci dat z různých svarů či jejich proložení běžně používanými rozděleními velmi často vycházelo, že data mají logaritmicko-normální rozdělení. Je proveden fit logaritmicko-normálního rozdělení pravděpodobnosti, který souhlasí a je narušován pouze saturovanými hodnotami v bodě P1. Pro následnou práci s daty je vhodné logaritmicko-normální rozdělení transformovat na normální. Problém s nekladnými hodnotami mimo definiční obor logaritmu lze při transformaci korektně řešit přičtením malé kladné konstanty k k intenzitě, resp hodnotě jasu g' . Výsledkem je transformovaná hodnota $g' = \ln(g+k)$. V tomto místě jsem však přistoupil k nahrazení hodnot pod konstantu k zvolenou konstantou

$$g' = \begin{cases} k, & \text{pro } g \leq k \\ g, & \text{jinak} \end{cases} .$$

Tento přístup se mi osvědčil jako robustní také při transformaci dat z fotodiody, kde se vlivem šumu mohou vyskytovat i malé záporné hodnoty předem neznámé velikosti. Tento postup lze při mírně vyšší zvolené prahové hodnotě použít také jako jednoduchou eliminaci šumu. Nevýhodou tohoto postupu je, že nelze provést korektně zpětnou transformaci. Konstantu k jsem pro případ obrazových dat volil rovnu jedné.

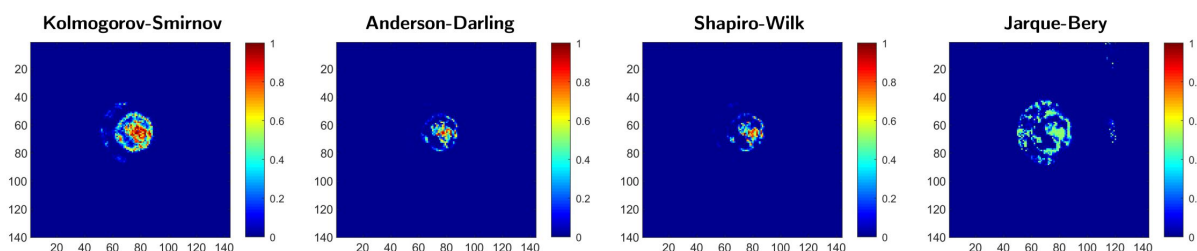
Po logaritmické transformaci již hodnoty intenzity v jednotlivých bodech mají normální rozdělení. Na základě transformovaných histogramů intenzit ve vybraných bodech

graficky znázorněných na obrázku 6.7 lze konstatovat, že parametry normálního rozdělení se liší. Dále bude podrobněji zkoumána závislost odhadu střední hodnoty a směrodatné odchylky, případně i dalších koeficientů na parametrech procesu. Jelikož laserový svařovací proces může být provozován ve dvou odlišných režimech, bude vhodnější nahlížet na penetrační a indukční režim odděleně. Teprve po pochopení pozorovaných jevů přistoupit k hodnocení přechodu mezi nimi při přechodném svařovacím režimu.

6.2.1. Využití testů normality pro sledování svařovacího procesu

Po transformaci dat je potřeba vždy ověřit zda bylo dosaženo požadovaných vlastností, v tomto případě normality. A to tak, že z průběhu intenzity pro každou polohu, tj. pixel, je spočtena p-hodnota příslušného testu normality. Testy jsou blíže popsány v podkapitole 4.2.1. Využití p-hodnoty místo porovnávání hodnoty testové statistiky s kritickou hodnotou má tu výhodu, že testy normality lze jednodušeji mezi sebou porovnávat.

Výpočet v tomto případě probíhal pro krátké časové okno o počtu $n = 100$ snímků při frekvenci kamery 3003 Hz, tedy délka okna je přibližně 33 ms. V rámci jednoho okna bylo provedeno 20 160 testů normality od každého typu. V případě, že bych potřeboval rozhodnout o výsledku testu, jsem před testem jsem stanovil hladinu významnosti na obvyklých $\alpha = 0,05$. Nicméně pro lepší vzhled do procesu a následné zpracování jsem ponechal výsledky testů normality ve formě p-hodnoty. V bodech, kde p-hodnota vyjde menší než α zamítáme, že data pocházejí z normálního rozdělení. Body s p-hodnotou větší než α normalitu nevyklučují a v těchto bodech má smysl odhadovat parametry normálního rozdělení.

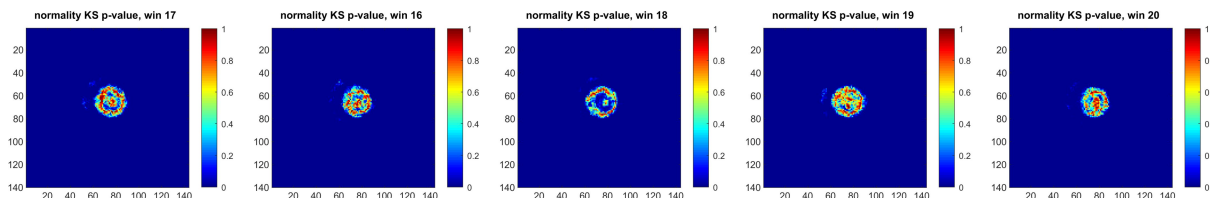


Obrázek 6.8: P-hodnoty pro různé testy normality při svaru uhlíkové oceli, výkon laseru 1100 W a rychlost 50 mm·s⁻¹.

Z map normality na obrázku 6.8 je vidět, že testy Anderson-Darling a Shapiro-Wilk dávají podobné výsledky a že mají větší sílu testu než zbylé dva testy. Kolmogorovův-Smirnovův test má nejmenší sílu, ale jeví se vhodněji, protože oblast kterou prohlašuje za normální detailněji zobrazuje zkoumané jevy. Na základě normality dat lze rozeznat přibližně kruhový útvar uprostřed snímku, který pravděpodobně odpovídá keyhole. Vzhledem k použitému výkonu 1100 W a rychlosti 50 mm·s⁻¹ v tomto konkrétním případě její výskyt nastává. Dalším viditelným znakem je srpek nalevo od svarové dutiny. Laserový svazek se pohybuje směrem doleva, tudíž se jedná o náběžnou hranu svarové lázně. Tento srpek má různou velikost, někdy úplně chybí nebo se z něj stane celá kružnice, ale pokud se objeví, tak je vždy na náběžné hraně. Keyhole lze na základě hodnocení normality poměrně dobře poznat na všech zkoušených materiálech. Přičemž pro oceli se více osvědčil Kolmogorovův-Smirnovův test a pro hliníkové slitiny Jarqueův-Beryho test.

6.3. VIZUALIZACE POMOCÍ PARAMETRŮ A KOEFICIENTŮ NORMÁLNÍHO ROZDĚLENÍ

Obrázek 6.9 ukazuje spočítané mapy normality z po sobě jdoucích oken pomocí p-hodnot Kolmogorovova-Smirnovova testu. Zřetelný útvar, který velikostně odpovídá keyhole se mění a není ideálně kruhový. Normalita je nejsilnější na obvodu a ve středu keyhole. Kdežto ve svarové lázni obklopující keyhole a na šikmých stěnách je nulová hypotéza zamítána. Tato vlastnost je použitelná pro odhad polohy vrcholu keyhole. Pomocí testů normality je tedy možné poměrně spolehlivě určit tvar keyhole. Nevýhodou může být, že některé testy normality jsou výpočetně náročnější.



Obrázek 6.9: P-hodnoty pro Kolmogorovův-Smirnovův test normality při svaru uhlíkové oceli, výkon laseru 700 W a rychlost $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

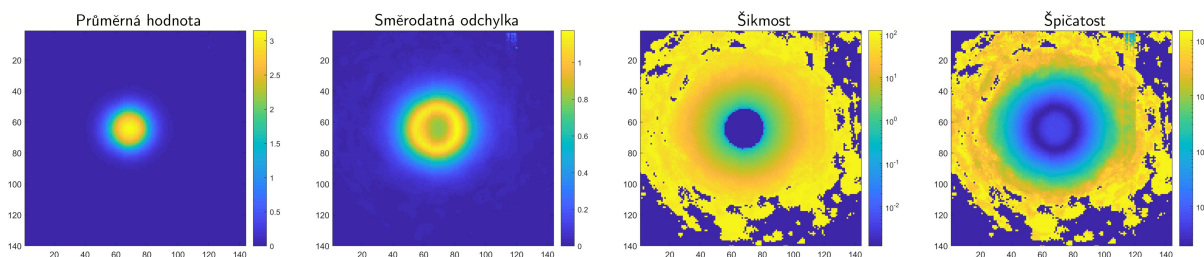
Přínosné bude zhodnotit, zda výsledky výrazně závisí na velikosti okna. Byly zkoušeny velikosti okna $n = 10, \dots, 2000$. Příliš nízké velikosti výběrů mají tendenci zobrazovat oblast větší než velikost svarové dutiny a naopak větší velikosti okna způsobují, že se začíná ztrácet zřetelný obrys svarové dutiny. Pro velké hodnoty výběru přibližně nad $n = 1000$ pak normalitu zamítáme ve většině případů. Rozumná velikost okna se tedy zdá být $n = 60, \dots, 300$, což odpovídá časové délce okna 0,02 - 0,1 ms.

6.3. Vizualizace pomocí parametrů a koeficientů normálního rozdělení

Myšlenku hodnocení procesu, na základě toho z jakého rozdělení pravděpodobnosti pocházejí měřené intenzity, lze ještě dále rozvinout. Pokud známe rozdělení intenzity, je možné odhadovat parametry tohoto rozdělení. Již z provedených map normality je patrné, že v některých bodech je normalita silnější než v jiných. Je tedy důvodné se domnívat, že by se mohly také lišit parametry v tomto případě normálního rozdělení pravděpodobnosti. Změny odhadu střední hodnoty integrální intenzity již byly pozorovány při vyhodnocování měření fotodiodami.

Parametry normálního rozdělení jsou střední hodnota a rozptyl, respektive směrodatná odchylka. Lze spočítat také koeficienty šikmosti a špičatosti, které lépe popíší tvar rozdělení. Obrázek 6.10 zobrazuje tyto parametry a koeficienty spočítané z jednoho celého svaru za stabilních podmínek. Zaniknou sice detaily jako jednotlivé odlesky, ale zobrazí se místa se systematickou hodnotou. V případě odhadu střední hodnoty, tj. průměrné hodnoty, jsou zobrazena místa se systematicky vysokou hodnotou. Ta se nalézá uvnitř keyhole blízko osy laserového svazku a představuje u penetračního svařování spodní část keyhole. Podobně lze vizualizovat také místa s největšími změnami, a to pomocí směrodatné odchylky. Nejvyšší hodnoty při penetračním svařování jsou převážně na okraji keyhole, občas se zvýšená variabilita intenzity vyskytuje i ve spodní části keyhole. Průměr světlého mezikruží, tj. keyhole, je 804 px, což odpovídá 0,4 mm. Tato hodnota je v souladu s průměrem

keyhole odhadovaným ze snímků v podkapitole 6.1. Koeficienty šikmosti a špičatosti typicky nabývají nejvyšších hodnot v oblasti svarové lázně mimo keyhole, zatímco uvnitř keyhole jsou nejnižší. Vyšší hodnoty koeficientů šikmosti a špičatosti lze chápat jako indikátor míst, která i po transformaci mají mírně odlišné rozdělení od normálního.



Obrázek 6.10: Hodnoty parametrů a koeficientů normálního rozdělení při svařování hliníku, výkon laseru 1900 W a rychlost 10 mm·s⁻¹.

Výsledky lze interpretovat tak, že transformovaná intenzita laserového záření vycházející z keyhole poměrně dobře odpovídá normálnímu rozdělení pravděpodobnosti, tudíž je možné popisovat proces statisticky. Zatímco v okolí keyhole dochází k odleskům méně často a distribuční funkce, potažmo histogram, je výrazně vychýlen doleva směrem k nulovým hodnotám. Skutečnost, že každá část procesu pochází z jiného rozdělení pravděpodobnosti komplikuje snímání svařovacího procesu pouze fotodiodou, protože může dojít ke smíchání intenzit z různých částí a snížení informační hodnoty zaznamenaných dat.

Intenzity z jednotlivých pixelů tedy pocházejí z různých rozdělení pravděpodobnosti. Správné by bylo přistupovat ke každému pixelu zvlášť, hledat jeho distribuční funkci a případně transformaci na vhodnější tvar. Avšak tento přístup je výpočetně náročný v průběhu. Proto jsem se, s ohledem na možné nasazení této metody sledování procesu v jeho průběhu, rozhodl provádět globální transformaci na přibližně normální rozdělení pravděpodobnosti uvnitř keyhole. Sice se dopouštím nepřesností v oblasti svarové lázně, ale keyhole jakožto místo interakce materiálu s laserem má rozhodující vliv na kvalitu výsledného svaru. I přes přibližnou transformaci pochází intenzita měřená uvnitř keyhole z normálního rozdělení.

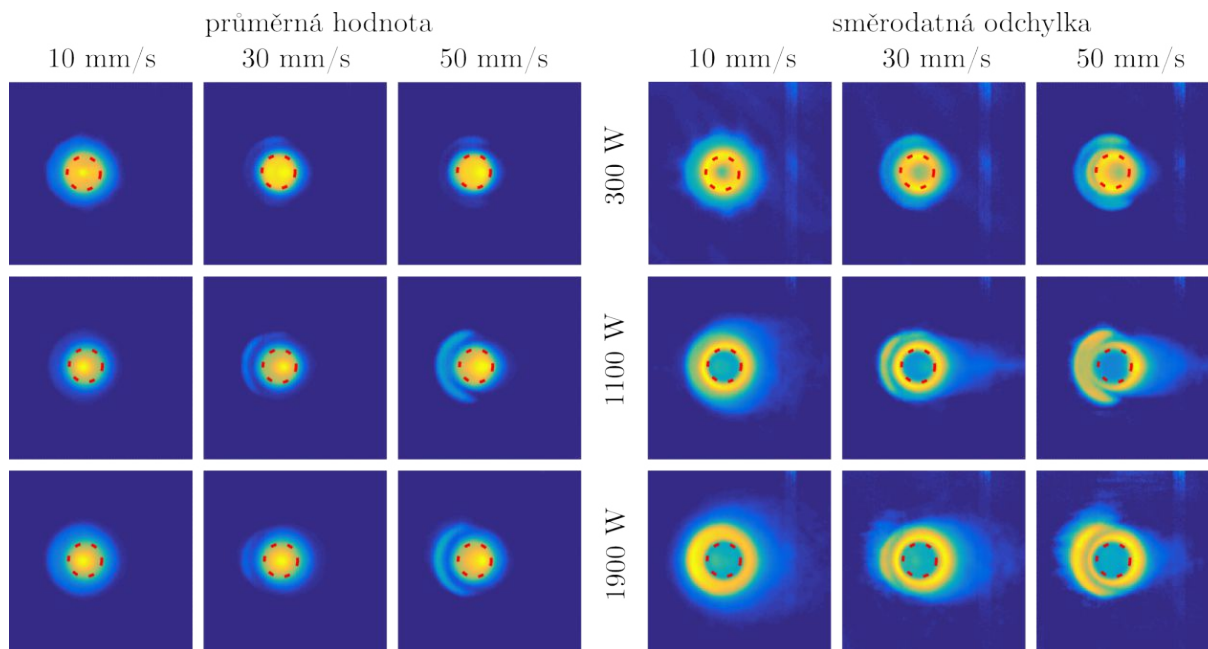
6.3.1. Vztah statistických hodnot intenzity a geometrie svaru

Metoda sledování procesu založená na odhadu parametrů normálního rozdělení se jeví jako slibná, proto je rozvíjena dále. Bylo provedeno několik svarů do uhlíkové oceli tloušťky 10 mm při různých rychlostech a výkonech. Takto dostatečnou tloušťkou byly zajištěny stejné podmínky v tom smyslu, že kořen svaru nebyl u žádného svaru otevřený a okolo svaru byl dostatek základního materiálu pro odvod tepla ve všech směrech a nemohl nastávat případ 2D nebo 2.5D vedení tepla. Pro každou ze svařovací rychlosti 10, 30 a 50 mm·s⁻¹ byly vyzkoušeny výkony laseru 300, 700, 1100, 1500 a 1900 W. Zvolené parametry pokrývají indukční, penetrační i přechodný režim svařování. Ohnisko laserového svaru bylo 1 mm pod povrchem materiálu a svar krytý argonovou ochrannou atmosférou.

Souhrnně výsledky popisuje obrázek 6.11, který zobrazuje mapu průměrných hodnot a směrodatných odchylek pixelů kamery. Z prostorových důvodů nejsou vykresleny všechny použité svařovací parametry, ale pouze jejich podmnožina zachycující podstatu. Zpracované snímky pro nízký výkon 300 W jsou zřetelně odlišné, jedná se o indukční

6.3. VIZUALIZACE POMOCÍ PARAMETRŮ A KOEFICIENTŮ NORMÁLNÍHO ROZDĚLENÍ

režim svařování. Červenou přerušovanou čarou je vyznačena velikost laserového svazku o průměru 400 μm . Oblast s největší směrodatnou odchylkou vyznačuje mezikruží shodného průměru. Uvnitř se nachází oblast s menší směrodatnou odchylkou, hodnoty intenzity se v tomto místě mění méně. Oblast menší směrodatné odchylky se stejně tak jako oblast maximální průměrné intenzity posouvá s rostoucí rychlostí posuvu mimo osu.



Obrázek 6.11: Průměrná hodnota a směrodatná odchylka odrazů z keyhole pro různé výkony laseru a svařovací rychlosti.

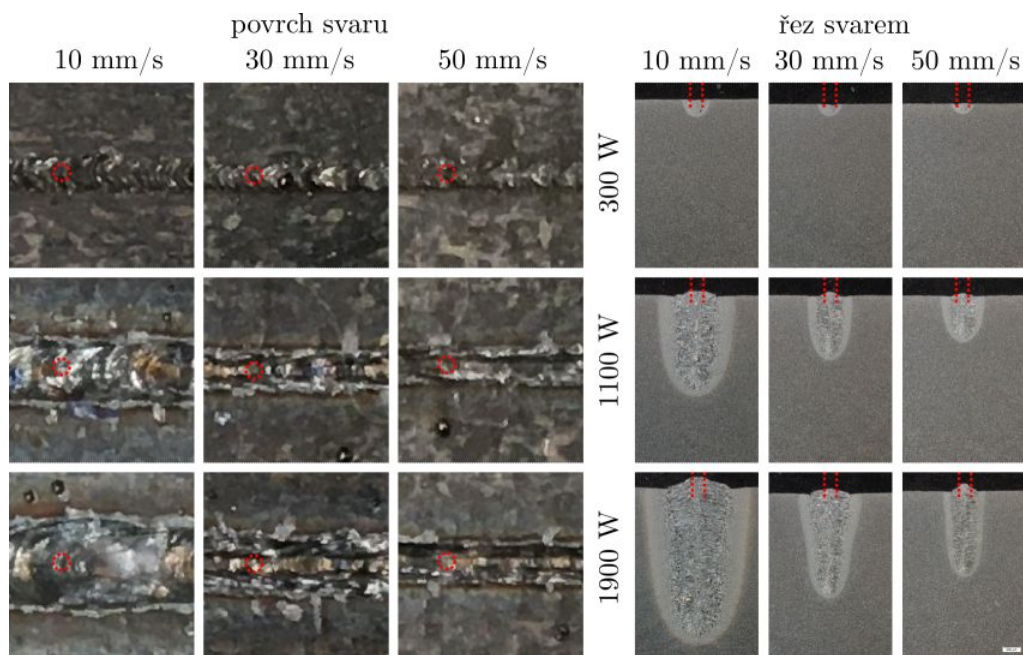
Od hodnoty výkonu 1100 W dochází k penetračnímu režimu svařování a s rostoucí rychlostí lze také pozorovat posun maximální průměrné hodnoty intenzity mimo osu proti vektoru svařovací rychlosti. Směr svařování na obrázcích je směrem doleva. V tomto případě maximální průměrná intenzita odpovídá pravděpodobně spodní části keyhole. Tedy je pozorovatelné zahnutí keyhole, které se s rostoucí rychlostí zvětšuje. Pokud se spodek keyhole posune dále než poloměr ústí keyhole, stává se méně ostrým a při vyšších rychlostech přestává být vidět úplně. Toto chování odpovídá geometrické představě šavlovitého zahnutí keyhole a detailněji může být podpořeno simulacemi šíření paprsků. Snímky získané z průměrných hodnot jsou si velmi podobné, pouze při vyšších rychlostech je pozorovatelný světlý srpek v přední části. Srpek se vyskytuje dominantněji při vyšších rychlostech svařování. Pravděpodobně se jedná o odraz laseru od čelní hladiny svarové lázně. Při nižších rychlostech není pozorovatelný, protože vlivem vedení tepla je svarová lázeň větší a náběžná hrana se nachází mimo zorné pole kamery. Podle polohy srpku je možné určit směr svařování.

Na snímcích získaných ze směrodatných odchylek je vidět zřetelný rozdíl při penetračním režimu svařování oproti kondukčnímu. Směrodatná odchylka se tedy v ohledu rozlišení keyhole zdá být lepší než průměrná hodnota. Mezikruží s vyššími hodnotami směrodatné odchylky se nachází vně laserového svazku, což potvrzuje hypotézu, že se jedná o horní hranici keyhole, kde se intenzivně pohybují vlny roztaveného kovu svarové lázně. Uvnitř laserového svazku je oblast s menší variabilitou, která odpovídá keyhole. Ze snímků směrodatných odchylek bude možné přesněji odhadovat průměr keyhole, če-

muž se budu také podrobněji věnovat. Na většině zpracovaných snímků je také k vidění malá oblast se zvýšenou variabilitou uvnitř keyhole na stejných místech jako je maximální průměrná intenzita.

Když se nově zjištěné poznatky na základě statistických parametrů dají dohromady, vychází, že horní průměr keyhole je ohraničen intenzivními a měnícími se záblesky. Okraj keyhole má velkou směrodatnou odchylku a nízkou průměrnou hodnotu, protože jsou záblesky krátké a relativně málo četné. Strmé stěny keyhole mají na druhou stranu malou směrodatnou odchylku. Spodní strana keyhole (vrchol zakřiveného kuželu) má nejvyšší průměrnou hodnotu intenzity a mírně vyšší směrodatnou odchylku. Poloha spodní strany keyhole je závislá na svařovací rychlosti.

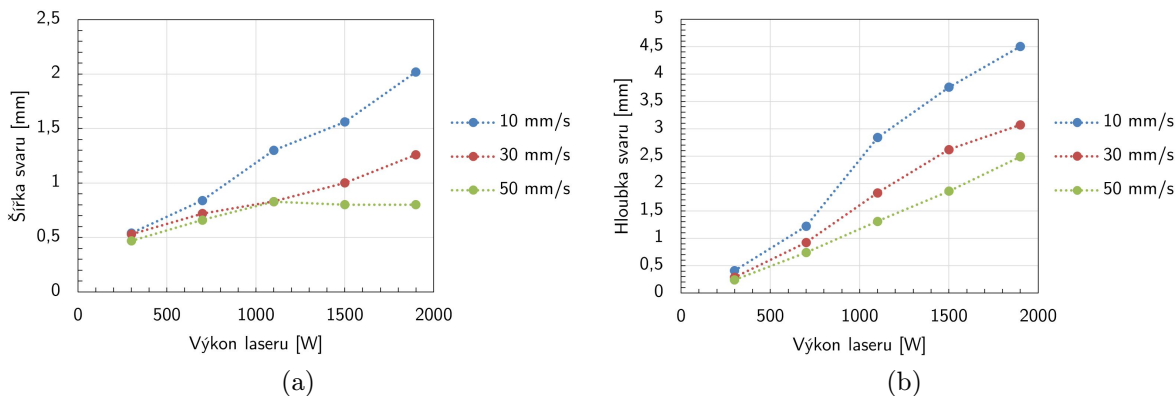
Pro lepší interpretaci pozorovaných výsledků byly zhotoveny snímky povrchů a metalografické výbrusy zobrazené na obrázku 6.12 a porovnány s velikostí laserového svazku. Všechny provedené svary byly vždy širší než laserový svazek a to i pro kondukční režim, viz graf 6.13a, kde jsou navíc vyznačeny i hodnoty pro výkon 700 a 1500 W. Šířka svaru závisí při nižších rychlostech lineárně na výkonu. Při vyšších rychlostech existuje hranice výkonu nad kterou se šířka svaru nezvětšuje. Zato při nízké rychlosti $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a vysokých výkonech šířka svaru nadměrně roste. Graf 6.13b ukazuje, že hloubka svaru závisí na výkonu přibližně lineárně.



Obrázek 6.12: Povrch svaru a metalografický výbrus svaru pro různé výkony laseru a svařovací rychlosti.

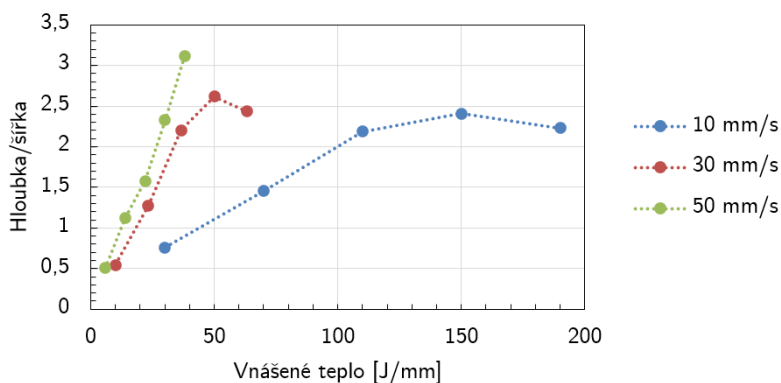
Obecně platné závislosti geometrie svaru na laserových parametrech popsané grafy 6.13 lze souhrnně překreslit do grafu 6.14 závislosti poměru hloubky a šířky svaru na vnášeném teple. Stejně vnášené teplo totiž neznamená stejnou geometrii výsledného svaru a je zde prostor pro diagnostickou metodu, která pozná rozdíly. Z navrženého grafu je mnohem patrnější skutečnost, která se dala vydedukovat z předešlých grafů a sice, že vysoká svařovací rychlost pomáhá dosahovat svarů s vysokou štíhlostí. Vysoká štíhlost svaru je jedna z předností laserového svařování a je dobré tuto vlastnost využívat naplno. Zdá se, že pro každou svařovací rychlost existuje hranice vnášeného tepla od které se štíhlost svaru nezvyšuje. Při těchto poklesech přestává mít tvar povrchu svarové lázně

6.3. VIZUALIZACE POMOCÍ PARAMETRŮ A KOEFICIENTŮ NORMÁLNÍHO ROZDĚLENÍ



Obrázek 6.13: Závislost (a) šířky a (b) hloubky svaru na výkonu laseru při různých rychlostech. Červeně vyznačen laserový svazek.

popsaný směrodatnou odchylkou na obrázku 6.11 výhodný eliptický až kapkovitý tvar se zřetelným srpkem na náběžné hraně. Svarová lázeň se stává větší a více kruhová. Vhodně zpracovaný záznam koaxiální kamerou během svařovacího procesu by tedy mohl sloužit jako indikátor zda při zvolené svařovací rychlosti již není vnášeno příliš mnoho tepla. Přebytek vnášeného tepla může vyústit až ve svarovou vadu, například pórovitost svaru.



Obrázek 6.14: Závislost poměru hloubky a šířky svaru na vnášeném teple při různých svařovacích rychlostech.

Sledování zpětně odraženého laserového záření pomocí kamery a jeho následný popis pomocí parametrů normálního rozdělení byly následně několikrát zopakovány a rozšířeny. Kromě konstrukční uhlíkové oceli 1.0577 byly provedeny experimenty i na korozivzdorné austenitické oceli 1.4301 a slitině hliníku 3.3547. Snímky při svařování korozivzdorné oceli vypadají velmi podobně jako výše popisované, pouze není přítomen srpek s vyšší variabilitou na náběžné hraně a zdá se, že k čistě penetračnímu režimu dochází až při vyšších výkonech. Toto chování může být způsobeno vyšší viskozitou taveniny korozivzdorné oceli oproti běžné konstrukční uhlíkové.

Naopak snímky při svařování hliníku byly méně ostré a obsahovaly méně detailů, protože hliník má taveninu výrazně nižší viskozity a svarová lázeň se tudíž chová více dynamicky. Také celková intenzita odraženého laseru při svařování hliníkové slitiny byla vyšší a proto musel být přidán šedý filtr NDUV10B s optickou hustotou $OD = 1$. Taktéž z důvodu velké reflexivity hliníku na dané vlnové délce nebylo možné započít spolehlivě svar pro výkon nižší než 1500 W a z tohoto důvodu nemohly být zkoumány rozdíly u kondukce-

ního a přechodného režimu. Nicméně v případě penetračního režimu je mezikruží s vyšší hodnotou směrodatné odchylky ohraničující průměr keyhole zřetelně viditelné. Takto odhadnutý průměr keyhole vychází při stejných procesních parametrech u hliníkové slitiny menší než u zkoumaných ocelích.

Rychlost svařování byla zvyšována až k $70 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ což je pro běžné svařování vysoká rychlost. Jasný bod na spodní straně keyhole již nebyl viditelný nebo jen částečně. Keyhole tedy byla zakřivena až za její poloměr. Změna se projeví poklesem celkové průměrné intenzity a je tudíž detekovatelná i za pomoci koaxiálně připevněné fotodiody. Vysoká svařovací rychlost vede ke štíhlejšímu svarům a pomáhá snižovat vnášené teplo. Zpracované snímky penetračního svařovacího režimu při vyšších svařovacích rychlostech jsou také zřetelnější, pravděpodobně z důvodu menšího objemu taveniny a tudíž menší možnosti tvorby kmitů svarové lázně.

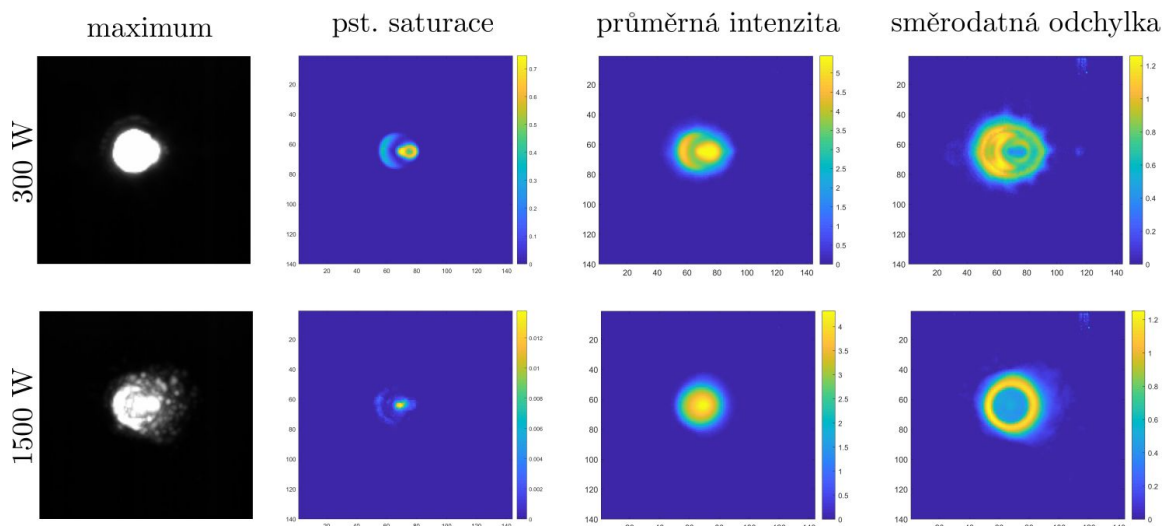
6.4. Vizualizace na základě saturovaných pixelů

Při koaxiálním sledování zpětně odraženého laserového záření z místa svařování se často v obraze objevují saturované pixely. Je to důsledek vysoké intenzity dopadajícího laserového záření, respektive malého dynamického rozsahu použité kamery. Četnost počtu saturovaných pixelů závisí na nastavení kamery a optické sestavě, převážně na použitých šedých filtrech. Při použití šedých filtrů s nízkou optickou hustotou nebo delších expozičních časech kamery roste počet saturovaných pixelů a tedy dochází ke ztrátě informace nad hodnotou saturace. Na druhou stranu při použití šedých filtrů s vysokou optickou hustotou nebo při nastavení krátkých expozičních časů jsou vidět detaily v oblastech s nejvyšší intenzitou za cenu toho, že oblasti s nízkou intenzitou jsou pod hranicí detekce.

Saturované hodnoty mohou negativně ovlivňovat výpočet odhadu statistických parametrů, tyto následně nemusejí odpovídat pozorování. Navrženým řešením, které vede ke zlepšení je rozdělit snímek na dva. Jeden bez saturovaných hodnot a druhý tvořen čitě saturovanými pixely. Dvoubitové masky nesoucí informaci zda byla v daném místě dosažena hodnota saturace či nikoliv však nemusí být chápány jako odpadní produkt. Pro každý pixel lze spočítat empirickou pravděpodobnost, tj. četnost, výskytu saturované hodnoty intenzity v průběhu svařovacího procesu. Tímto způsobem lze statisticky zpracovat i saturované pixely a vytěžit informaci i v případě malého dynamického rozsahu kamery nebo při nevhodně nastavených parametrech kamery.

Obrázek 6.15 ilustruje situaci svařování korozivzdorné oceli při rychlosti $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ s výkony 300 W (kondukční režim) a 1500 W (penetrační režim). Při pohledu na maximální hodnotu jednotlivých pixelů snímků z hodnoceného úseku svaru je zřejmé ve kterých bodech došlo alespoň jednou k saturaci intenzity. Oba svařovací režimy lze odlišit již na základě maximální hodnoty, zjevně je však zahozena například informace o četnosti jejího výskytu. Četnosti výskytu saturované hodnoty lze vhodněji přepočítat na pravděpodobnost výskytu saturovaného pixelu. Tím se eliminuje závislost na velikosti výběru, byť samozřejmě s rostoucí velikostí výběru je odhad pravděpodobnosti přesnější. Z výsledků vyplývá, že při kondukčním režimu svařování je pravděpodobnost výskytu intenzivních odrazů vyšší a to v tomto případě až kolem 70 % oproti pravděpodobnosti pod 1,5 % při penetračním režimu. Při penetračním režimu svařování je nejpravděpodobnější, že dojde k intenzivnímu odrazu ve spodní části keyhole. Pro nižší svařovací rychlosti je tato oblast větší, což může poukazovat na zvětšující se průměr keyhole ve spodní části. Z předchá-

6.4. VIZUALIZACE NA ZÁKLADĚ SATUROVANÝCH PIXELŮ



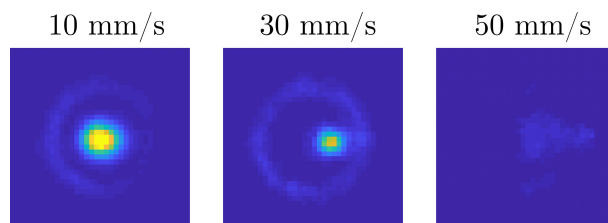
Obrázek 6.15: Maximum, pravděpodobnost výskytu saturace, průměrná hodnota intenzity a směrodatná hodnota intenzity pro indukční a penetrační režim při svařování korozivzdorné oceli.

zející podkapitoly 6.3 vyplynulo, že se s nižší rychlostí zvětšuje také horní ústí keyhole (horní průměr). Rozměry keyhole je obtížné měřit přímými metodami, ale domněnku o větší keyhole pro nižší rychlosti podporuje také větší šířka svaru. U obou režimů je větší pravděpodobnost intenzivního odrazu ve přední části keyhole, resp. svarové misky pro indukční režim, než ze zadní části.

Výpočet pravděpodobnosti výskytu odrazu určité intenzity nemusí být omezen pouze na hodnotu saturace, ale lze ji rozšířit na libovolnou prahovou hodnotu. Další výhodou takového přístupu je, že by na detekci teoreticky stačil pouze plošný detektor s dvoubitovým rozsahem. Nevýhodou pak je, že kvalita obrazu klesá s klesajícím počtem snímků a mírou saturace.

V případě indukčního režimu popisuje pravděpodobnost výskytu satureného pixelu svařovací proces velmi podobně jako průměrná intenzita. Zobrazuje však detaily, které na mapě průměrné intenzity nejsou vidět. V případě penetračního režimu je shodně zachycena poloha spodní části keyhole všemi třemi statistickými metodami zpracování, avšak pouze pravděpodobnost výskytu saturace odhalí zvýšené odrazy v přední části keyhole.

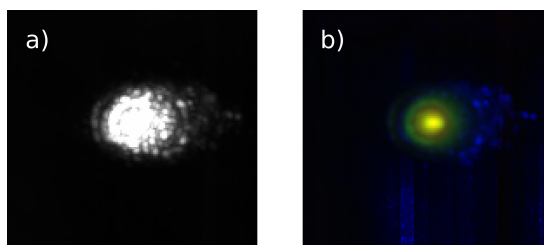
Na pravděpodobnostních mapách 6.16 je na detailu keyhole velmi zřetelně pozorovatelné její zakřivení způsobené narůstající rychlostí 10, 30 a 50 mm·s⁻¹ při výkonu 1100 W. Spodní část keyhole se posouvá až za hranici průměru jejího ústí. Okamžik zakřivení keyhole za hranici jejího průměru je odhalen pomocí analýzy saturace lépe než pomocí průměrné intenzity.



Obrázek 6.16: Vliv rychlosti na polohu spodní části keyhole. Detail na pravděpodobnost výskytu saturace intenzity.

6.5. Využití výsledků

V předešlých podkapitolách se podařilo na základě statistických metod zrekonstruovat a separovat odražené laserové záření pocházející z různých oblastí svarové lázně. Jednotlivé snímky totiž většinu obsahují pouze lokální odrazy a získání globálního pohledu na svařovací proces, například jednoduchou operací maxima přes určitý počet snímků není dostatečné, jak ukazuje obrázek 6.17a.



Obrázek 6.17: a) Maximum, b) složený snímek z průměrné hodnoty intenzity (r-kanál), směrodatné odchyly (g-kanál) a šikmosti (b-kanál).

Nicméně, když se ze stejných snímků spočítá průměrná hodnota, směrodatná odchylnka a koeficient šikmosti a tyto se zobrazí v jednotlivých barevných kanálech rgb obrazu, je daleko zřetelněji rozlišitelná keyhole od části povrchu svarové lázně.

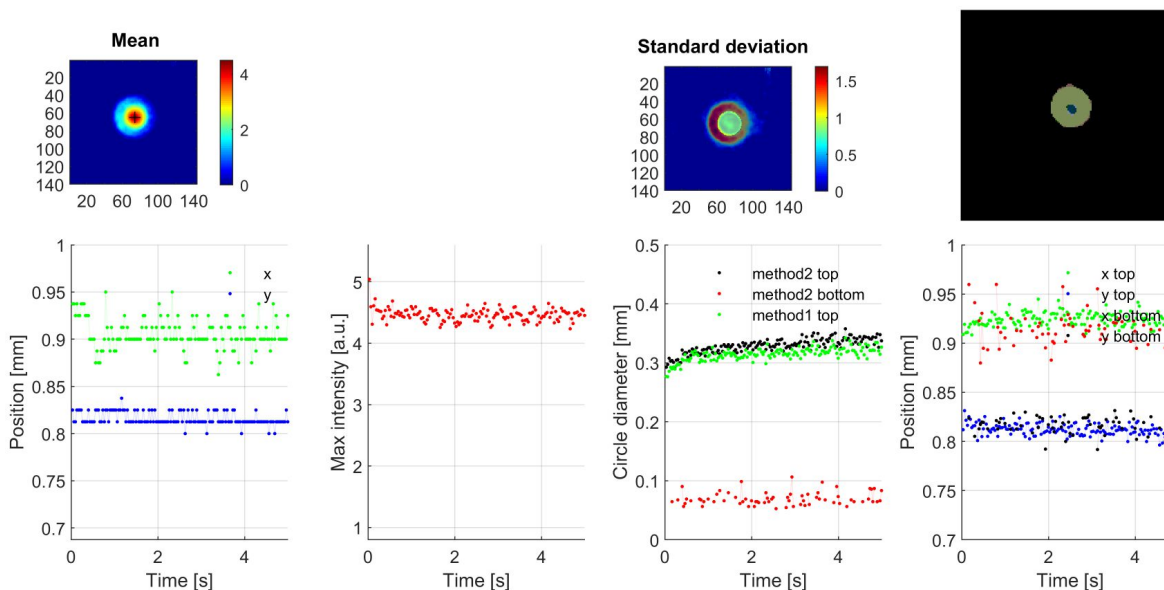
6.5.1. Průběžné sledování svařovacího procesu

Dosavadní snahy odhadnout rozměry keyhole získané zpracováním obrazových dat vypadají nadějně, proto bude dále ověřena možnost sledování v téměř reálném čase. Použita jsou zaznamenaná data, na kterých bude prováděno offline zpracování. Zpracováním výše popsány metodami po krátkých časových úsecích (oknech) a následnou aplikací základních metod strojového vidění jako je prahování a užití morfologických operátorů je možné extrahovat odhad průměru a polohy keyhole. Jelikož algoritmy budou zaměřeny na určování rozměru keyhole, předpokládá se užití pouze na penetrační svařovací režim. Při jiných režimech svařování mohou být výsledky nesprávné nebo mít jinou interpretaci.

Grafy 6.18 zobrazují průběžně sledované veličiny. Nejsnazší je sledovat nejvyšší průměrnou intenzitu a zaznamenávat její polohu s pixelovou přesností, tj. s přesností 12,5 μm . Poloha maximální průměrné intenzity v ose y (příčný směr ke směru svařování) se příliš nemění, zatímco poloha v ose x (ve směru svařování) se mění přibližně 2 krát více, přesněji o $\pm 50 \mu\text{m}$. Hodnota maximální průměrné intenzity se většinou pravidelně nemění, ale v tomto konkrétním případě lze pozorovat pravidelnější změny maximální intenzity. Díky použitému oknu o délce 100 snímků klesá frekvence vykreslování sledovaných veličin na 30 Hz a z tohoto důvodu nelze hodnotit zda byly pozorovány teoreticky předpovězené i nepřímo pozorované oscilace keyhole, které by se mohly projevit buď zmíněnou fluktuací intenzity nebo přímo změnou průměru keyhole.

Právě změnu průměru keyhole má za cíl sledovat další graf. Algoritmus hledá kruhové útvary v obrazu variability procesu a zaznamenává zjištěné průměry a polohy a to jak průměr ústí keyhole (horní průměr), tak spodní průměr. Horní průměr je menší průměr mezikruží vyšší směrodatné odchyly. Za spodní průměr je považováno místo s větší směrodatnou odchylkou nacházející se uvnitř horního průměru. Spodní průměr není vždy rozlišitelný, bývá zřetelný převážně u vyšších výkonů laseru. Algoritmus (metoda) měření

6.5. VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ



Obrázek 6.18: Ukázka průběhu sledovaných veličin - polohy maximální průměrné intenzity, hodnoty maximální průměrné intenzity, odhadu průměru keyhole a poloha keyhole při výkonu 1900 W a rychlosti $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

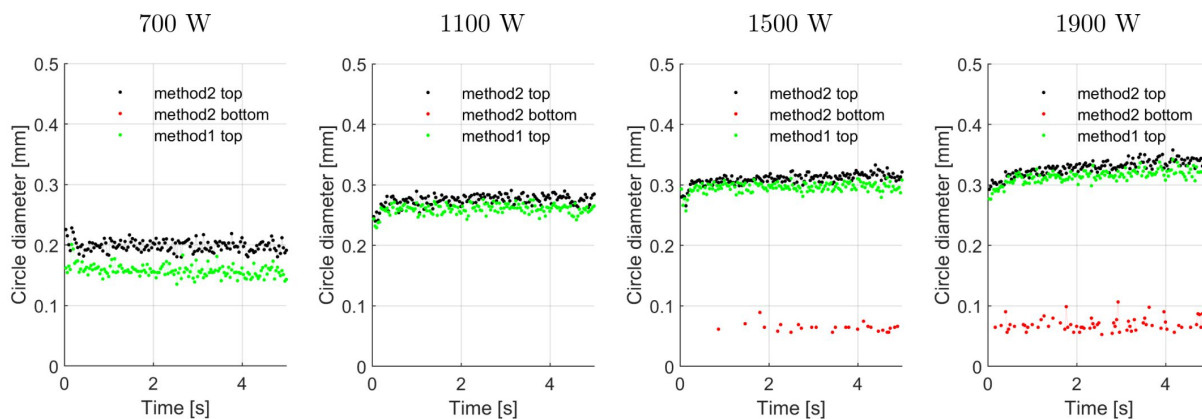
rozměrů keyhole je stále předmětem vývoje. Nejprve bylo zkoušeno prahování spolu s morfologickými operátory dilatace a eroze. V zájmu větší stability odhadů bylo upuštěno od obecného tvaru a pomocí kruhové Houghovy transformace jsou vyhledávány kružnice určitých parametrů. Z nalezené kruhové plochy je pak vypočten její průměr a poloha středu se subpixelovou přesností.

Existuje ještě prostor pro zlepšení metod hledání tvaru keyhole ze snímků průměrné intenzity a směrodatné odchylky. Především na zlepšení segmentace nekruhové keyhole se kterou se sice podařilo dosahovat dobrých výsledků pro většinu snímků, ale bylo vždy nutné upravit parametry segmentace podle konkrétního materiálu a nastavení měřicí sestavy. Po věnování většího úsilí vizuální kontrole segmentovaných tvarů bylo možné spolehlivě měřit zvláště délku a šířku keyhole. Podle dosud provedených předběžných vyhodnocení má keyhole či svarová miska tendenci být oválně protažená při vyšších rychlostech. Detekce protažení by také mohla předcházet vadám převážně při svařování tenkých plechů. Spolu s dosažením vyšší snímkovací frekvence je tu i potenciál pro pozorování kmitů horního průměru (ústí) keyhole.

Postupný nárůst horního průměru keyhole pozorovatelný na začátku svaru lze vysvětlit jednak postupným vznikem a prohlubováním keyhole a také mírnou změnou kvality svazku, hlavně jeho polohy a zvětšováním jeho průměru v pase až o $40 \mu\text{m}$ která byla zjištěna bezkontaktním profilometrem, viz graf 4.2. Poloha místa s maximální průměrnou intenzitou přibližně kopíruje polohu spodního průměru keyhole. Avšak výhodou odhadu polohy spodního průměru keyhole je lepší rozlišení dané subpixelovým výpočtem polohy.

Poloha horního a spodního průměru keyhole v ose y je prakticky totožná, keyhole tedy není vychylována ani nalevo ani napravo od směru svařování. Podél směru svařování (v ose x) je situace jiná a spodní část keyhole mění neustále svoji polohu v rozmezí $0,1 \text{ mm}$ oproti horní části keyhole.

V již popisovaných výsledcích bylo prezentováno, že průměr keyhole závisí na výkonu laseru. Tato závislost je pozorovatelná i na grafech 6.19. S rostoucím výkonem roste odhadovaný průměr keyhole. Při výkonu laseru 700 W svařování probíhá v přechodném režimu, kdy keyhole není plně vyvinuta. Přesto je možné na základě směrodatné odchylky intenzity zpětně odraženého laserového záření odhadovat její průměr. Různé metody odhadu dávají odlišné výsledky, ale i toto je uspokojivý výsledek, protože primárně byly metody výpočtu optimalizovány na použití při penetračním režimu svařování a tam se shodují lépe. Bohužel není k dispozici skutečná hodnota průměru keyhole se kterou by bylo možno porovnat dosažené výsledky, nicméně porovnání výsledků mezi sebou nic nebrání.



Obrázek 6.19: Změna průměru keyhole při svařování uhlíkové oceli rychlosti $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ s různými výkony.

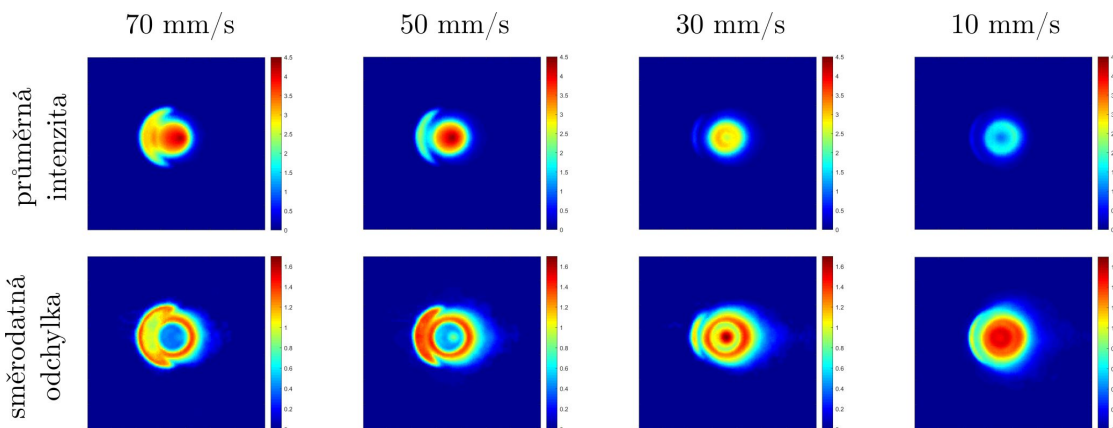
S rostoucím výkonem narůstá průměr keyhole v čase. Původ tohoto jevu je opět ve změnách parametrů laserového svazku v čase vlivem zahřívání optiky. Ve zde zobrazených krátkých úsecích je možné považovat změny průměru keyhole za přibližně lineární a tvrdit, že se s výkonem zvětšuje směrnice proložené přímky, tj s rostoucím výkonem se průměr keyhole zvětšuje rychleji. Po delší době se parametry svazku ustálí na konstantní hodnotě, stejně tak jako průměr keyhole. Změny polohy ohniska ve výškové ose z již byly detekovatelné pomocí koaxiálně umístěné fotodiody snímající zpětně odražené laserové záření 5.16, avšak analýzou kamerových snímků zaznamenávajících tutéž veličinu je možné změny v poloze ohniska detekovat přes změny průměru keyhole poněkud příměji.

Kombinací více přístupů sledování procesu je možné dosáhnout větší robustnosti, jak ukazují práce jiných autorů v úvodní analýze problematiky. I zde se osvědčilo odhadovat průměry a polohy keyhole více způsoby a z porovnání odhadů mezi sebou udělat lepší úsudek o svařovacím procesu.

Při výkonu 1100 W si lze ve zjednodušení představit keyhole jako kuželovou dutinu. S rostoucím výkonem laseru bylo také možné pozorovat spodní průměr keyhole. Při nadbytku výkonu se z vrcholu pravděpodobně stává ploška a idealizovaná keyhole tvarem připomíná komolý kužel. V kombinaci s grafem 6.14, který popisuje závislost štíhlosti svaru na vnášeném teple, je systematické rozšíření keyhole ve spodní části potenciálně nežádoucí jev. Při zvětšujícím se vnášeném teple nad určitou mez se štíhlost svaru začíná zmenšovat. Hloubka svaru roste pomaleji a šířka naopak rychleji, což může být chápáno jako degradace laserového spoje a potenciálně vést k defektům.

6.5.2. Detekce kořene svaru

Pojem spodní průměr keyhole dostává smysluplnější obrys při svařování plechů. Častým kritériem hodnocení jakosti svaru bývá přítomnost kořene svaru. Pro vznik kořene nemusí být keyhole otevřená skrz a kořen svaru může vzniknout pouze vedením tepla. Takový stav je však méně stabilní, jelikož v průběhu svařování hloubka svaru mírně kolísá. Běžnějším případem je dole otevřená keyhole. Tím pádem se přímo nabízí hovořit o horním a spodním průměru keyhole. Při příliš velkém objemu taveniny dochází k propadení kořene svaru. Případně může docházet i rozstříku taveniny a tím nedostatku svarového kovu ve svaru. Sledování průběhu svařování by v tomto případě mohlo být prospěšné.

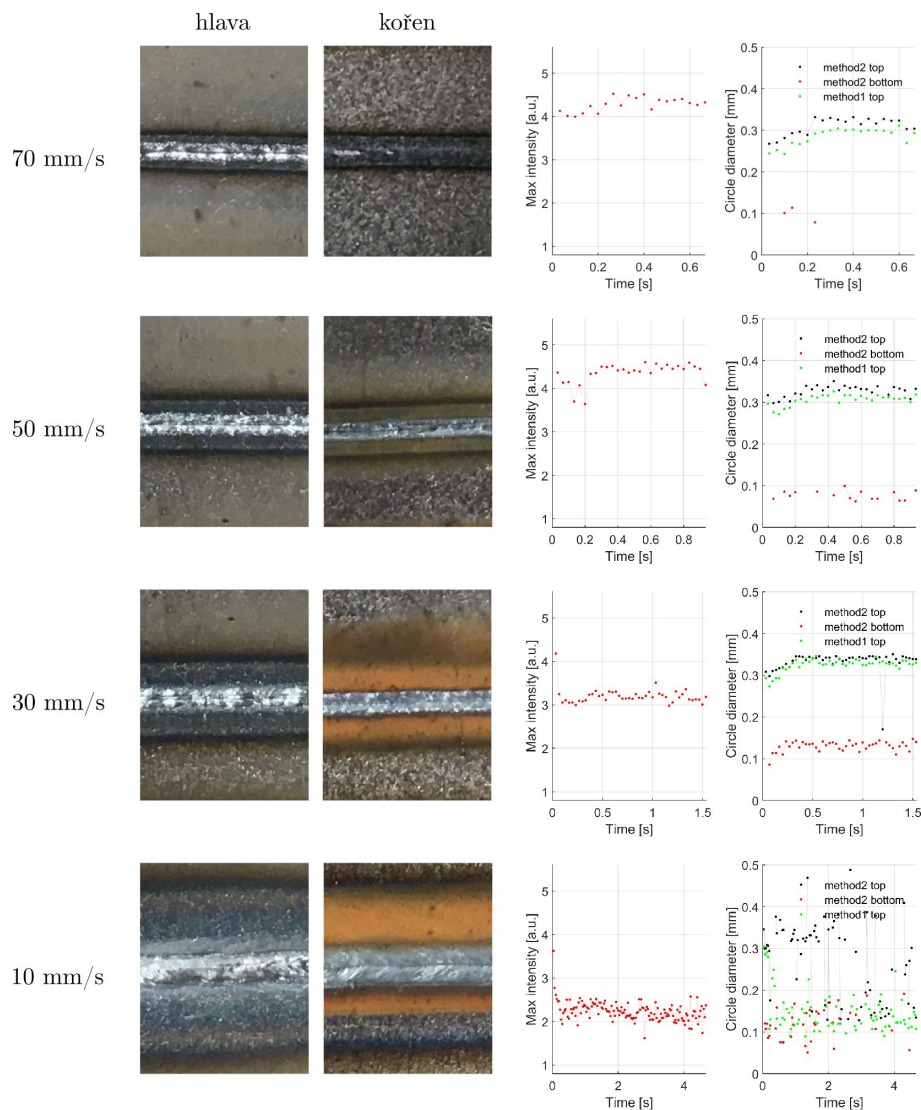


Obrázek 6.20: Sledování stavu kořene svaru. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka intenzity při svařování ocelového plechu.

S cílem prověřit možnost detekce průvaru či neprůvaru bylo provedeno několik svarů na plechu uhlíkové oceli tloušťky 2 mm. Tato tloušťka byla zvolena protože na ni lze jednoduše demonstrovat několik mechanismů tvorby kořene svaru. Výkon laseru je ve zde prezentovaných případech nastaven na 1500 W a variována je pouze rychlost. Poměrně snadno rozpoznatelný je neprůvar, tedy stav kdy kořen svaru není viditelný a hloubka svaru je zaručeně menší než 2 mm. Neprůvar nastal při posuvné rychlosti $70 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Zpracované snímky intenzity vracejícího se laserového záření při svařovacích rychlostech 70, 50, 30 a $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ jsou zobrazeny na obrázku 6.20. Při všech rychlostech od $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ níže došlo k plnému průvaru, ale na základě analýzy intenzity jsou mezi nimi rozdíly. S klesající rychlostí klesá odražená intenzita a roste směrodatná odchylka v oblasti keyhole.

Při rostoucím vnášeném teple, tj. zvyšujícím se výkonu nebo klesající rychlosti, dochází ke zvětšování hloubky svarové lázně až do limitu tloušťky plechu. Při dosažení limitu už svarová lázeň nemůže dosáhnout větší hloubky, vedení tepla ji pouze rozšiřuje. Avšak keyhole má ještě malý prostor k růstu při kterém penetruje povrch svarové lázně v kořenové části. Situaci lze dokladovat na průbězích maximálních intenzit a odhadech průměrů keyhole spolu s povrchy svarů na obrázku 6.21.

Od rychlosti $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ je pozorovatelný kořen svaru a zároveň také odhad spodního průměru keyhole. Pro rychlost $70 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ není viditelný souvislý kořen a také vychází nulový odhad spodního průměru keyhole. Naopak při rychlosti $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ roste odhad horního i spodního průměru keyhole. Navíc je keyhole otevřena prakticky kontinuálně na rozdíl od rychlosti $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, kdy se keyhole ve spodní části otevírá a zavírá. Při příliš nízké rychlosti $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, resp. příliš velkém vnášeném teple, je chování keyhole a sva-



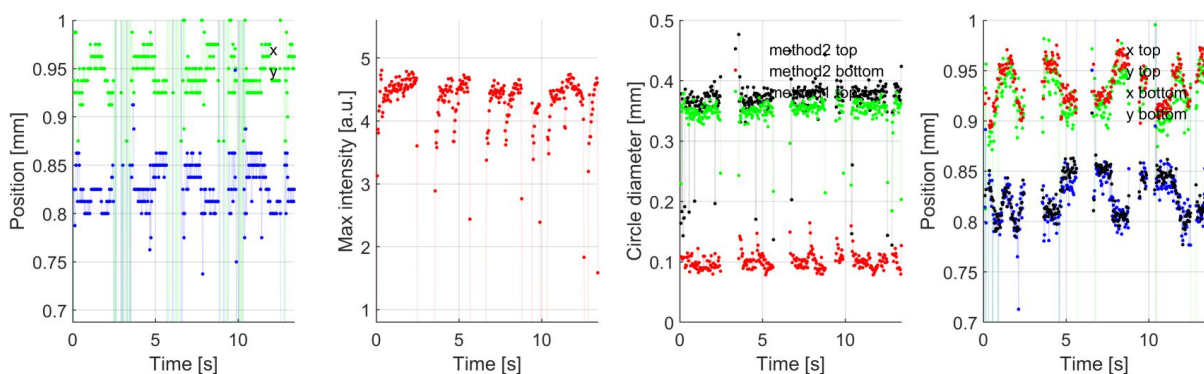
Obrázek 6.21: Klasifikace průvaru na základě maximální průměrné intenzity a odhadu průměru keyhole pro uhlíkovou ocel tloušťky 2 mm a výkon 1500 W.

rové lázně příliš dynamické a používaný algoritmus nedokáže velikost keyhole spolehlivě odhadovat. S pohyby ve spodní části keyhole souvisí také pozorovaný nárůst směrodatné odchylky intenzity. Otvírající se keyhole je také velmi dobře poznat na intenzitě. Čím je keyhole ve spodní části otevřenější, tím více laserového záření projde skrz a méně se má možnost odrazit zpátky. Existenci a velikost keyhole lze hodnotit také na základě přítomnosti oxidů u kořene svaru, protože kořen není krytý ochrannou argonovou atmosférou. Plazma a kovové páry unikají se zvětšujícím se spodním průměrem keyhole postupně více spodní kořenovou částí keyhole. Následně na vzduchu zoxidují a ulpí na spodní straně svařovaného plechu.

Přínos této metody je tedy v tom, že lze nedestruktivně zjišťovat stav kořene při svařování plechů a to zejména v případě kdy kořen není vlivem geometrie dílu viditelný. Zvýšení snímkovací frekvence kamery by pomohlo se záznamem rychlých dějů a vyšší rozlišení nebo nasazení nových metod strojového učení by mohlo zlepšit kvalitu segmentace obrazu.

6.5.3. Sledování obecných svarů

Dosud byl popisován pouze případ lineárního svaru, v praxi se však provádějí často svary obecných tvarů. Na obrázku 6.22 je vyhodnocený záznam z koaxiální kamery, která snímá odražené laserové záření. Záznam pochází z několika tvarových svarů na dílu z uhlíkové oceli tloušťky 2 mm. Při použitých procesních parametrech 2000 W a $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ dochází k plnému průvaru materiálu s otevřenou keyhole v kořenové části. Na grafu odhadu průměru keyhole je skutečně detekován jak horní, tak spodní průměr keyhole. V oblastech s chybějícími daty došlo k přerušení svaru, přejezdu a započetí dalšího svaru. Přejezdy mezi svary jsou v podobě chybějících odhadů patrné na všech čtyřech chybějících charakteristikách. Nejzajímavější charakteristikou je odhad polohy keyhole na němž jsou zřetelně vidět změny polohy keyhole o více než $50 \mu\text{m}$.



Obrázek 6.22: Odhady intenzity, průměru a polohy keyhole při svařování dílu s několika tvarovými svary.

7. Závěr

Nejprve byly shrnuty teoretické poznatky týkající se principu a vnějších projevů laserového svařovacího procesu. Rešeršní část byla doplněna popisem aktuálního stavu laserových technologií se zaměřením na vývoj v laserových zdrojích. Pozornost byla věnována také trendům využívání laserových technologií v průmyslu, zvláště pak výčtu již používaných komerčních řešení pro sledování laserového svařování. Na základě rešerše byly jako nejvhodnější metody sledování procesu navrženy metody optické, které převažují i ve výzkumné sféře.

Dále byla popsána použitá experimentální sestava, materiály a důkladně proměřeny parametry laserového svazku. Největší pozornost byla věnována vlastnoručně navrženému a sestavenému optickému nástavci na svařovací hlavu, který umožňuje sledovat svařovací proces koaxiálně s laserovým svazkem. Díky pohodlnému přístupu k optickým komponentám a modularitě je optický nástavec velmi univerzální. Zde byl provozován na vlnové délce procesního laseru a jako detektor byla použita vysokorychlostní kamera. Také byly pro korektnost zavedeny užívané matematické metody zpracování naměřených dat.

Nejprve bylo rozvíjeno snímání boční fotodiodou s inovativním využitím frekvenční analýzy. Byly pozorovány projevy kmitů keyhole a bylo dosaženo částečných úspěchů jako například detekce mezery mezi svařovanými díly. Tento přístup však nedokázal vždy dát do souvislosti měřené charakteristiky s charakteristikami a vadami svaru. Pro lepší pochopení procesu bylo přistoupeno k měření více fotodiodami a boční kamerou. Po sériích měření vyšel jako vhodnější způsob snímat proces ve směru koaxiálně s laserovým svazkem.

Z provedených spektroskopických měření vyplývá, že při laserovém svařování je nejintenzivnější složkou vlnová délka laseru. Jelikož je laserové záření primární příčinou vzniku svaru, bylo další studium zaměřeno právě na něj. Přesněji na analýzu té části, která nebyla využita na užitečné tavení materiálu. Na základě intenzity záření odraženého a rozptýleného na vnitřní optické trase lze poznat výkon laseru. Při zafixování některých procesních parametrů lze také rozeznat změnu polohy ohniska a mezeru mezi svařovanými díly. Využití vestavěné bezpečnostní fotodiody pro snímání odraženého laserového záření má tu výhodu, že není nutná další investice do specializovaného hardware.

Pro přesnější vhled do procesu je zapotřebí nahradit fotodiodové senzory kamerou. Nejprve bylo ověřeno, že koaxiálně instalovaná kamera snímá stejné jevy jako koaxiálně umístěná fotodioda a zjištěné závislosti platné pro fotodiodu jsou platné též pro kameru. Jedinou nevýhodou je nižší snímkovací frekvence kamery.

Navržené statistické metody zpracování obrazových dat založené na hodnocení normality umožňují separovat části svarové lázně s odlišným chováním. Odhady střední hodnoty, směrodatné odchylky a koeficientů šikmosti a špičatosti byly dány do souvislosti s geometrií a rozměry keyhole, respektive svarové lázně.

Pomocí hodnocení normality dat a směrodatné odchylky lze určit velikost a polohu ústí keyhole. Při detailnější analýze lze poznat také velikost a polohu spodní části keyhole. Z jejich relativní polohy lze odhadnout směr svařování a zakřivení keyhole. Byla pozorována změna zakřivení keyhole v závislosti na svařovací rychlosti. Pomocí maximální průměrné intenzity lze sledovat otevírání a zavírání keyhole v kořeni svaru při svařování plechů.

Svarové vady vzniklé příliš velkými tolerancemi svařovaných dílů byly detekovány jak frekvenční analýzou intenzity obláčku tak z průměrné hodnoty intenzity zpětně od-

raženého laserového záření snímaného koaxiálně. Robustnost detekce může být zvýšena kombinací obou přístupů.

Navrženou metodou snímání a odhadu parametrů keyhole lze statisticky porovnat jednotlivé svary konstantních parametrů nebo kontinuálním vyhodnocováním charakteristik keyhole sledovat její vývoj. Konstrukce optického nástavce a použité vyhodnocovací metody tvoří základ pro sledování a popis dynamiky laserového svařovacího procesu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] VÁZQUEZ, R.G., KOCH H.M., OTTO, A. 2014. Multi-physical Simulation of Laser Welding. In: *Physics Procedia*. 56, p. 1334-1342.
- [2] KLEIN, T., VICANEK, M., SIMON, G. Forced oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1996, 29(2), 322-332. ISSN 0022-3727. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3727/29/2/008
- [3] REINHEIMER, Eveline N., Florian FETZER, Rudolf WEBER a Thomas GRAF. Benefit of high feed rates on the process efficiency in laser beam welding. *Procedia CIRP*. 2020, 94, 718-721. ISSN 22128271.
- [4] KAŠPAR, J., NĚMEČEK, S., SLOSAREK, V. Laserové svařování - posouzení vlivu ochranného plynu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014, 2014(1,2) [cit. 2021-10-3]. ISSN 1212-2572.
- [5] KATAYAMA, S., KAWAHITO, Y., MIZUTANI, M. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects. *Physics Procedia*. 2010, 5, 9-17. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2010.08.024
- [6] SHCHEGLOV, P. Yu., GUMENYUK A. V., GORNUSHKIN, I. B., et. al. Vapor-plasma plume investigation during high-power fiber laser welding. *Laser Physics*. 2013, 23(1). ISSN 1054-660X. Dostupné z: doi:10.1088/1054-660X/23/1/016001
- [7] KLEIN, T., VICANEK, M., KROOS J., DECKER, I., SIMON, G. Oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1994, 27(10), 2023-2030. ISSN 0022-3727. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3727/27/10/006
- [8] BAUTZE, T., KOGEL-HOLLACHER, M. Keyhole Depth is just a Distance. *Laser Technik Journal*. 2014, 11(4), 39-43. ISSN 16137728. Dostupné z: doi:10.1002/latj.201400040
- [9] SCHINDHELM, D., WEBER, R., a GRAF, T. Spatial analysis of the back reflected laser light during CO₂-laser cutting of metal sheets. *Journal of Laser Applications* [online]. 2013, 25(1). ISSN 1042-346X. Dostupné z: doi:10.2351/1.4765818
- [10] MIYAMOTO, I. Laser welding of glass. *Handbook of Laser Welding Technologies*. Elsevier, 2013, s. 301-331. ISBN 9780857092649.
- [11] MOGLIA, F., RASPA, A. New Trends in Laser Beam Welding. *PhotonicsViews* [online]. 2020, 17(5), 26-29 [cit. 2021-10-2]. ISSN 2626-1294. Dostupné z: doi:10.1002/phvs.202070508
- [12] JIANG, M., TAO, W., CHEN, Y. Laser Welding under Vacuum: A Review. *Applied Sciences*. 2017, 7(9). ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app7090909
- [13] REISGEN, U., OLSCHOK S., JAKOBS, S., TURNER, C. Laser beam welding under vacuum of high grade materials. *JWelding in the World*. 2016, 60(3), 403-413 [cit. 2021-10-3]. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/s40194-016-0302-3

- [14] WANG, L., MOHAMMADPOUR, M., GAO, X., et. al. Adjustable Ring Mode (ARM) laser welding of stainless steels. *Optics and Lasers in Engineering*. 2021, 137. ISSN 01438166. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlaseng.2020.106360
- [15] PRIETO, C., VAAMONDE, E., DIEGO-VALLEJO, D. et. al. Dynamic laser beam shaping for laser aluminium welding in e-mobility applications. *Procedia CIRP*. 2020, 94, 596-600. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2020.09.084
- [16] ERIKSSON, I., NORMAN, P., KAPLAN, A. Basic study of photodiode signals from laser welding emissions. In: *12th NOLAMP proceeding 2009: Nordic Laser Materials Processing Conference*. 24th - 26th August 2009 in Copenhagen. Kgs. Lyngby: ATV-SEMAPP.
- [17] MITTELSTÄND, C., MATTULAT, T., SEEFELD, T., KOGEL-HOLLACHER, M. "Novel approach for weld depth determination using optical coherence tomography measurement in laser deep penetration welding of aluminum and steel," *J. Laser Appl.* 31, 22007 (2019).
- [18] *Plasmo* [online]. 8. September 2021 [accessed. 2. October 2021]. Retrieved z: <https://www.plasmo.eu/>
- [19] *NIT Laser Welding Monitoring System - niteurope* [online]. [accessed. 2. October 2021]. Retrieved z: http://niteurope.com/wp-content/uploads/2015/11/NIT_Laser-Welding-Monitoring-System.pdf
- [20] MATSUNAWA, A., KIM, J.D., SETO, N., MIZUTANI, M., KATAYAMA, S. Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding, *Journal of Laser Applications*, 10 (1998), pp. 247-254
- [21] KIM H., NAM, K., KIM, Y. KI, H. Analysis of laser-beam absorptance and keyhole behavior during laser keyhole welding of aluminum alloy using a deep-learning-based monitoring system, *Journal of Manufacturing Processes*, 80 (2022), pp. 75-86
- [22] LEVICHEV, N., COSTA RODRIGUEZ, G., VORKOV, V., DUFLOU, J.R. Coaxial camera-based monitoring of fiber laser cutting of thick plates. *Optics and Laser Technology*, 136/2021, 106743.
- [23] KNAAK, C., KRÖGER, M., SCHULZE, F., ABELS, P., GILLNER, A. Deep Learning and Conventional Machine Learning for Image-Based in-Situ Fault Detection During Laser Welding: A Comparative Study. 2021.
- [24] KIM H., NAM, K., OH, S., KI, H. Deep-learning-based real-time monitoring of full-penetration laser keyhole welding by using the synchronized coaxial observation method, *Journal of Manufacturing Processes*, 68 (2021), pp. 1018-1030
- [25] SAEED, G., ZHANG, Y.M. 2007, *Measurement Science and Technology*, 18, 2570. doi:10.1088/0957-0233/18/8/033
- [26] DILGER, P., FORSTER, C., KLEIN, E., BURGER, S., ESCHNER, E., SCHMIDT, M.J. Determination of the beam position in laser deep penetration welding using coaxially acquired images of the keyhole front and machine learning. 2021.

- [27] SEIBOLD, M., SCHRICKER, K., BERGMANN, J. P., et. al. Characterization of optical spectrum in laser beam welding of dissimilar aluminum-copper joints and time-dependent correlation to process stages. In: *Photonics and Education in Measurement Science 2019*. SPIE, 2019, 2019-9-17, s. 50. ISBN 9781510629813. Dostupné z: doi:10.1117/12.2533476
- [28] ZOU, J., XIAO, R., HUANG, T., et. al. Plume temperature diagnosis with the continuous spectrum and Wien's displacement law during high power fiber laser welding. *Laser Physics*. 2014, 24(10). ISSN 1054-660X. Dostupné z: doi:10.1088/1054-660X/24/10/106007
- [29] Laser Power Meter - Beam Analysis - Ophir Laser Measurement [online]. Dostupné z: <https://www.ophiropt.com/laser-measurement/sites/default/files/BeamWatch.pdf>
- [30] CARRASCO-CASADO, A., MATA-CALVO, R. Space Optical Links for Communication Networks. MUKHERJEE, Biswanath, Ioannis TOMKOS, Massimo TORNA-TORE, Peter WINZER a Yongli ZHAO, ed. *Springer Handbook of Optical Networks*. Cham: Springer International Publishing, 2020, 2020, s. 1057-1103. Springer Handbooks. ISBN 978-3-030-16249-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-16250-4_34
- [31] Materiálové normy. Feron a [online]. [cit. 2022-07-26]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/materialove-normy/>
- [32] ČSN EN 10025-2. Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli. Účinnost od 1.12.2020. Praha: Český normalizační institut, 2020. 40 s.
- [33] Materiálové normy. Bolzano [online]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/charakteristika-skupin-korozivzdornych-oceli>
- [34] ČSN EN 10088-2. Korozivzdorné oceli - Část 2: Technické dodací podmínky pro plechy a pásy z ocelí odolných korozi pro obecné použití. Účinnost od 1.4.2015. Praha: Český normalizační institut, 2015. 60 s.
- [35] ČSN EN 573-3. Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 3: Chemické složení a druhy výrobků. Účinnost od 1.2.2020. Praha: Český normalizační institut, 2020. 36 s.
- [36] MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to statistical quality control. 6th ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2009, 734 p. ISBN 978-047-0169-926.
- [37] HORNÍK, P. Matematické modely způsobilosti procesu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 65 s. Vedoucí Ing. Josef Bednář, Ph.D.
- [38] NEUBAUER, J., SEDLAČÍK, M., KŘÍŽ, O. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 236 s. ISBN 978-80-247-4273-1.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [39] ANDĚL, J. *Základy matematické statistiky*. Praha: Matfyzpress, 2011, 360 s. ISBN 978-80-7378-162-0.
- [40] ANDĚL, J. *Statistické metody*. Vyd. 3. Praha: Matfyzpress, 2003, 299 s. ISBN 80-867-3208-8.
- [41] RYAN, T.A., JOINER, B.L. *Normal Probability Plots and Tests for Normality*. 1976.
- [42] SHAPIRO, S.S., a FRANCIA, R.S. An Approximate Analysis of Variance Test for Normality. *Journal of the American Statistical Association*, 67(337), 215–216. (1972).
- [43] BERA, A.K., JARQUE C.M. A test of normality of observations and regression residuals. *International Statistical Review* 55/1987 s. 163-172.
- [44] RAZALI, N.M., WAH, Y.B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. 2011.
- [45] CHANTASORN, U. Efficiency Comparisons of Normality Test Using Statistical Packages. *Thammasat International Journal of Science and Technology*, 16/2011, 9-25.
- [46] BOX, George E. *Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building*. New York: John Wiley & Sons, 1978, 653 s. ISBN 0-471-09315-7.
- [47] FARNUM, R.N., “Using Johnson Curves to Describe Non-Normal Data”, *Quality Engineering*, 9 (2), 329- 336, (1996-97).
- [48] MRŇA, L., HORNÍK P. Autocorrelation Function for Monitoring the Gap between The Steel Plates During Laser Welding. *Physics Procedia*. 2016, 83, 1223-1232. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2016.08.129
- [49] HAUKE, J., KOSSOWSKI, T., Comparison of values of Pearson’s and Spearman’s correlation coefficient on the same sets of data. *Quaestiones Geographicae* 30(2), Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań 2011, pp. 87–93, 3 figs, 1 table. DOI 10.2478/v10117-011-0021-1, ISBN 978-83-62662-62-3, ISSN 0137-477X.

Seznam použitých zkratek a symbolů

a_3	výběrový koeficient šikmosti
A_3	nestranný odhad koeficientu šikmosti
a_4	výběrový koeficient špičatosti
A_4	nestranný odhad koeficientu špičatosti
ACF	autokorelační funkce
AR	antireflexní vrstva
argsinh	argument hyperbolického sinu
CS	uhlíková ocel
F	teoretická distribuční funkce
F_e	empirická distribuční funkce
FFT	rychlá Fourierova transformace
Ge	germanium
g_{ij}	hodnoty jasů obrazu
H_A	alternativní hypotéza
H_0	nulová hypotéza
IDM	In-process Depth Meter
InGaAs	indium-galium-arsenid
ln	přirozený logaritmus
LWM	Laser Welding Monitor
OCT	optická koherentní tomografie
OD	optická hustota
s	výběrová směrodatná odchylka
s^2	výběrový rozptyl
Si	křemík
SS	korozivzdorná ocel
STFT	krátkodobá Fourierova transformace
u_i	kvantil normovaného normálního rozdělení
\bar{x}	výběrový průměr
α	hladina významnosti

Seznam vlastních publikací

HORNÍK, P., ŠEBESTOVÁ, H., NOVOTNÝ J., MRŇA, L. Laser beam oscillation strategy for weld geometry variation. In: *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, vol. 84, 216-222. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.016>.

BUCHTÍK, M., HASOŇOVÁ, M., **HORNÍK, P.**, BŘEZINA, M., DOSKOČIL, L., MÁŠILKO, J., MRŇA, L., FILIPENSKÝ, J., et. al. Influence of laser remelting on the microstructure and corrosion behavior of HVOF-sprayed Fe-based coatings on magnesium alloy. In: *Materials Characterization*. 2022, vol. 194. ISSN 1044-5803. E-ISSN 1873-4189. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112343>

HORNÍK, P., ŠEBESTOVÁ, H., NOVOTNÝ, J., MRŇA, L. Visualization of laser back-reflection distribution during laser welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1135(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1135/1/012015>

ŠEBESTOVÁ, H., **HORNÍK, P.**, MIKMEKOVÁ, Š., MRŇA, L., DOLEŽAL, P., NOVOTNÝ, J. Microstructural Characterization of Laser Weld of Hot-Stamped Al-Si Coated 22MnB5 and Modification of Weld Properties by Hybrid Welding. *Materials*. vol. 14, no. 14, 2021. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/14/3943>

ŠEBESTOVÁ, H., **HORNÍK, P.**, MRŇA, L., JAMBOR, M., HORNÍK, V., POKORNÝ, P., HUTAŘ, P., AMBROŽ, O., DOLEŽAL, P. (2020). Fatigue properties of laser and hybrid laser-TIG welds of thermo-mechanically rolled steels. *Materials Science and Engineering: A*, 772. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138780>

HORNÍK, P., MRŇA, L., ŠEBESTOVÁ, H. Correlation between camera image and photodiode signal during laser welding. In: *Lasers in Manufacturing 2019*. München: WLT, 2019.

MRŇA, L., ŘIHÁČEK, J., ŠARBORT, M., **HORNÍK, P.** Solar Absorber with a Structured Surface – A Way to Increase Efficiency. *Acta Polytechnica*, 2019, 59(2), 134-143. <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0134>

HORNÍK, P., ŠARBORT, M., ŠEBESTOVÁ, H., MRŇA, L. Study of the influence of focal position on back-reflected radiation during deep penetration laser welding and its simulation. In: *Optics and Measurement International Conference 2019*. Proceedings of SPIE. Vol. 11385. Bellingham: SPIE, 2019, č. článku 1138505. ISBN 9781510635470. ISSN 0277-786X. Dostupné z: doi: 10.1117/12.2542806.

ŠEBESTOVÁ, H., **HORNÍK, P.**, MRŇA, L., DOLEŽAL, P., MIKMEKOVÁ, E. The Effect of Arc Current on Microstructure and Mechanical Properties of Hybrid Laser-TIG Welds of High-Strength Low-Alloy Steels. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018, 49(6), 3559-3569. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1385-6>

ŘIHÁČEK, J., ŠARBORT, M., **HORNÍK, P.**, MRŇA, L. Solar Absorbers with a Structured Surface. *MM Science Journal*, 2018(02), 2390-2396. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2018.06_2017102

MRŇA, L., **HORNÍK, P.**, JEDLIČKA, P., PAVELKA, J. Study of laser wobbling welding process through the radiation of plasma plume. In: *Lasers in Manufacturing 2017*. München: WLT, 2017.

MRŇA, L., **HORNÍK, P.**, KUBÍČEK, J. New Methods for Monitoring Laser Welding Process in the Manufacture of Solar Absorbers. *MM Science Journal*, 2016(05), 1376-1381. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016.11_2016125

HORNÍK, P., MRŇA, L., PAVELKA, J. Possibilities in optical monitoring of laser welding process. In: *Optics and Measurement International Conference 2016 (Proceedings of SPIE 10151)*. Bellingham: SPIE, 2016, 1015110:1-6. ISSN 0277-786X. Dostupné z: [doi: 10.1117/12.2257234](https://doi.org/10.1117/12.2257234)

MRŇA, L., **HORNÍK, P.** Autocorrelation Function for Monitoring the Gap between The Steel Plates During Laser Welding. *Physics Procedia*. 2016, 83(3), 1223-1232. ISSN 1875-3892. Dostupné z: [doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.129](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.129)