

## OPONENTNÍ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

<b>Autor práce:</b>	Ing. Petr Horník
<b>Téma práce:</b>	Výzkum dynamiky laserového svařovacího procesu
<b>Studijní obor:</b>	Strojírenská technologie
<b>Školitel:</b>	doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
<b>Pracoviště:</b>	Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství Ústav strojírenské technologie
<b>Oponent:</b>	doc. Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.
<b>Pracoviště oponenta:</b>	Technická univerzita v Liberci Fakulta strojní Katedra výrobních systémů a automatizace

Předložená disertační práce se věnuje moderním laserovým metodám svařování, resp. metodám sledování laserového svařovacího procesu pomocí bezkontaktních metod a nástrojů pro rozpoznání obrazu. Jedním z cílů práce je zmapovat možnosti detekce stavu svařovacího procesu s využitím optických metod a na základě poznatků navrhnout inovativní řešení využitelné v průmyslové praxi. V práci je rozvíjena metoda hodnocení kvality svaru pomocí fotodiody připojené k procesní hlavě, je zde kladen důraz na frekvenční analýzu naměřené intenzity. Těžiště práce pak spočívá v návrhu a otestování inovativního řešení detekce zpětně odraženého laserového záření pomocí vysokorychlostní kamery.

### Aktuálnost tématu

Technologie laserového svařování je moderní technika, která našla široké uplatnění v nejrůznějších průmyslových aplikacích, a s rostoucími nároky na kvalitu svarů je stále více preferováno automatizované svařování. Průmysl 4.0 přináší nové požadavky na implementaci sledování svařovacího procesu a zajištění konzistentních výsledků. V tomto kontextu je nezbytné vyvinout metody, které umožní efektivní a spolehlivé sledování chování paroplynového kanálu, tzv. keyhole, který je klíčový pro výslednou kvalitu svaru. Přímé pozorování keyhole během procesu svařování je obtížné, a proto se často používají nepřímé metody, zejména bezkontaktní optické metody.



Tato disertační práce se zabývá právě tímto tématem a přináší inovativní přístup k detekci zpětně odraženého laserového záření pomocí kamery. S ohledem na aktuální trendy v průmyslu a potřebu optimalizace procesů je tedy téma této disertační práce relevantní a přináší nový přínos v oblasti sledování laserového svařování.

### **Splnění stanovených cílů**

V rámci této disertační práce byly dle mého názoru stanovené cíle úspěšně splněny. Práce se zaměřila na rozvoj metod sledování laserového svařovacího procesu s důrazem na chování paroplynového kanálu. Byly navrženy a implementovány inovativní optické metody sledování. Bylo provedeno mnoho experimentů, přičemž hlavní pozornost byla směřována k návrhu a implementaci nástavce, který umožňoval koaxiální sledování svařovacího procesu pomocí vysokorychlostní kamery v reálném čase. Pro vyhodnocení byly aplikovány statistické metody a výsledky byly dány do logických souvislostí s procesními parametry a kvalitou samotného svaru.

### **Vhodnost použitých metod**

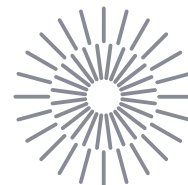
Použité metody jsou podrobně popsány v kapitole 4. Kromě již zmiňovaného experimentálního zařízení a navržených materiálů se zde autor podrobně věnuje metodám pro zpracování získaných dat. Jsou vysvětleny dále v práci použité matematické metody zpracování naměřených obrazových dat včetně statistického vyhodnocení (normálního rozdělení pravděpodobnosti, jeho parametrů a možnosti transformace), deskriptivní statistiky a segmentace obrazu pro extrakci relevantních charakteristik či frekvenční analýzy.

Použité statistické metody byly aplikovány k propojení výsledků s procesními parametry, geometrií a rozměry keyhole a kvalitou svaru. Získané výsledky naznačují, že navržené metody mohou přispět k efektivnějšímu sledování a analýze stavu svařovacího procesu, což potvrzuje jejich vhodnost. Konstrukce optického nástavce a použité vyhodnocovací metody tedy mohou být základem pro analýzu dynamiky svařovacího procesu.

### **Teoretický a praktický přínos práce**

Teoretický přínos spatřuji především v analýze současného stavu procesu laserového svařování, jeho principů a vnějších projevů laserového svařovacího procesu, včetně uvedení trendů pro sledování jeho kvality. Tato část sice není příliš obsáhlá, ale přesto plně postačující.

Těžiště práce je věnováno metodám, praktickým experimentům měření fotodiodovými senzory a kamerou a využití takto získaných dat. Praktický přínos práce spočívá dle mého názoru v několika klíčových aspektech. Prvním z nich je podrobný popis experimentálního sestavení, použitých materiálů a měření parametrů laserového svazku. Zvláštní pozornost byla věnována optickému nástavci, který byl navržen a sestaven tak, aby umožňoval koaxiální sledování svařovacího procesu pomocí



laserového svazku. Kromě toho byly stanoveny a definovány matematické metody pro zpracování naměřených dat, což zajišťuje korektnost výsledků a analýz. Praktický přínos disertační práce tak spočívá především v návrhu možného řešení pro nedestruktivní zjišťování stavu kořene při svařování plechů, zejména v případech, kdy není kořen viditelný z důvodu geometrie dílu.

### **Význam pro praxi a rozvoj vědního oboru**

Práce je bezesporu přínosná z pohledu teoretického i experimentálního a pokračováním výzkumu v dané oblasti dává potenciál dosáhnout budoucího využití těchto metod v praxi. V práci mi však chybí praktický dopad provedených měření. Jak je uvedeno v samém závěru práce, metoda tvoří základ pro sledování a popis dynamiky laserového svařovacího procesu. Není zde ale příliš diskutována konkrétní vazba a spojitost se svarovými vadami (viz také dotaz č. 3). S tím souvisí určitá výtky k závěru práce. Postrádám zobecnění výsledků výzkumu, např. jak nastavit procesní parametry procesu svařování na základě provedeného měření a výstupů.

Na druhou stranu navržené metody snímání a zpracování obrazových dat s největší pravděpodobností v budoucnu umožní efektivnější analýzu svařovacího procesu a jsou důležitým krokem směrem k automatické detekci vad svaru a korekci procesních parametrů. Tímto způsobem práce přispívá k zvyšování standardů a kvality při laserovém svařování. Vědní obor laserového svařování se tak díky této disertační práci obohacuje o nové poznatky, metody a přístupy, které posunují hranice poznání a otevírají nové možnosti pro další výzkum a aplikace.

### **Formální úprava a jazyková úroveň**

Postup při zpracování disertační práce formálně zahrnuje všechny potřebné prvky vědeckého výzkumu. Práce analyzuje současný stav techniky a stanovuje své vlastní cíle s ohledem na tento stav. Dosažení těchto cílů je postupně probíráno v rámci dílčích cílů, které jsou podpořeny reálnými experimenty. Po provedení těchto experimentů jsou jejich výsledky pečlivě zkoumány a podrobeny diskuzi, na základě čehož jsou formulovány závěry.

Po formální a jazykové stránce je práce na dobré úrovni. Občas se vyskytují drobné překlepy a gramatické chyby, především chybějící interpunkce ve větě. U obrázků občas chybí některé detaily, jako např. legenda na obr. 6.11. Postrádám číslování některých vzorců (např. str. 34 a dále). Chybí mi některé technické parametry použitých přístrojů (např. kamery – počet pixelů, clonové číslo, ohnisková vzdálenost atd.). S těmito parametry např. souvisí hloubka ostrosti kamery. Pak by možná byla zbytečná úvaha na str. 58: „... neostrost tedy vzniká buď vlivem malé hloubky ostrosti optického systému nebo ...“. Z důvodu lepší čitelnosti by bylo též přínosem, pokud by některé grafické výstupy měly větší velikost.



### Vyjádření k tezím

Teze disertační práce splňují všechny potřebné náležitosti jak po obsahové tak formální stránce. Doporučuji uvést abstrakt na začátku, nikoli na konci práce, a doplnit životopis o relevantní publikace autora.

### Dotazy

- 1) V kapitole 5.2 a 5.3 posuzujete horizontální a vertikální úhel mezi fotodiodami. Jaký závěr z daného měření vyplývá? Jaký úhel preferovat?
- 2) Str. 59 – nerozumím, jakým způsobem byla „obkreslena“ maska v grafickém editoru. Ručně? Nebyla určena automaticky dle prahové hodnoty intenzity?
- 3) Byla nějakým způsobem hodnocena kvalita svaru prakticky (mechanické zkoušky, výbrusy apod.)? Ve smyslu nalezení závislostí mezi „kvalitou“ svaru zjištěnou použitými optickým metodami a jeho skutečnými parametry.
- 4) Bylo by nějakým způsobem možné zvýšit dynamický rozsah snímání kamerou (kdy jeho malý rozsah byl uváděn jako jedno z negativ), aby byly dobře zachyceny jak pixely v oblastech s nejvyšší i nízkou intenzitou?
- 5) Neuvažoval jste - za jakých okolností by bylo možné využít strojového učení pro hodnocení kvality svaru?

### Závěr

Tato disertační práce se zabývá aktuálním tématem v oblasti laserového svařování a představuje nové poznatky a přístupy, které mají potenciál přispět k rozvoji tohoto vědního oboru. Její výsledky mají perspektivu využití v průmyslové praxi pro automatickou detekci vad svaru a korekci procesních parametrů, s cílem dosáhnout vysokých standardů při laserovém svařování. Práce obsahuje původní výsledky, je konzistentní a logicky strukturovaná, což svědčí o velmi dobrých znalostech autora v dané problematice. Doktorand svojí prací prokázal svou kompetentnost a schopnost úspěšně řešit téma disertační práce.

Na základě výše uvedeného hodnocení doporučuji disertační práci autora **Ing. Petra Horníka** k obhajobě a po její úspěšné obhajobě **doporučuji udělení akademického titulu Ph.D.**

V Liberci 26. 5. 2023

.....  
doc. Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.