

## Oponentský posudek disertační práce

Autor práce: Ing. Petr Horník  
Téma disertační práce: Výzkum dynamiky laserového svařovacího procesu  
Školitel: Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Předložená disertační práce se zabývá aktuální problematikou monitorování procesu laserového svařování. Za cíl si klade řešit v oblasti optického sledování svařovacího procesu, návrh inovativního řešení a jeho experimentální ověření.

Práce je členěna do sedmi kapitol. Po úvodní kapitole a kapitole definující cíle práce následuje analýza stavu řešené problematiky. Je představen proces laserového svařování a v současné době používané metody jeho sledování, a to jak v podobě průmyslových monitorovacích systémů pro detekci svařovacích vad, tak spíše vědeckých přístupů v laboratorních podmínkách.

Čtvrtá kapitola popisuje použitou experimentální sestavu a svařované materiály. Doktorand provedl měření parametrů laserového svazku pro dva různé výkony a prokázal, že se poloha ohniska i šířka pasu svazku stabilizují až po několika desítkách sekund provozu. Toto dílčí zjištění má velký praktický význam, neboť vzhledem k vysokým svařovacím rychlostem poukazuje na nutnost provádět dostatečně dlouhé experimentální svary, příp. změnu vlastností svazku kompenzovat. Součástí této kapitoly je i popis matematických metod použitých pro zpracování dat měřených fotodiodou a kamerou.

Pátá kapitola prezentuje výsledky četných měření fotodiodovými senzory. Byla provedena frekvenční a autokorelační analýza záznamů intenzity měřené boční širokospektrální fotodiodou při svařování různých ocelí a hodnocen vliv procesních parametrů. Tento přístup je inovativní a komerční monitorovací systémy jej dosud nevyužívají. Doktorand prokázal, že měřená intenzita a její původ významně závisí na polohování i citlivosti detektoru a jako nejvhodnější vyhodnotil koaxiální snímání. Dále bylo bezpečnostní fotodiodou integrovanou v laseru, tedy koaxiálně s laserovým svazkem, detekováno zpětně odražené laserového záření. Byla vyšetřena jeho závislost na výkonu svazku a poloze ohniska, a byl stanoven i příspěvek optických elementů svařovací hlavy. Doktorand prezentuje schopnost detekce svařovacích vad způsobených velkými tolerancemi natupo svařovaných plechů, a naopak zdrženlivě se staví ke vztahu měřené intenzity k hloubce svaru.

Doktorand navrhl a sestavil optický nástavec pro koaxiální monitorování keyhole a tavné lázně kamerou na vlnové délce pracovního laseru a v šesté kapitole uvádí výsledky provedených experimentů. Prokázal, že průběh integrální intenzity z jednotlivých snímků z kamery koreluje s průběhem intenzity měřeným integrovanou bezpečnostní fotodiodou. Ukazuje, že i přes relativně nízkou snímkovací frekvenci je díky vhodně navrženému statistickému zpracování možné stanovit polohu keyhole, průměr jejího ústí a při dostatečném výkonu i polohu a průměr jejího dna. Tyto charakteristiky jsou sledovány v závislosti na výkonu laseru a svařovací rychlosti a dány do souvislosti s rozměry svaru. Velmi nekonvenční i je vizualizace procesu svařování na základě pravděpodobnosti výskytu satureovaných pixelů, které umožňuje zobrazení více detailů než mapy průměrné intenzity a směrodatné odchylky.

Závěr poměrně stručně shrnuje obsah jednotlivých kapitol a dílčí výsledky.

Disertační práce má dobrou jazykovou i formální úroveň. Obsahuje původní experimentální výsledky, které byly publikovány v časopisech a konferenčních sbornících. Práce je pečlivě zpracována, jednotlivé kapitoly jsou uspořádány v logickém sledu na 85 stranách, včetně seznamu použité literatury (49 položek) a vlastních publikací (14 položek). Seznam použité literatury není příliš obsáhlý, ale jeví se jako reprezentativní.

K formální stránce mám pouze několik výtek. Např. na obrázku 5.1 nejsou vyznačeny úseky odpovídající jednotlivým výkonům. Některé obrázky by si zasloužily měřítko (6.16, 6.17), jiné škálu alespoň ve formě min/max (6.11). U některých grafů se legenda ztrácí v datech (6.18), případně jsou popisky příliš malým písmem (obrázek 3.4) nebo mají nečitelné měřítko (6.12). V popisících grafů a obrázků není jednotně použit český jazyk. Nicméně tyto drobné nedostatky nesnižují kvalitu předložené práce.

Teze disertační práce jsou zpracovány v rozsahu 37 stran. Mají předepsané členění a vhodně shrnují obsah disertační práce.

Postup dosažení vytýčených cílů je logický a vede k jejich naplnění. Těžiště disertace spočívá v experimentální práci. Doktorand prokázal dobrou orientaci v dané problematice, schopnost samostatné vědecké práce i hluboké znalosti statistického zpracování experimentálních dat. Díky inovativnímu přístupu ke zpracování měřených signálů dokázal detailně popsat chování keyhole při laserovém svařování za různých podmínek, a to s poměrně omezeným přístrojovým vybavením. Dílčí výsledky rozšiřují stávající poznatky o dynamice laserového svařovacího procesu. Postrádám pouze jasnou formulaci vztahu sledovaných charakteristik k výskytu svarových defektů, neboť právě identifikace defektů je hlavní motivací pro využití monitorovacího systému během svařovacího procesu.

Doktorand dokáže kriticky hodnotit výsledky své práce, vyvozovat odpovídající závěry, a také je publikovat. Práce obsahuje všechny formální i věcné náležitosti doktorské disertační práce. Stanovené cíle byly naplněny, proto disertační práci Ing. Petra Horníka **doporučuji k obhajobě** a po jejím úspěšném dokončení doporučuji udělení akademického titulu Ph.D.

Pro závěrečnou rozpravu při obhajobě navrhuji následující otázky:

1. V kapitole 5.6. je uvedeno, že při použití dopravního vlákna většího průměru je na elementech optické trasy měřen integrovanou fotodiodou větší zpětný odraz (obr. 5.13). Vysvětlíte, proč je naopak výkon odraženého záření měřený ve svařovací hlavě pro toto vlákno menší (obr. 5.21)?
2. Proč nebyla provedena frekvenční analýza zpětně odraženého laserového záření při vyšetřování vlivu velikosti styčné mezery při provádění tupých svarů (obr. 5.18)? Mohla by přispět ke spolehlivější identifikaci defektů způsobených mezerami menšími než 0,3 mm?
3. Jaká jsou kritéria pro rozlišení kondukčního a penetračního režimu na základě zobrazení průměrné hodnoty a směrodatné odchylky (obr. 6.11)?
4. Uvádíte, že maximální průměrné hodnoty odrazů odpovídají spodní části keyhole. Ta při vyšších rychlostech spíše zaostává za středem ústí keyhole. Proč je tedy pravděpodobnost saturace naopak nejvyšší v přední části keyhole (obr. 6.15)?
5. Které svarové vady je možné odhalit koaxiálním monitorováním fotodiodou a které pomocí kamery? Jaké jsou benefity vašeho řešení oproti komerčním?
6. V části 6.5.1. hovoříte o monitorování svařovacího procesu „v téměř reálném čase“. Jak časově náročné je prováděné zpracování dat? Zhodnoťte použitelnost vašeho přístupu v průmyslové praxi pro příp. zpětnovazebné řízení v reálném čase.