

## MOŽNOSTI EVALUACE VÝSLEDKŮ PŘETAVOVÁNÍ POVRCHU OCELI

CHMELÍČKOVÁ Hana – ŘIHÁKOVÁ Lenka, CZ

### Resumé

V rámci pedagogické činnosti v laserové laboratoři katedry SLO UP a FZÚ AV ČR v Olomouci jsou průběžně aktualizovány laboratorní úlohy jak pro výuku garantovaných předmětů, tak pro řešení kvalifikačních prací. Pro demonstraci závislosti výsledku interakce laserového záření s materiálem na plošné hustotě výkonu byl navržen a realizován experiment přetavování povrchu korozivzdorné oceli AISI 304 laserovým svazkem pulsního Nd:YAG laseru. Studenti sledovali experiment a aktivně se zapojili do vyhodnocení výsledných rozměrů a vzhledu laserem přetavených stop na povrchu oceli i v příčném řezu při různých parametrech. K tomuto účelu využili dvě mikroskopické metody a kontaktní profilometrii.

**Klíčová slova:** laser, přetavování povrchu, digitální mikroskop, kontaktní profilometr

### POSSIBILITIES OF THE STEEL SURFACE REMELTING RESULTS EVALUATION

#### Abstract

Laser surface remelting is one of the technologies utilizing laser energy to create a thin surface layer on the unaffected material, which then has a higher resistance (Dahotre & Hamikar, 2008). Although it is application mainly for continuous lasers, this process can be carried out on a pulsed laser where the melted area is created by dense overlapping of individual pulses. Traces 15 mm long were consequently created on steel samples, the variable parameter being the distance of the sample surface from the focal plane of the laser beam with which the power density was changed. Already during the visual observation of the experiment, it was obvious that with its decrease the width of the trace increased, but at the same time the temperature of the melt dropped. For the evaluation of the samples, the students used a desktop digital microscope, on which it is possible to interactively measure the width of the tracks and to save the photographs for further processing. After cross section cuts were made, the depths of the remelting areas were measured and displayed on the laser scanning confocal microscope. The development of the transverse and longitudinal profiles was evaluated by a contact probe.

**Key words:** laser, surface remelting, digital and confocal microscope, contact profilometer

#### Úvod

Laserová laboratoř našeho pracoviště je vybavena pulsním pevnolátkovým Nd:YAG laserem o průměrném výkonu 150 W. Konstrukce rezonátoru s pohyblivým nosičem zadního zrcátka a vyměnitelná clonka dovolují nastavit pět různých konfigurací s kvalitou svazku od 4 mm.mrad do 22 mm.mrad a teoretickým průměrem stopy v ohnisku 0,16 mm až 0,72 mm. Díky tomu lze demonstrovat nejružnější průmyslové laserové technologie (řezání, vrtání, svařování, povrchové zpracování) v laboratorních cvičeních předmětu Laserové technologie v praxi 1 a 2, Praktikum z optiky pro experimentální fyziky a Praktikum z experimentálních technik a měřicích metod 2 (Řiháková, Chmelíčková & Tomáščík, 2013). Rovněž jsou řešena zajímavá témata kvalifikačních prací všech úrovní (Chmelíčková, Šebestová, Havelková, Hiklová & Tomáščík, 2015). Studenti se podílí na přípravě experimentu, sledují proces řízený vyučujícím a průběžně zapisují proměnné parametry procesu. V tomto konkrétním experimentu byla proměnnou veličinou vzdálenost povrchu

vzorku od ohniskové roviny laserového svazku, se kterou laserový svazek zvětšuje svůj průměr. Na aktuální hodnotě plošné hustoty energie pak závisí míra ovlivnění materiálu. Následné zkoumání struktury povrchu laserových stop, příčných řezů, měření spáry řezu nebo průměru vrtaného otvoru mohou již provádět samostatně na stolním digitálním mikroskopu, další měření na laserovém konfokálním mikroskopu LEXT a kontaktním profilometru TALYSURF provádí za přítomnosti asistenta. Získané výsledky zpracují formou tabulek a grafů, doprovodí je ilustračními obrázky, které získají záznamem obrazu z ovládacích software měřicích přístrojů. Tímto způsobem získají povědomí o procesu experimentální činnosti od stanovení cíle po vyvození závěru.

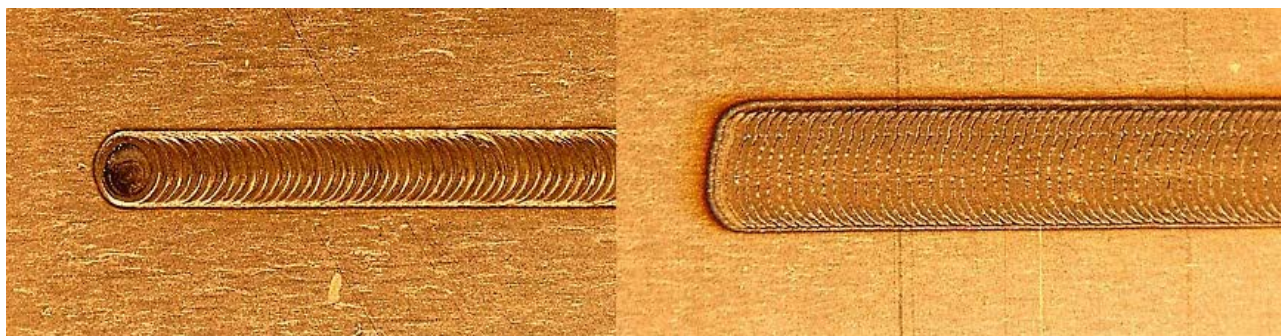
## 1 Experiment

Pro experiment přetavení povrchu byl nastaven základní rezonátor laseru s kvalitou svazku 22 mm.mrad a teoretickým průměrem svazku v ohnisku 0,72 mm. Vzorky korozivzdorné austenitické chrom-niklové oceli AISI 304 (1.4301) o tloušťce 0,6 mm a rozměrech 40 mm x 120 mm byly postupně upevňovány na svařovací přípravek, povrch byl zbaven nečistot pomocí technického lihu. Na každý vzorek byly aplikovány čtyři lineární stopy o délce 15 mm s roztečí 20 mm, ve vzdálenosti 5 mm od konce každé stopy byl vytvořen otisk sady pěti pulsů do jednoho bodu pro zjištění intenzitního profilu svazku. Rychlost polohovacích os byla vypočtena tak, aby zajišťovala minimální překrytí jednotlivých pulsů 80 % při konstantní frekvenci pulsu 15 Hz, tedy  $1,8 \text{ mm.s}^{-1}$ . Zvolenému napětí budicí výbojky 180 V a délce pulsu 2 ms odpovídala energie pulsu 1,56 J, odečtená z displeje laseru. Vypočtený vrcholový výkon v pulsu je pro tyto hodnoty 780 W (tabulka 1). Koaxiálně s laserovým svazkem byl tryskou v pracovní hlavě dodáván argon o průtoku  $8 \text{ l.min}^{-1}$  jako ochrana taveniny proti vlivu okolní atmosféry.

Tabulka 1 – Konstantní parametry laseru

frekvence	délka pulsu	budicí napětí	energie pulsu	výkon v pulsu	rychlost posuvů	průtok argonu
$f \text{ (Hz)}$	$t \text{ (ms)}$	$U \text{ (V)}$	$E \text{ (J)}$	$P_{peak} \text{ (W)}$	$v \text{ (mm.s}^{-1}\text{)}$	$\text{l.min}^{-1}$
15	2	180	1,56	780	1,8	8

Stopy byly postupně vytvořeny ve vzdálenostech 0 mm až 15 mm od ohniska se zvoleným krokem 1 mm. Odměřování vzdálenosti bylo realizováno pomocí laserového triangulačního systému s přesností na desetinu milimetru. Pozorováním obrazu z videokamery na pracovní hlavě laseru během procesu bylo zjištěno, že stopy ve vzdálenostech 0 mm až 3 mm od ohniska jsou pokryty kapkami odstříknuté taveniny, tato oblast se v praxi používá pro řezání s vysokotlakým plynem.



Obrázek 1 – Zobrazení laserem ovlivněné stopy v různých vzdálenostech ohniskové roviny od povrchu materiálu:  $z = 7 \text{ mm}$  (vlevo) a  $z = 14 \text{ mm}$  (vpravo), digitální mikroskop, zvětšení 124x

Hladká stopa s pravidelným překrytím pulsů se tvořila od vzdálenosti 4 mm s postupným rozšiřováním až do 12 mm. Dále již plošná hustota energie klesne pod hranici nutnou k dosažení teploty tavení v celé šířce stopy, na okrajích dochází pouze k tepelnému ovlivnění (obr. 1). U stopy pro  $z = 15$  mm byla pozorována pouze změna barvy povrchu v důsledku chemických změn kyslíčků legujících prvků oceli.

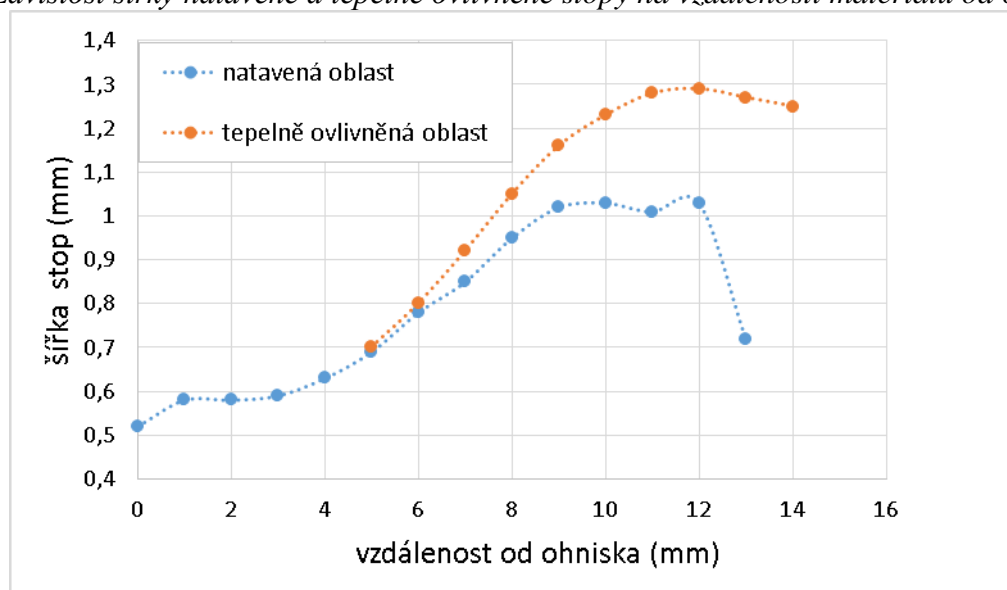
## 2 Měření šířky natavených a tepelně ovlivněných stop

Digitální mikroskop Newbrand NB-MIKR-300 je ovládán přes USB port počítačem v prostředí MicroCapture Pro Software, který umožňuje jak zobrazení objektů, tak měření jejich rozměrů a ukládání obrázků. Zvětšení je možné nastavit v rozmezí 30x až 300x, studenti mohli pozorovat stopy jak v celém rozsahu, tak ve vybraných detailech. Pozorovali, že se jednotlivé stopy mírně rozšiřují směrem od počátku vlivem postupného ohřevu materiálu během přetavování. Proto byly šířky stop měřeny vždy v rozsahu od 1 mm do 3 mm od konce, průměrné hodnoty z 10 měření byly zapsány do tabulky (tabulka 2). Se zvyšující se vzdáleností od ohniska celková šířka ovlivněné stopy roste až do hodnoty 12 mm, poté se v důsledku poklesu hustoty energie zužuje. Přetavená oblast se zvětšuje do vzdálenosti 12 mm od ohniska, přičemž v úseku od 8 mm do 12 mm vykazuje rozdíly v rádech setin milimetru. Od hodnoty 13 mm dále se natavená část stopy zužuje a převládá pouze tepelně ovlivněná oblast. Viditelné rozlišení přetavené a tepelně ovlivněné zóny bylo pozorováno od vzdálenosti 5 mm od ohniska (graf 1).

Tabulka 2 – Průměrné hodnoty šířky natavených ( $D_m$ ) a tepelně ovlivněných ( $D_{to}$ ) stop v závislosti na vzdálenosti od ohniskové roviny laserového svazku

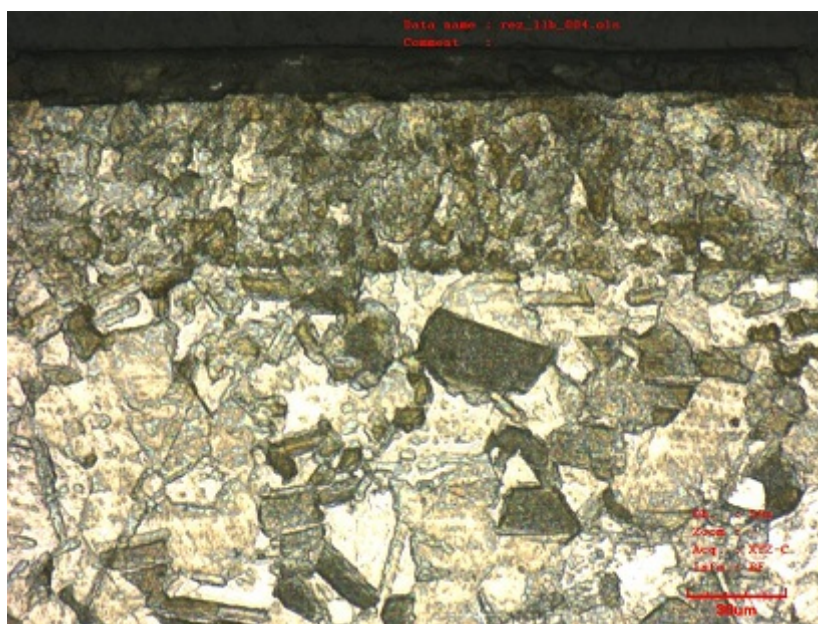
$z$ (mm)	0	1	2	3	4	5	6	7
$D_m$ (mm)	0,52	0,58	0,58	0,59	0,63	0,69	0,78	0,85
$D_{to}$ (mm)	-	-	-	-	-	0,71	0,82	0,92
$z$ (mm)	8	9	10	11	12	13	14	15
$D_m$ (mm)	0,95	1,02	1,03	1,01	1,03	0,72	-	-
$D_{to}$ (mm)	1,05	1,16	1,23	1,28	1,29	1,27	1,25	-

Graf 1 – Závislost šířky natavené a tepelně ovlivněné stopy na vzdálenosti materiálu od ohniska



### 3 Měření hloubky natavených stop

Z předchozích měření studenti usoudili, že vhodný rozsah pro natavování povrchu oceli při daných parametrech laseru je v rozmezí vzdáleností ohniska 8 mm až 12 mm od povrchu vzorku. Z těchto vybraných vzorků byly laserem vyříznuty obdélníčky o rozměrech (10 x 10) mm, zality do pryskyřice a po jejím ztuhnutí broušeny a leštěny. Studenti se na přípravě metalografických vzorků aktivně podíleli. Po leptání vzorků v lučavce královské byly na laserovém konfokálním skenovacím mikroskopu LEXT pozorovány a změřeny hloubky natavených stop z příčného řezu aplikovaných stop (tabulka 3, 2. řádek). Dle předpokladu se hloubka stopy s rostoucí vzdáleností vzorku od ohniska zmenšuje, ve vybrané oblasti 8 mm až 12 mm dosahuje hodnoty 84  $\mu\text{m}$  až 55  $\mu\text{m}$ . Na mikrofotografii příčného řezu stopy při  $z = 11$  mm lze rozlišit povrchovou oblast s rozdílnou strukturou, než má základní materiál (obr. 2).



Obrázek 2 – Mikrofotografie střední části příčného řezu stopy, zhotovené ve vzdálenosti 11 mm od ohniska, zvětšení 480x, červená škála 30  $\mu\text{m}$

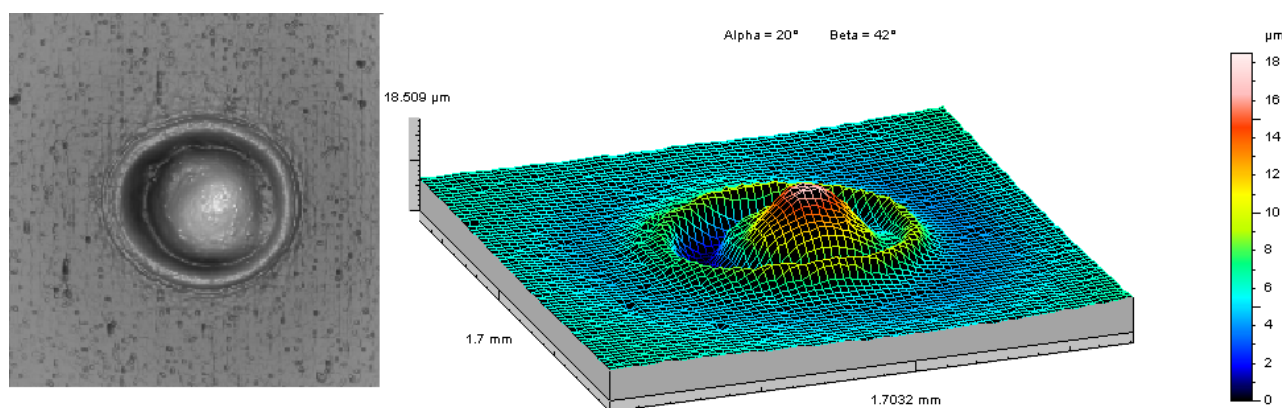
### 4 Měření profilu povrchu natavených stop

Vyhodnocení výškového profilu vybraných natavených stop bylo provedeno na kontaktním profilometru TALYSURF (Hiklová, Chmelíčková, Havelková & Řiháková, 2013). Studenti pozorovali práci asistenta, seznámili se z možnostmi interpretace výsledků pomocí software TALYMAP a z naměřených dat sami extrahovali obrázky pro ilustraci výsledku experimentu. Foto-simulace a 3D axonometrické zobrazení otisku sady pulsů do jednoho bodu ve vzdálenosti 8 mm od ohniska dokazují existenci prvního vedlejšího intenzitního maxima v příčném profilu laserového svazku, jehož vliv se projeví v rozostřeném svazku (obr. 3). Vývoj příčného výškového profilu byl zaznamenán pro každou stopu v 30 bodech v oblasti o délce 1 mm. Z naměřených hodnot byl v software vytvořen souhrnný graf se zvýrazněním minimální, maximální a průměrné hodnoty vzdálenosti od neovlivněného povrchu (tabulka 3, 3. a 4. řádek), na obrázku 4 jsou pro srovnání uvedeny grafy souhrnných výškových profilů pro stopy ve vzdálenosti 8 mm a 14 mm od ohniska, kdy měřítko osy Y je v prvním případě 30  $\mu\text{m}$ , v druhém 10  $\mu\text{m}$ .

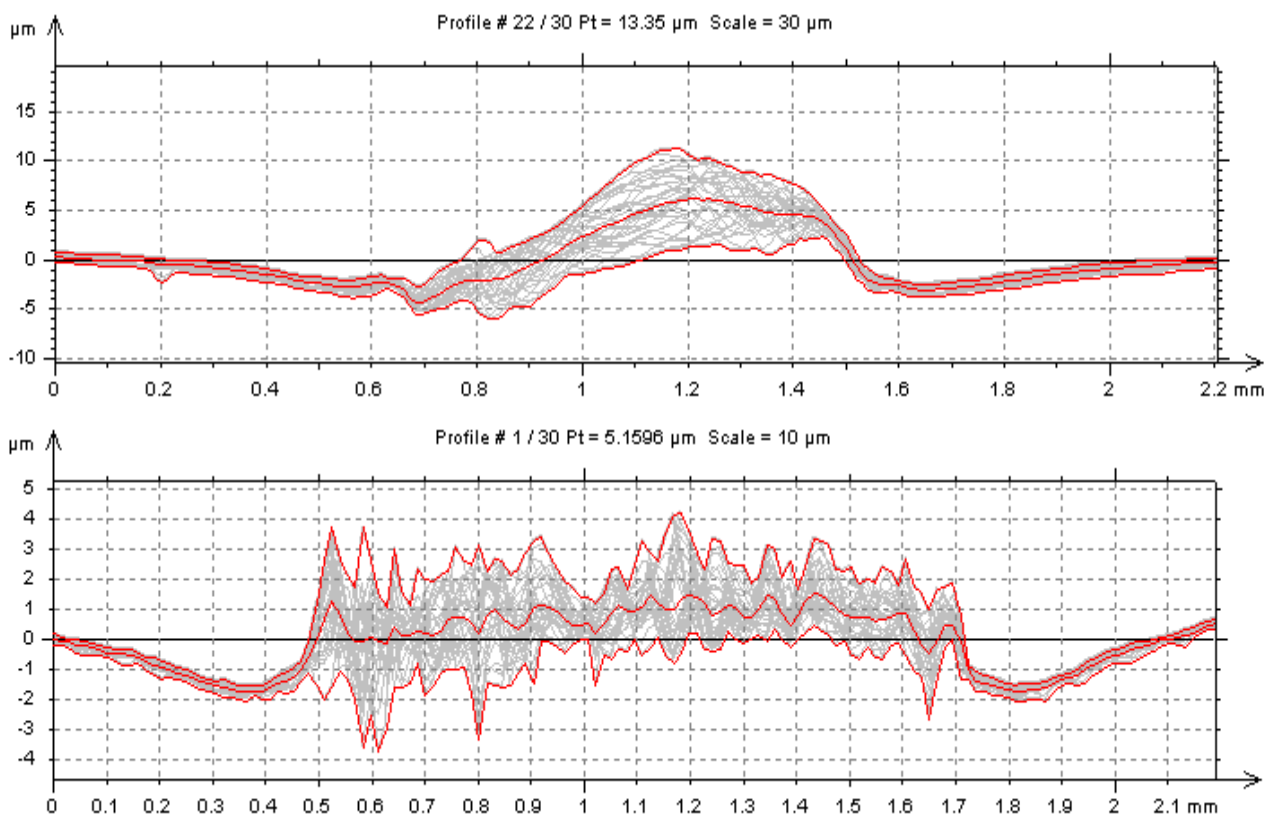


Tabulka 3 – Průměrné hodnoty hloubky natavených ( $h_m$ ) stop v závislosti na vzdálenosti od ohniskové roviny laserového svazku (LEXT) a maximální výškové odchylky v příčném profilu stopy ( $h_+$ ,  $h_-$ ) vzhledem k povrchu vzorku (TALYSURF)

z (mm)	8	9	10	11	12
$h_m$ (μm)	84	73	71	63	55
$h_+$ (μm)	12	8	9	4,5	4,2
$h_-$ (μm)	6	4	5	3	3,5



Obrázek 3 – Foto-simulace (vlevo) a 3D axonometrické zobrazení (vpravo) otisku sady pulsů do jednoho bodu ve vzdálenosti 8 mm od ohniska, vytvořeno v software TALYMAP



Obrázek 4 – Souhrnný graf příčných výškových profilů natavených stop v oblasti o délce 1 mm: vzdálenost 8 mm od ohniska (nahore) a vzdálenost 14 mm od ohniska (dole), vytvořeno v software TALYMAP

## Závěr

Z provedených měření bylo zjištěno, že optimální rozsah vzdáleností povrchu od ohniska pro vytvoření stopy s nejmenšími výškovými rozdíly leží mezi 8 až 12 milimetry. V případě menší vzdálenosti jsou viditelné nepravidelné kapky taveniny, v případě vzdáleností větších dochází k poklesu absorpce laserového záření a k vyhovujícímu natavení již nedojde. V laboratorní úloze lze demonstrovat přetavení povrchu materiálu laserovým zářením v pulsním režimu. Studenti jsou seznámeni s parametry procesu a mohou pozorovat na monitoru průběh procesu on – line prostřednictvím videokamery. Samostatně zpracovávají výsledky měření a seznamují se s prací na moderních měřicích přístrojích.

## Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen za podpory projektu MŠMT INTER-TRANSFER č. LTT17006 (Rozvoj české účasti v CTA) a projektu IGA\_PřF\_2018\_009 (Koherenční a nelineární optika – vybrané kapitoly IX)

## Literatura

- Dahotre, N. B. & Hamikar, S. P. (2008). Laser materials interactions. In *Laser Fabrication and Machining of Materials* (pp. 34 – 65). New York, NY: Springer Sciences + Business Media LLC.
- Hiklová, H., Chmelíčková, H., Havelková, M. & Řiháková, L. (2013). Využití kontaktního profiloměru k měření rozměrových změn kovových vzorků po laserovém opracování. In Pardera, L. & Mazal, P. (Eds.), *NDE for Safety 2013 / Defektoskopie 2013* (pp. 39-44). Brno, EU: University of Technology.
- Chmelíčková, H., Šebestová, H., Havelková, M., Hiklová, H. & Tomáščík, J. (2015). Numerical model of the diode laser overlapped remelting of structural steel, *Metalurgija*, 54(2), 331-334.
- Řiháková, L., Chmelíčková, H. & Tomáščík, J. (2013). Vliv procesních parametrů na řezání některých kovů pulsním Nd:YAG laserem, *Trendy ve vzdělávání*, 6 (1), 128-131.

## Kontaktní adresa:

Hana Chmelíčková, RNDr.,  
Fyzikální ústav AV ČR, Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR, 17. listopadu 50A, 772 07  
Olomouc, ČR, tel.: +420 585 631 516, fax +420 585 631 531, e-mail: [hana.chmelickova@upol.cz](mailto:hana.chmelickova@upol.cz)

Lenka Řiháková, Mgr.,  
Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR, Přírodovědecká fakulta UP, 17. listopadu 12, 771 40  
Olomouc, ČR, tel.: +420 585 631 677, e-mail: [lenka.rihakova@upol.cz](mailto:lenka.rihakova@upol.cz)