

Experimentální **A**nalýza **N**apětí **2003**

LASER CLADDING WITH A NUMERICAL MODELLING OF THE TEMPERATURE FIELD IN MATERIAL UTILIZATION

LASEROVÉ POVLAČOVÁNÍ S VYUŽITÍM NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍHO POLE V MATERIÁLU

Martin Stranyánek¹, Hana Chmelíčková²

There is introduced a description of the powder injection laser cladding method in this paper. Laser cladding is presented as a one of the technologies of laser material surface treatment. A series of specimens have been treated using continual CO₂ laser with a maximum output power of 2,5 kW by this technology. Ni-based alloy K50 and Co-based alloy Stellite 6 powders were applied on low-carbon 11 373 and 12 010 steels. Some characteristics and properties such as shape or microhardness of clad layers were analysed. For numerical calculations of the laser induced temperature field in treated material was used the finite difference method. Results of such modelling led to an optimization of cladding process parameters.

Keywords

Laser cladding, Temperature field, Finite difference method

Laserové povlakování, Teplotní pole, Metoda konečných diferencí

Úvod

K vylepšení povrchových vlastností mechanických součástí, jako je například odolnost proti povětrnostním vlivům nebo opotřebení lze využít mnoho metod tepelného zpracování. Princip spočívá ve vytvoření určité vrstvy s potřebnými vlastnostmi na daném základním materiálu - substrátu. Jinak tomu není ani v případě povrchového zpracování laserem. Tyto technologické procesy jsou založeny na absorpci koncentrované energie ve formě elektromagnetického záření laserového svazku povrchem substrátu a její přeměně v energii tepelnou. Toto teplo je odváděno materiálem do chladnějších vnitřních vrstev a způsobuje tak změny v jeho povrchové struktuře. U povlakování se navíc ve zpracovávané povrchové vrstvě dosahuje změny materiálové kompozice dodáním přídavného materiálu.

Výsledný efekt laserového povrchového zpracování je závislý na vlastnostech materiálů do procesu vstupujících a s tím související vhodné volbě procesních parametrů. Jako efektivní pomůckou při této optimalizaci se jeví využití modelu. Především jde o numerické modelování teplotního pole v materiálu vyvolaného interakcí s laserovým svazkem.

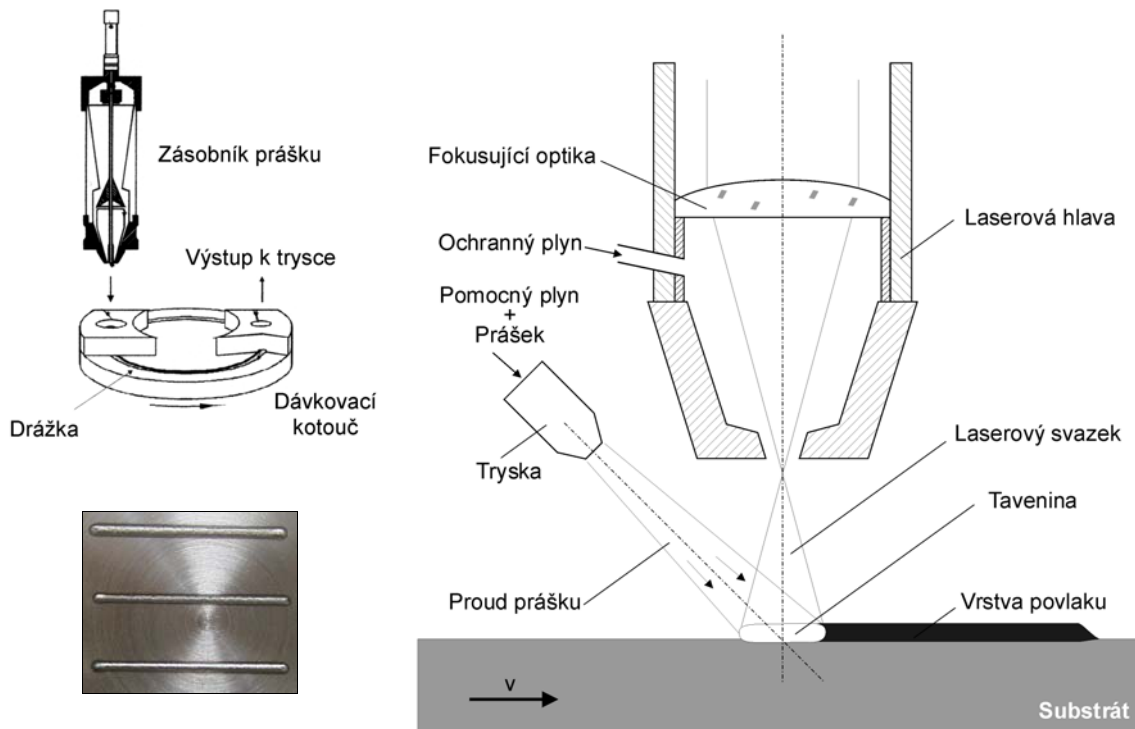
¹ Mgr. Martin Stranyánek: Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: +420-58-7441573, e-mail: stranyanek@optnw.upol.cz

² RNDr. Hana Chmelíčková: SLO UP a FzÚ AV ČR, 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: +420-58-7441516; e-mail: chmelickova@sloup.upol.cz

Laserové povlakování se vstřikováním prášku

Technologie laserového povlakování bývá definována [1, 2] jako proces vytváření povlaků z přídavného materiálu, který má rozdílné metalurgické vlastnostmi než substrát a je taven pomocí laserového svazku. Pouze velmi tenká vrstva substrátu musí být natavena za účelem dosažení metalurgické vazby s minimálním zředěním přídavného materiálu a substrátu, a to proto aby se zachovaly a do povlaku přenesly originální vlastnosti přídavného materiálu.

Zmiňovaná metoda se vstřikováním práškového přídavného materiálu je jedna z variant laserového povlakování spočívající v kontinuálním podávání prášku do zóny interakce laserového svazku se základním materiálem (Obr. 1). Tento prášek je ve svazku ohříván a k jeho úplnému roztavení dojde většinou až po dopadu do natavené oblasti. V důsledku postupného přejíždění přes povrch zpracovávané součásti zůstávají na povrchu jednotlivé stopy ztuhlého povlaku. Přitom intenzita laserového záření a rychlost pohybu svazku musí zaručit úplné roztavení prášku a částečné natavení základního materiálu. Kontinuální dodávka přídavného materiálu se realizuje speciálním zařízením - podavačem prášku [3]. Prášek je transportován ze zásobníku přes dávkovací kotouč hadičkou k trysce. K unášení částic se využívá proudu vhodného pomocného inertního plynu. Množství přídavného materiálu, který vstupuje do procesu povlakování je definováno rozměry drážky a rychlostí otáčení dávkovacího kotouče.



Obr. 1 Princip laserového povlakování se vstřikováním prášku

Tato metoda laserového povlakování má výhodu ve své flexibilitě. Např. tloušťka vytvářené stopy povlaku může být "on line" řízena množstvím podávaného přídavného materiálu. Větší plochy povlaků mohou být snadno vytvářeny několika přiléhajícími a přesahujícími stopami [4].

Numerické modelování teplotního pole v materiálu

Matematický popis časové změny teploty v libovolném místě tuhého tělesa, způsobené výsledným přenosem tepla a zdrojem energie představuje následující diferenciální rovnice.

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{ grad } T) + Q_{zdr} \quad (1)$$

Kde c [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] - měrná tepelná kapacita, ρ [kg.m^{-3}] - hustota a λ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] - součinitel tepelné vodivosti jsou fyzikální vlastnosti konkrétního zpracovávaného materiálu. Pro kartézský souřadnicový systém a zjednodušený případ, kdy uvažujeme $c = c_v = c_p = \text{konst.}$, $\rho = \text{konst.}$, $\lambda = \lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \text{konst.}$, lze přepsat rovnici (1) do následujícího tvaru.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{zdr}(x, y, z, t) \quad (2)$$

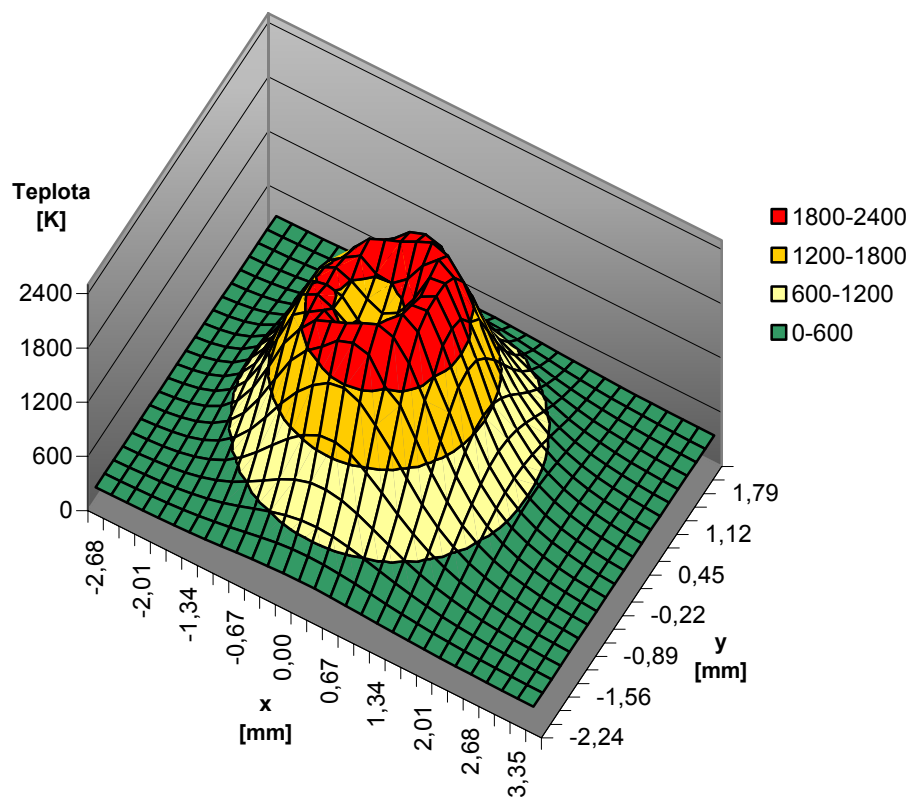
Pro numerický výpočet teplotního pole se nabízí vyžití metody konečných diferencí [5]. Pracovní oblast (poloprostor), který je určen povrchem substrátu a libovolným bodem uvnitř, je rovnoměrně rozdělen na síť uzlů s konstantou d . Rovnice (2), vyjma členu reprezentujícího zdroj tepla, je aproximována diferenčním schématem (3), ze kterého lze vypočítat neznámou (novou) teplotu T' v daném bodě a čase $t + \Delta t$ na základě známých teplot v čase t v daném bodě a v 6 bodech sousedních. $a = \lambda / \rho \cdot c$ je součinitel teplotní vodivosti (tepelná difuzivita) tělesa.

$$\frac{(T' - T)_{I,J,K}}{a \cdot \Delta t} = \frac{T_{I+1,J,K} - 2T_{I,J,K} + T_{I-1,J,K}}{d^2} + \frac{T_{I,J+1,K} - 2T_{I,J,K} + T_{I,J-1,K}}{d^2} + \frac{T_{I,J,K+1} - 2T_{I,J,K} + T_{I,J,K-1}}{d^2} \quad (3)$$

Kromě vedení tepla musí numerický model zahrnovat další fyzikální procesy související s průběhem laserového tepelného zpracování. Laser působí jako omezený povrchový zdroj tepla, jehož intenzita se mění podle modové struktury svazku a je modifikována teplotně závislou odrazivostí. Pro povrchové zpracování je vhodný prstencový svazek s rovnoměrným rozložením intenzity. Pohyb substrátu vůči laserovému zdroji je řešen tak, že objemový element přijímá teplo od sousedního v záporném směru a naopak předává teplo elementu ve směru kladném. Tento přírůstek teploty musí být započítán do diferenčního schématu. Ve výpočtovém programu je rovněž započítán vliv latentního tepla a ztrát energie.

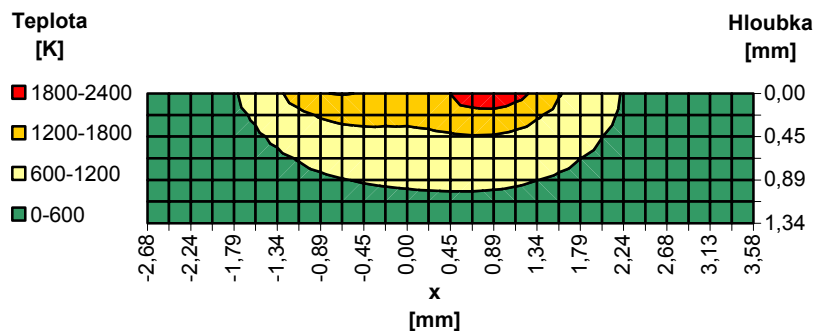
Vypočtený tvar teplotního pole odpovídá zadaným hodnotám procesních parametrů laserového zpracování. V případě povlakování je třeba dodat substrátu právě tolik energie aby došlo k natavení tenké povrchové vrstvy, ale nesmí dojít k odpaření materiálu. Při optimalizaci

jsou hledány parametry pro konkrétní experiment. V našem případě nízkouhlíkovou ocel s teplotou tavení zhruba 1800 K a teplotou varu přibližně 3000K.



Obr. 2 Teplotní pole na povrchu substrátu

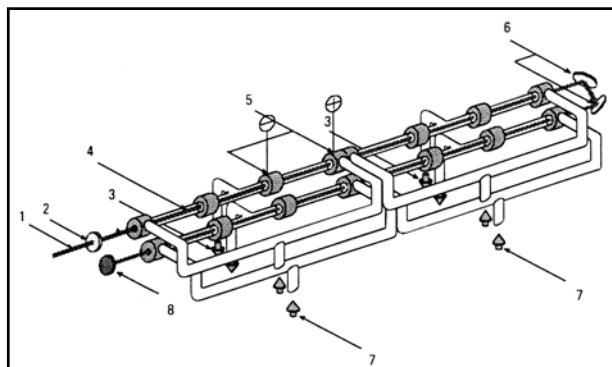
Na obrázku 2 je znázorněno teplotní pole na povrchu materiálu lokalizovaného v rovině x,y . Třetí osa prezentuje teplotu. Výpočet proběhl pro konkrétní parametry: rychlost posuvu v kladném směru osy x $v = 15 \text{ mm.s}^{-1}$, výkon laseru $P = 2000 \text{ W}$, průměr svazku na povrchu substrátu $D = 3,0 \text{ mm}$ a konkrétní fyzikálně - materiálové konstanty. Obrázek 3 demonstuje rozložení teploty v závislosti na hloubce materiálu.



Obr. 3 Rozložení teploty v hloubce materiálu

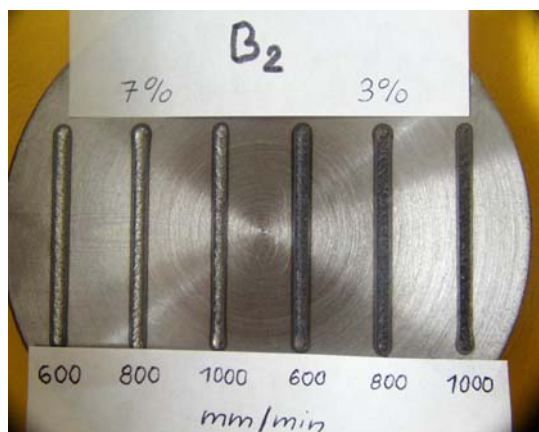
Experiment

Jednotlivé stopy povlaků byly vytvořeny kontinuálním CO₂ laserem s maximálním výkonem 2,5 kW (Obr. 4). V obrázku jsou označeny: 1 - laserový svazek, 2 - výstupní zrcadlo, 3 - výstupy plynu, 4 - excitační výboj, 5 - elektrody, 6 - ohybová zrcadla, 7 - vstupy plynu, 8 - zadní zrcadlo. Ve výstupním svazku laseru se překládají dva příčné módy: TEM 01* a TEM 10. Při této kombinaci módů se dosahuje poměrně homogenního rozložení hustoty výkonu na průřezu svazku. Takový to svazek se fokusuje nad povrch substrátu (viz. Obr. 1), tudíž je průměr stopy na povrchu větší a pro povrchové zpracování vhodnější. Laserový komplex použitý v experimentu [6] obsahoval ještě podavač prášku TWIN 10 Compact.



Obr. 4 Zjednodušené schéma CO₂ laseru

Jako substráty byly použity vybroušené vzorky z nelegovaných nízkouhlíkových ocelí 11 373 a 12 010. Povlaky byly vytvořeny z práškových slitin s obchodním označením K50 a Stellite 6. Kompozice prášků a substrátů jsou uvedeny v Tab. 1. S ohledem na výsledky modelování byly procesní parametry voleny v intervalech: průměr laserového svazku na povrchu substrátu: $D = 2,5 - 4,6$ mm; rychlost posuvu vzorku $v = 10 - 16,7$ mm.s⁻¹; množství podávání prášku $M_{PR} = 110 - 367$ mg.s⁻¹. Konstantní byl výkon laseru $P = 2000$ W a ohnisková vzdálenost fokusační optiky $l = 150$ mm.



Obr. 5 Vzorek z oceli 12 010 se stopami povlaku z mat. Stellite 6 – pohled shora

Materiál	Kompozice
K50	Ni 80%; Cr+Si 20%; zrnitost < 100μm
Stellite 6	Co 60%; Cr 28%; W 5%; Ni 2,5%; Fe 2,5%; Si 1,0%; C 1,2%; zrnitost < 100 μm
Ocel 11 373	C max 0,17%; P max 0,045%; S max 0,045%; N max 0,007%
Ocel 12 010	C 0,07-0,14%; Mn 0,35-0,65%; Si 0,15-0,4%; Cr max 0,15%; Ni max 0,3%; Cu max 0,3%; P max 0,04%; S max 0,04%

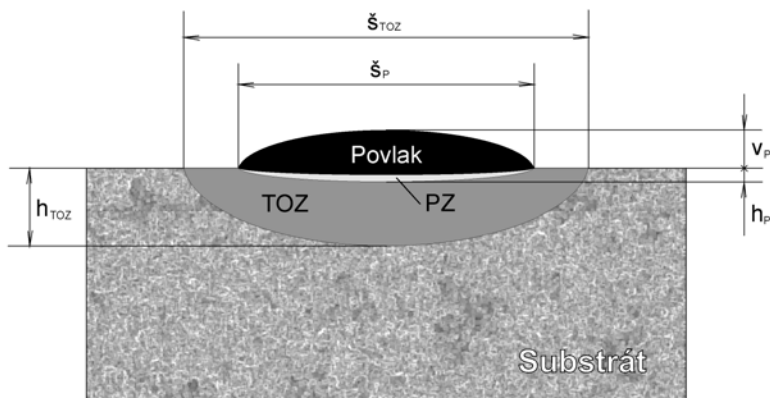
Tab. 1 Materiálové kompozice prášků a substrátů

Jednotlivé stopy laserových povlaků byly hodnoceny na vybroušených a leptaných příčných řezech.

Hodnocení tvarových charakteristik stop povlaků

Obvyklý geometrický tvar stopy povlaku na příčném řezu je znázorněn na obrázku 6. Na takovém řezu lze rozlišit 4 hlavní oblasti: základní materiál - substrát, tepelně ovlivněnou zónu - TOZ, tenkou přechodovou zónu - PZ a samotný povlak. Jako tvarové charakteristiky jsou hodnoceny: výška, hloubka a šířka povlaku, hloubka a šířka tepelně ovlivněné zóny.

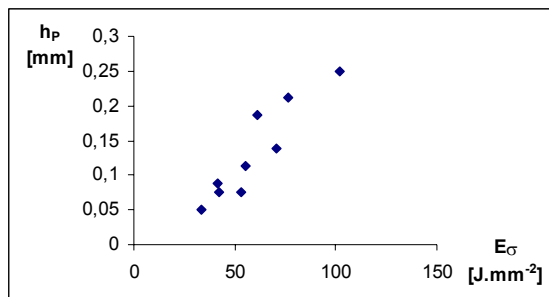
Jedním z hlavních fyzikálních faktorů, které ovlivňují výsledný tvar stopy povlaku je plošná hustota energie E_σ [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$] (4) přiváděné svazkem na povrch substrátu. Na konečný tvar povlaku má vliv i další procesní parametr, kterým je množství podávaného prášku M_{PR} [$\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$].



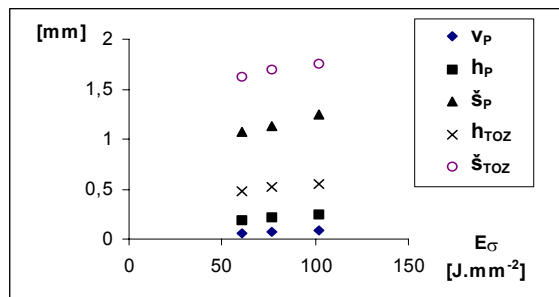
Obr. 6 Tvarové charakteristiky laserem vytvořených povlaků

$$E_\sigma = \frac{4}{\pi} \frac{P}{D \cdot v} \quad (4)$$

Na následujících obrázcích jsou grafy vybraných experimentálně zjištěných závislostí. Jedná se o závislost hloubky povlaku a jiných tvarových charakteristik na plošné hustotě energie, při konstantním množství podávaného prášku $110 \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$.



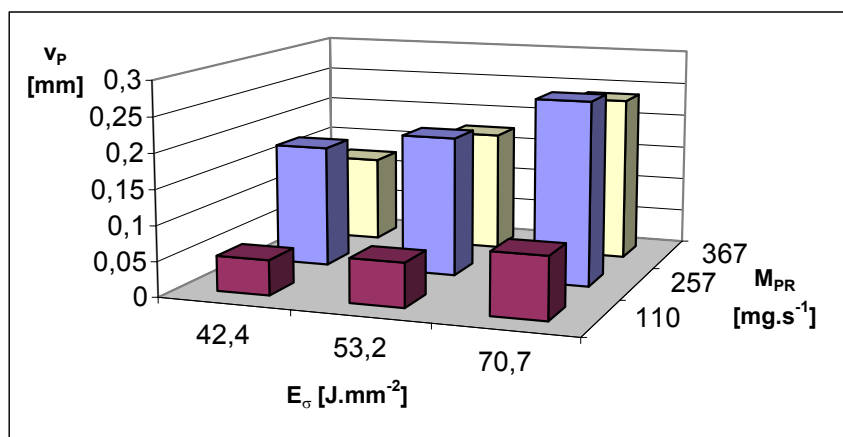
Obr. 7 Závislost hloubky povlaku na plošné hustotě energie



Obr. 8 Závislost různých tvarových charakteristik na plošné hustotě energie

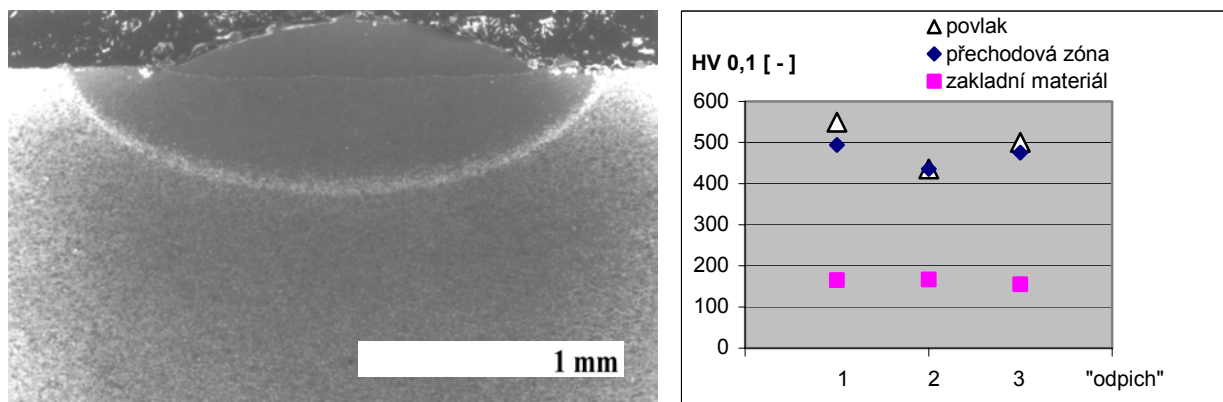
Většina tvarových charakteristik vykazuje nárůst při zvyšování plošné hustoty energie při konstantním množství dodávaného prášku. Na obrázku 9 je graf závislosti výšky povlaku na plošné hustotě energie a na třech různých hodnotách množství podávání prášku. Z této závislosti

je zřejmé, že zvyšování množství podávaného prášku nad určitou hodnotu nezpůsobilo zvětšení výšky povlaku. Naopak došlo ke snížení této hodnoty. Tento jev lze vysvětlit zvýšeným stínícího efektu částic prášku na laserové záření a tím snížením hodnoty dopadající energie na substrát.

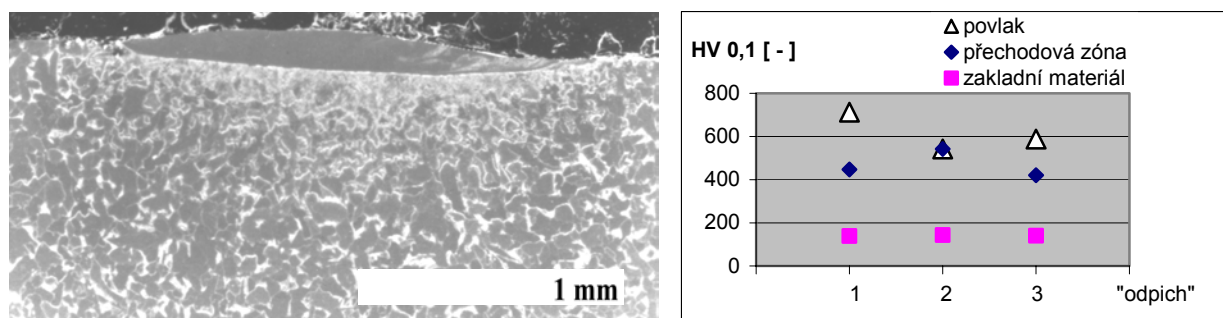


Obr. 9 Závislost výšky povlaku na plošné hustotě energie a množství podávaného prášku

Mikrotvrdost



Obr. 10 Řez stopou laserem vytvořeného povlaku z materiálu K50 na oceli 11 373 a hodnoty mikrotvrdosti pro jednotlivá pásma



Obr. 11 Řez stopou laserem vytvořeného povlaku z materiálu Stellite 6 na oceli 12 010 a hodnoty mikrotvrdosti pro jednotlivá pásma

Závěr

Předložený příspěvek prezentuje povlakování jako jednu z technologií laserového povrchového zpracování materiálu. Tyto technologie využívající laserového záření umožňují přechod od objemových technik ke zpracování lokálnímu, což může vést k výraznému zvýšení kvality zpracovávaných součástí a v mnoha případech též k úsporám energetickým i finančním. Potenciální možnosti vytváření některých speciálních povrchových vrstev pouze laserovým povlakováním, řadí tuto technologii mezi nekonvenční strategické technologie.

Na kvalitu laserem vytvořených povlaků má vliv mnoho faktorů. V daném příspěvku byly hodnoceny některé tvarové charakteristiky a mikrotvrdosti jednotlivých stop povlaků vytvořených z různých materiálů při měnících se procesních parametrech.

Optimální parametry je třeba stanovit před každým experimentem pro danou konkrétní kombinaci přídavného materiálu a substrátu. Optimalizace spočívající v určení užšího intervalu těchto hodnot numerickým modelováním teplotního pole v materiálu při laserovém zpracování se jeví jako velmi efektivní varianta.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory MŠMT ČR v rámci projektu výzkumu a vývoje číslo LN00A015 "Výzkumné centrum pro optiku" a programu podpory cíleného výzkumu a vývoje AVČR č. IBS 1010353.

Literatura

- [1] Luxon, J.T., Parker, D.E.: *Industrial lasers and their applications* – Englewood Cliffs, 1992, p. 301.
- [2] Steen, W.M.: *Laser material processing* – London, 1991, p. 266.
- [3] Schneider, M.: *Laser cladding (Ph.D. Thesis)* – Enschede, 1998, p. 181.
- [4] Li, Y., Ma, J.: *Study on overlapping in the laser cladding process* – Surface & coatings technology, no. 90, pp. 1-5, 1997.
- [5] Sharp, M.C.: *Mathematical modelling of continuous wave CO₂ laser processing of materials (Ph.D. Thesis)* – London, 1986, p. 267.
- [6] Stranyánek, M.: *Powder cladding of low-carbon steel by CO₂ laser (výzkumná zpráva č. 209/SLO/2000)* – Olomouc, 2000, p. 21.