

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské metalurgie Školní rok: 1990/91

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Miroslava B R A U N A
obor strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Absorpce laserového záření při laserovém tepelném zpracování.

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou absorpce laserového záření pevnými látkami.
2. Zpracujte přehled o metodách jejího zjišťování.
3. S využitím Bouguerova-Lambertova zákona formulujte model absorpce laserového záření systémem povlak - kovový substrát.
4. Zjistěte (podle možnosti z literárních údajů či prakticky) vlastnosti povlaků a substrátu potřebné pro aplikaci modelu.
5. Model aplikujte pro různé typy povlaků.
6. Prověřte a zhodnoťte shodu výsledků modelu s reálným laserovým zpracováním.

V 10.1915

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

KSM/SM

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran

Seznam odborné literatury: .

HEGER, P.: Diplomová práce. VŠST Liberec 1986.

FAISTAUER, P.: Diplomová práce. VŠST Liberec 1987.

TVRDÍKOVÁ, J.: Diplomová práce. VŠST Liberec 1990.

SOKOLOV, A.A.: Optičeskije svojstva metallov. Moskva 1961.

RYKALIN, N.N. a kol.: Vysokotemperaturnyje technologičeskije processy. Moskva Nauka 1986.

Články v časopisech podle dispozic vedoucího práce.

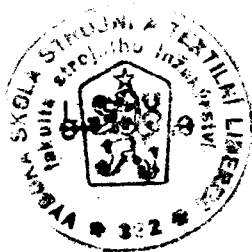
Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Nosek

Konzultant:

Zadání diplomové práce: 1. 10. 1990

Termín odevzdání diplomové práce: 3. 5. 1991

Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
Vedoucí katedry



Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
Děkan

V Liberci

dne 15. 3. 19 91

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

obor 23 - 07 - 8

strojírenská technologie

zaměření

strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské metalurgie

ABSORPCE LASEROVÉHO ZÁŘENÍ PŘI LASEROVÉM
TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ

KSM - 356

Miroslav BRAUN

Vedoucí diplomové práce: ing. Vladimír Nosek

VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 55

Počet tabulek: 7

Počet obrázků: 20

Počet příloh: -

Počet výkresů: -

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146076852

2. 5. 1991

M í s t o p ř í s e ž n é p r o h l á š e n í :

"Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury."

V Liberci, dne 2. 5. 1991

Miroslav Praha
.....
vlastnoruční podpis

OBSAH

	Strana
0. Seznam použitých symbolů	5
1. Úvod	6
2. Absorpce laserového záření materiálu	7
2.1 Princip laserového tepelného zpracování	7
2.2 Parametry laserového tepelného zpracování	9
2.3 Energetická bilance při LTZ	11
2.4 Mechanizmy interakce laserového záření s pevnou látkou	12
2.5 Mechanizmy relaxace absorbované energie	14
2.6 Mechanizmy interakce laserového záření s plazmou	14
2.7 Ovlivňování absorpce	15
2.7.1 Antireflexní povlaky	16
2.8 Kvantitativní popis absorpce	20
2.9 Mechanismus absorpce záření kovy	21
2.10 Mechanismus absorpce laserového záření polovodiči a dielektriky	23
3. Metody zjišťování absorpce	
3.1 Metoda spočívající v měření dopadajícího difuzně a přímo odraženého výkonu	24
3.2 Metoda rotujícího drátu	25
3.3 Metoda kalorimetrická	25
3.4 Metoda dle Hartha	26
3.5 Měření absorpce pomocí optických přístrojů	32
4. Matematicko-fyzikální model	
4.1 Matematicko-fyzikální model absorpce laserového záření	35

	Strana
4.2 Přehled dat pro aplikaci na matematicko-fyzikálním modelu	39
4.3 Konkrétní parametry laserového tepelného zpracování	46
4.4 Aplikace konkrétních dat na matematicko-fyzikálním modelu	48
4.5 Zhodnocení výsledků	50
5. Závěr	52
6. Seznam literatury	53

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

- A ... absorpce [-]
a ... součinitel teplotní vodivosti [m^2s^{-1}]
B ... šířka vzorku [m]
 c_p ... měrná tepelná kapacita [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
 D_o ... průměr svazku vystupujících z laseru [m]
 D_b ... průměr stopy dopadajících paprsků [m]
f ... ohnisková vzdálenost [m]
HTO, h ... hloubka tepelně ovlivněné oblasti [m]
H ... hloubka vzorku [m]
I ... intenzita záření [W.m^{-2}]
k ... index absorpce [-]
L ... délka vzorku [m]
 $l_{m,v}$... latentní teplo tání, resp. vypařování [J.kg^{-1}]
m ... hmotnost [kg]
n ... index lomu [-]
P ... výkon [W]
q ... hustota výkonu [J.m^{-2}]
R ... odrazivost [-]
T ... teplota [$^{\circ}\text{C}$], transmittance [-]
t ... čas [s]
v ... posuvová rychlost [ms^{-1}]
w ... šířka tepelně ovlivněné oblasti [m]
 z_o ... tloušťka povlaku [m]
 α ... koeficient absorpce [m^{-1}]
 λ ... vlnová délka [m], součinitel teplotní vodivosti [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
 ϱ ... měrný elektrický odpor [$\Omega.\text{m}$]

1. ÚVOD

V oblasti zpracování kovů došlo u mnoha zahraničních výrobců k výraznému rozvoji technologií, které používají netradiční, vysoce koncentrovaný zdroj tepelné energie - laserové záření. Tato technologie umožňuje přechod od objemových technologií ke zpracování lokálnímu, což vede k výraznému zvýšení kvality zpracovávaných součástí a v mnoha případech také k úsporám energetickým.

Zvýšení kvality strojních součástí neznamená jenom zvýšení jejich životnosti, ale má také podstatný vliv na zvýšení spolehlivosti zařízení, prodlužuje celkovou dobu životnosti a snižuje náklady na opravy a spotřebu náhradních dílů. V mnoha případech znamená užití laserových technologií kvalitativní skok v užitné hodnotě strojních součástí a strojních celků, který by byl s pomocí konvenčních technologií nedosažitelný.

Laserové technologické procesy jsou založeny na absorpci laserového záření a jeho přeměně v tepelnou energii. Problémem absorpce se zabývám v této práci. Pokusil jsem se vytvořit matematicko-fyzikální model absorpce laserového záření a ověřit ho v praxi.

2. ABSORPCE LASEROVÉHO ZÁŘENÍ

2.1 Princip laserového tepelného zpracování

V porovnání s dosud běžně používanými způsoby kalení přináší laserové transformační následující výhody: vysokou koncentraci energie, možnost lokálního zpevnění a zpracování těžko dostupných míst, po zpracování dochází k minimální distorzi, není třeba kalicího prostředí ani dokončovacích operací po zpevňování, možnost přenosu paprsku na velké vzdálenosti, paprsek lze štepit, proces lze řídit počítačem.

Proces transformačního zpevnění lze popsat následujícím způsobem: Paprsek laseru v podobě světelného záření se pomocí soustavy čoček fokusuje na povrch materiálu. V tenké povrchové vrstvě / $= 10^{-7} + 10^{-8}$ m / dochází k difrakci paprsku, přičemž část světelného záření se v závislosti na odrazivosti této vrstvy odrazí zpět do okolního prostředí. Množství pohlcené energie je dáno absorbovaným výkonem a dobou jeho působení na materiál. Absorbovaná energie se během 10^{-11} s přemění v teplo, vytváří se časově proměnné teplotní pole / 11 /. Parametry laserového záření musí být takové, aby teplota povrchové vrstvy materiálu nepřevýšila jeho teplotu tání. Doba výdrže na austenitizační teplotě musí být přitom dostatečně dlouhá, aby se výchozí struktura materiálu stačila přeměnit na austenitickou. Průběh a rozsah astenitizace jsou jedním z nejdůležitějších faktorů rozhodujících o výsledcích tepelného zpracování. Následuje ochlazení materiálu samoochla-

zením rozvodem tepla do celého oběmu součásti. Její objem musí být dostatečně velký, aby ochlazování proběhlo nadkritickou rychlostí a vzniklý austenit se stačil přeměnit na martenzit.

Rychlost ochlazování rozvodem tepla bývá asi o řád nižší než rychlost ohřevu. Při tepelném zpracování pomocí CO_2 laseru jsou běžné rychlosti ohřevu $10^3 + 10^5 \text{ K.s}^{-1}$, u pulzních pevnofázových laserů lze dosáhnout rychlostí ohřevu $10^6 + 10^8 \text{ K.s}^{-1}$ i více. Tyto extrémě vysoké rychlosti ohřevu a ochlazování činí zpevňování nízkouhlíkových ocelí snadnější a rozdíl v kalitelnosti mezi uhlíkovými a legovanými ocelmi není tak markantní jako u konvenčních procesů.

Tvrdosti zpevněné vrstvy bývají často vyšší než u konvenčních procesů, což je způsobeno:

1. Značným stupněm přesytení tuhého roztoku intersticiály v důsledku vysoké rychlosti ochlazování a spolu s tím nedostatkem času pro průběh samopopouštění.
2. Zvýšenou hustotou defektů krystalické stavby.
3. Jemnědisperzní stavbou martenzitu.

2.2 Parametry laserového tepelného zpracování

Parametry laserového zpracování materiálu dělíme na vlastní parametry laseru, resp. jeho záření, parametry zpracovávaného materiálu a parametry procesní. Charakteristickými parametry laseru, podstatnými pro technologické zpracování jsou průměr vystupujícího svazku záření, jeho rozbíhavost, vlnová délka záření, výkon záření a módová struktura, tj. rozdělení intenzity záření přes průřez jeho svazku. Většina těchto parametrů je pevně určena konstrukcí laseru a jeho médiem, pouze výstupní výkon laseru lze v určitých mezích měnit.

Podstatnými parametry zpracovávaného materiálu jsou jeho chemické složení, strukturní stav, fázové složení a morfológie, distribuce a disperzita přítomných fází/ a stav povrchu, tj. jeho drsnost a přítomnost či nepřítomnost povrchových vrstev ovlivňujících absorpci záření materiálem. / 8 /

Nejdůležitějšími parametry laserového zpracování jsou intenzita záření /též hustota výkonu záření q /, pro kterou platí / 4 /

$$q = \frac{P}{v \cdot D_b} \quad (1)$$

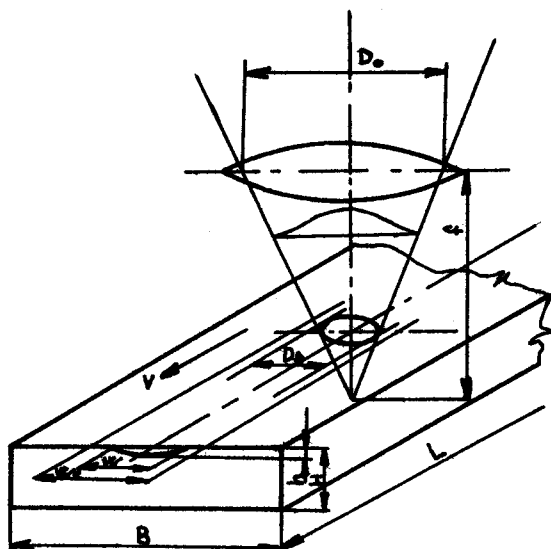
kde D_b ... průměr svazku

v ... rychlost posuvu

P ... výkon laserového svazku

a doba interakce je určena dobou pulzu nebo rychlostí posuvu materiálu vůči svazku záření a vedle nich ještě rozdělení intenzity přes průřez svazku.

Geometrii laserového tepelného zpracování můžeme znázornit dle obr. 1. / 19 /



obr. 1. Geometrie laserového tepelného zpracování

- kde D_0 ... průměr svazku paprsků vystupujících z laseru
 D_b ... průměr stopy dopadajících paprsků
 W ... šíře tepelně ovlivněné oblasti
 W_c ... šíře tepelně ovlivněné oblasti při absorpci zvýšené povlakem
 v ... rychlost pohybu paprsků vůči vzorku
 h ... hloubka zpevněné oblasti
 H ... tloušťka vzorku
 B ... šířka vzorku
 L ... délka vzorku
 f ... ohnisková vzdálenost

Pro daný materiál v daném strukturním stavu s danou povrchovou úpravou a daný laser jsou tedy základními parametry laserového zpracování materiálu intenzita záření /regulovaná výstupním výkonem laseru a vnějším optickým systémem/, rychlost posuvu součásti vůči svazku paprsků a účinnost absorpce, daná povrchovým stavem.

2.3 Energetická bilance

Při dopadu záření na povrch materiálu platí zákon zachování energie / 3 /

$$R + A + T = 1 \quad (2)$$

kde R ... odrazivost

A ... absorpce

T ... transmittance

Tyto tři veličiny, které charakterizují proces působení záření na materiál můžeme vyjádřit

$$A = \frac{I_{\text{poh}}}{I_o} \quad (3)$$

$$R = \frac{I_{\text{odr}}}{I_o} \quad (4)$$

$$T = \frac{I_{\text{prop}}}{I_o} \quad (5)$$

kde I_o ... celková intenzita dopadajícího záření

I_{poh} , I_{odr} , I_{prop} ... intenzity pohlceného, odraženého a prošlého záření

Protože kovové materiály mají zvláště vysokou odrazivost laserového záření, je třeba se odrazivostí kovových povrchů zabývat a povrchy materiálů modifikovat tak, aby odrazivost

kvantifikovaná součinitelem odrazivosti byla co nejnižší a v limitě aby $R = 0$.

Celkovou energetickou bilanci interakce laserového záření s materiálem lze popsat rovnicí tvaru / 17 /

$$/1 - R/ \cdot P = m [c_{ps} \cdot /T_T - T_0/ + L_m + L_v] + E_R + E_Z \quad (6)$$

v tomto vztahu je

P ... výkon laseru

t ... doba, po kterou působí laserové záření na materiál

R ... odrazivost, představující tu část energie nebo výkonu, která se od povrchu materiálu odrazí

m ... hmotnost materiálu

c_p ... měrná tepelná kapacita materiálu v tuhém resp. kapalném stavu

L_m ... latentní teplo tání

L_v ... latentní teplo vypařování

T_m ... teplota tání

T_v ... teplota vypařování

E_R ... reakční energie vyvolaná v okolí materiálu nebo v něm chemickou reakcí

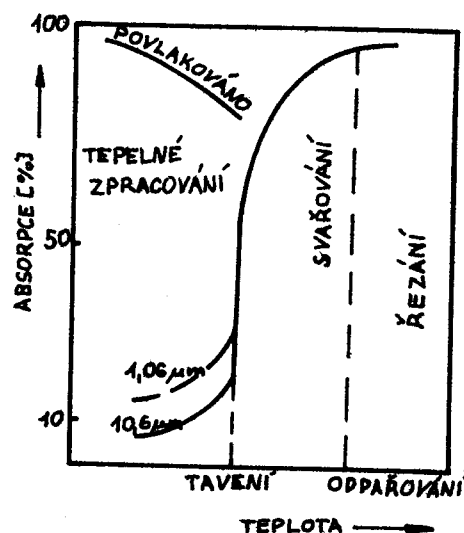
E_Z ... ztrátová energie, která se rozptýlí

Z tohoto vztahu je patrné, že pro $R = 1$ se veškerá energie od povrchu odráží a působení laserového záření na materiál je neúčinné.

2.4 Mechanismy interakce laserového záření s pevnou látkou

V optické a blízké infračervené oblasti absorbuje elektronový systém kovu energii elektromagnetického vlnění dvěma způsoby: / 6 /

a/ elektrické pole dopadající vlny rozkmitá nucenými kmity vodivostní elektrony v kovu a v povrchové vrstvě vzniká střídavý proud. Interakcí mezi elektrony a mřížkou se část energie předá mřížce, kde se termalizuje. Daný mechanismus se uplatňuje hlavně v infračervené oblasti, absorpce je zde relativně malá. Pro železo se uvádí pro $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ při 20°C 10 %. / 19 / Absorpce roste s rostoucí teplotou povrchu a při dosažení skupenských přeměn absorpce roste skokově, viz obr. 2.



obr. 2. Závislost absorpce na teplotě

Absorpci dále zvyšuje drsnost povrchu, mřížkové poruchy v povrchové vrstvě, nebo speciálně nanesená vrstva polovodiče nebo dielektrika

b/V optické oblasti se u polovodičů i kovů uplatňuje převážně rezonanční kvantová absorpce fotonu při přechodu elektronů do energeticky vyššího neobsazeného stavu.

2.5 Mechanismy relaxace absorbované energie

Nejprve dochází k rychlé termalizaci energie uvnitř dané zóny elektronových stavů při vzájemné interakci elektronů. Rozdělení energie mezi excitovanými elektrony se tím přiblíží rovnovážnému. Excitovaný elektronový systém se po relaxaci dostane do stavu horké plasmy řádově 10^4 K, mřížka však zůstává zatím chladná. Vzájemnou interakcí elektronů a mřížky se pak energie předává mřížce, převážně ve formě excitace podélných optických fotonů. Absorbovaná energie se dále termalizuje uvnitř fononového systému. Vyložené schéma kaskády relaxací energie tvoří podstatu tzv. tepelného modelu relaxace.

/ 6 /

2.6 Mechanismy interakce laserového záření s plazmou

Při dosažení kritické hustoty výkonu q_c se absorpční mechanismus zásadně mění. Dochází k ionizaci plynné fáze nad kovovým materiálem a vzniklá plazma kvantitativně absorbuje dopadající záření, tj. absorpce se stává intenzitně nezávislou. Tento mechanismus absorpce se uplatňuje při laserovém zpracování materiálu se skupenskými přeměnami, tj. zpracování založených na tavení povrchové vrstvy, dále pak při svařování, vrtání či řezání. viz obr. 2

$$q_c = \frac{0,885 \cdot T_m \cdot \lambda}{a \cdot \tau^{1/2}} \quad (7)$$

kde q_c ... kritická hustota výkonu

λ ... součinitel tepelné vodivosti

T_m ... teplota tání materiálu

τ ... doba trvání impulsu

a ... součinitel teplotní vodivosti

Z tohoto vztahu je patrné, že kritická hustota výkonu roste se zvyšující se teplotou tání materiálu, jeho teplotní vodivostí, objemovou tepelnou kapacitou a zmenšuje se s růstem doby trvání impulsu.

U kontinuálního laseru můžeme stanovit rychlost posuvu při které dojde k natavení můžeme orientačně stanovit ze vztahu / 6 /

$$\frac{v_v}{v_t} = \frac{\sqrt{T_t - T_o}}{\sqrt{T_v - T_o}} \quad (8)$$

kde v_v, v_t ... rychlost posuvu, při které dochází k varu, resp. tavení

$T_{t,v,o}$... teplota tání, resp. varu kovu nebo počáteční teplota

Při laserovém tepelném zpracování se však tento mechanismus neuplatňuje.

2.7 Ovlivňování absorpce

Absorpce laserového záření povrchem součástí je jev, který má významný vliv na tepelné zpracování laserem. Vzhledem k tomu, že kovové povrchy při použití laseru mohou odrazit až 95 % dopadající energie, je reprodukovatelné dodržení absorpčních vlastností povrchů pro výsledek ozáření důležitější, než přesné dodržení rychlosti posuvu a konstantního výkonu laseru. Na rozdíl od ostatních parametrů ozařování

/hustota výkonu, rychlost posuvu/ je absorptivita povrchu poměrně obtížně měřitelná. Její reprodukovatelnost je závislá spíše na dodržení technologických podmínek antireflexních úprav povrchů.

Úpravy povrchů kovů pro zvýšení absorpce dělíme do dvou základních skupin / 12 /

1. pomocí běžných obráběcích operací
2. pomocí nanášení povlaků

Do první skupiny patří např. zdrsňování povrchu, ale také zvýšení teploty, naklápění vzorku, použití laseru o kratší vlnové délce. Účinnost těchto operací však není dostatečná. Například zdrsňování není tak účinné, aby zajistilo dostatečnou a přijatelnou absorpci záření při hustotě výkonu 50 W/mm^2 . Při hustotě výkonu 160 W/mm^2 již některá zdrsňování zajistí absorpci vedoucí k transformaci oceli. Při hustotě výkonu $2\ 500 \text{ W/mm}^2$ je zdrsňování jednou z metod zvýšení absorpce, zejména při přetavování v případech, kdy je požadován chemicky zcela neovlivněný povrch součásti, kdy z tohoto důvodu nelze aplikovat antireflexní povlaky. Vyšší drsnost povrchu výrazně zvyšuje účinnost antireflexního povlaku. Zdá se, že existuje optimální drsnost, při které je povlak nejúčinnější. Při vyšší nebo naopak menší drsnosti účinnost kombinace zdrsňování-povlak klesá. Výhodné je zejména tryskání, brokování, jemné soustružení. Leštěné, broušené, honované a hrubě soustružené povlaky jsou méně vhodné.

2.7.1 Antireflexní povlaky

Za účelem zvýšení absorpce laserového záření se povrch

ozařovaných kovů pokrývá nekovovým absorpčním /antireflexním/ povlakem, který má zvýšit absorpci na cca 80%. Ztráty reflexí nižší než 20 % se pokládají za přijatelné. Antireflexní povlaky mají mít následující vlastnosti:

- snadno, rovnoměrně a reprodukovatelně nanositelné
- snadno a beze zbytku odstranitelné
- vysokou teplotní stálost
- termickým rozkladem nesmí vznikat škodlivé produkty
- dostatečnou tepelnou vodivost a dobrý přestup tepla do podkladu, dobrou soudržnost s podkladem
- minimální reaktivnost s povrchem materiálu
- minimální reflektivitu

Jako antireflexní povlaky pro transformační zpevnění ocelí a litin bez natavení jsou užívány tyto typy povlaků:

/ 6 /

1. Povlaky s absorpční látkou grafit

- 1a - Lipová suspenze koloidního grafitu
- 1b - Grafitový spray - mazadlo
- 1c - Vypalovací grafitový lak pro zabíhání motorů

Všechny varianty mají jednoduchý způsob nanášení, snadnou odstranitelnost povlaku mechanicky, povlaky hoří, při ozařování ztrácí absorpční schopnost, vyvýjejí neškoklivé zplodiny, nahličující povrch v oblasti blízké bodu tání. Absorpce je 80%.

2. Povlaky s absorpční látkou saze, případně s obsahem matovadel

- 2a - Saze vyvinuté na povrchu součástí
- 2b - Matový email - barva na tabule /pomalu schnoucí/

2c - Vhodně pigmentované nátěrové hmoty např. černá Rallye spray

Jednoduchý a pohodový způsob nástřiku, rychle schnoucí, snadno odstranitelná ředidlem, vhodná zejména pro laboratoř, při ozařování hoří, vznikají poletující saze. V silných vrstvách špatné výsledky je nutné zajistit rovnoměrnou tenkou vrstvou barvy, jinak špatná reprodukovatelnost. Absorpce velmi dobrá.

2d - Černá barva bez matovadel - horší absorpce

3. Povlaky kysličníků s různými pojivy

3a - TiO_2 bílá tempera, TiO_2 s pojivem

Dobrá absorpce, snadný způsob nanášení, tepelná stálost a malá reaktivita, snadná odrazitelnost.

3b - CuO , MnO_2 aj- nebezpečí oxidace povrchu kovu, zejména při natavení

4. Ostatní anorganické práškové látky nanášené s pojivy

MnSO_4 , MoS_2 , SiO_2 , Al_2O_3 v nitrolaku, v lihovém laku, množství pojiva je nutné udržovat minimální.

5. Povlak fosfátů vzniklý v lázni

5a - fosfát zinečnatý, např. Synfát 1 100, 1 500 aj.

5b - fosfát manganatý, např. Synfát 1 400

Dobře reprodukovatelné nanášení v reakční lázni, manganatý fosfát má výbornou absorpci, minimální reaktivitu s povrchem, žádné zplodiny. Nelze však odstranit mechanicky, nutno mořit v lázni.

6. Povlaky kovových prášků

6a - stejného složení jako ozařovaný kov - netečné k podkladu

6b - rozdílné složení - využíváno jako reaktivní povlak

7. Netradiční povlaky na bázi bentonitů a organomontmorilomitů
V praxi jsou nejčastěji užívány povlaky grafitu, nátěry obsahující saze, s matovadlem a manganaté fosfáty. Při některých průmyslových aplikacích je využívána rovněž povrchová oxidace kyslíkem těhem ozáření, přičemž vznikají tenké absorbující povlaky oxidů železa.

Nejdůležitějším požadavkem pro antireflexní povlak je jeho účinnost. Účinnost povlaku je určována relativně zkouškou transformačního zpevnění uhlíkové oceli. Za kritérium účinnosti je považována hloubka transformované vrstvy po ozáření povrchu s antireflexním povlakem za konstantních zvolených podmínek. Povlaky, při nichž vznikají větší hloubky transformované oblasti jsou efektivnější. Opticky měřená reflektivita nebo absorptivita povlaku nemusí být objektivním kritériem vhodnosti povlaku, protože účinnost povlaku závisí kromě na absorptivitě také na teplotní vodivosti a přestupu tepla z povlaku do povrchu kovu.

Druhým nejdůležitějším požadavkem na antireflexní povlak je dobrá reprodukovatelnost nanesení. U reakčních způsobů vytváření povlaku je možné reprodukovatelnost zajistit přesným dodržením reakčních podmínek a doby reakce /černění a fosfátování/.

U povlaků na bázi nátěrových hmot je nejdůležitějším faktorem dodržení tloušťky povlaku. Lze zajistit dodržením viskozity nanášeného povlaku a přesně určeným počtem nástřiků. Například u povlaků vytvářených barvou černá Rallye spray jsou nejefektivnější povlaky o tloušťce cca $10 \mu\text{m}$ / 6 /

/vrstva barvy, která pokryje povrch kovu, aby neprosvítal/. Povlaky o tloušťce 30 - 40 μm mají nižší efektivitu / vznikají menší hloubky zakalené vrstvy/. Připoužití ještě silnějších povlaků nedojde vůbec k austenitizaci oceli, pravděpodobně v důsledku izolačního chování silné vrstvy povlaku.

Používají-li se antireflexní povlaky při laserovém natavování, legování, příp. povlakování, nastávají další dva důležité problémy:

- rozklad antireflexních povlaků vlivem vysoké teploty blížící se bodu tání
- reakce antireflexních povlaků, či jejich zbytků s taveninou, ovlivnění chemického složení natavené oblasti, případně tvorba nežádoucích vměstků či reakčních produktů.

2.8 Kvantitativní popis absorpce

Všechny postupy zpracování materiálu pomocí laseru jsou založeny na pohlcování záření povrchem materiálu. Toto pohlcování záření povrchem je však u většiny kovových materiálů jednak nízké, což samozřejmě snižuje účinnost postupu, a jednak značně proměnlivé, tj. závislé na množství různých faktorů, a to jak zpracovávané součásti, tak i parametrů záření.

Znalost podílu energie záření pohlceného povrchem je potřebná pro volbu parametru zpracování a nezbytná pro matematicko-fyzikální modelování probíhajících procesů. Laserové záření je pohlcováno povrchovou vrstvou. Tento jev popisujeme Lambertovým zákonem / 3 /

$$dI = -\alpha \cdot I \cdot dx \quad (9)$$

což po integraci dává

$$I = I_0 \cdot \exp / -\alpha \cdot x / \quad (9a)$$

kde α ... koeficient absorpce záření

I ... intenzita záření v hloubce x

I_0 ... intenzita záření v hloubce $x = 0$

2.9 Mechanismus absorpce záření kovy

Jak plyne ze zákona zachování energie (2), pro absorpci kovy, kde $T = 0$, nastává zvláštní případ

$$A = E = 1 - R \quad (10)$$

kde A ... absorpce

E ... emisivita

R ... odrazivost při normálovém dopadu záření

Hodnoty R a A je možné vyčíslit v daném okamžiku měření stálých optických veličin nebo komplexního indexu lomu. Kovy totiž na rozdíl od průzračného dielektrika mají komplexní index lomu. Je to spjato s tím, že v kovu zaniká světelná vlna, což je podmíněno intenzivním zářením vln odražených elektrony. Na Jouleovo teplo se přemění poměrně malá část energie pole. O tom svědčí intenzita odražené vlny nehledě na to, že kovy v tlustých vrstvách jsou nepropustné pro světelné vlny.

Při komplexním indexu lomu $m = n - i \cdot k$ je odrazivost při normálovém dopadu záření rovna / 1 /

$$R = [/ n - 1 / ^2 + k^2] / [/ n + 1 / ^2 + k^2] \quad (11)$$

kde n ... index lomu

k ... index absorpce

a absorpce je rovna

$$A = 4n / [/ n + 1 / ^2 + k^2] \quad (12)$$

Řešením vztahů pro koeficient absorpce, které vycházejí z klasické elektrodynamiky dospějeme / 11 /

$$A = \text{konst} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}} \quad (13)$$

kde A ... pohltivost

ρ ... elektrický odpor

T ... teplota

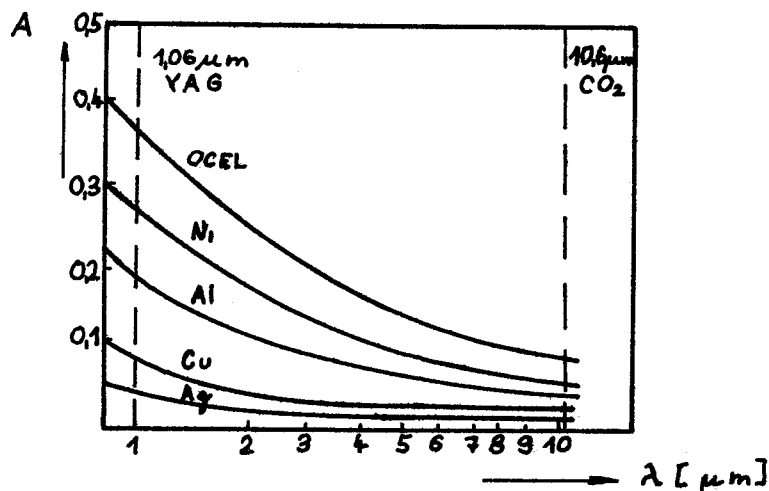
λ ... vlnová délka dopadajícího záření

Pro vlnovou délku záření CO₂ laseru $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ uvádí / 8 / rovnici

$$A = 112,2 \cdot \sqrt{\rho(\Omega)} \quad 14$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že rozhodující veličinou při určování schopnosti látky pohlcovat záření CO₂ laseru, je elektrický odpor daného materiálu.

Na obrázku č. 3 je uvedena závislost absorpce leštěných povrchů na druhu kovu a vlnové délce dopadajícího záření.



obr. 3 Závislost absorpce na vlnové délce

Kovy s nízkým el odporem / Ag, Cu, Al / mají vysokou odrazivost. Z tohoto vyplývá, že bez absorpční úpravy je laserové

tepelné zpracování vyloučeno. Větší absorpční schopnost má ocel v důsledku většího elektrického odporu ale přesto je odrazivost větší než 90% při $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$.

2.10 Mechanismus laserového záření polovodičů a dielektriky

Pohlčení paprsku dielektriky silně závisí na délce vlny. V IČ oblasti je pohltivost určena kmitavými stavy krystalické mřížky a u organických sloučenin mezimolekulárními kmity. V této oblasti jsou typické hodnoty koeficientu pohlčení $\alpha = 10^2$ až 10^4 cm^{-1} / 17 /. Koeficient absorpce může být vztažen k propustnosti vrstvy o tloušťce x vztahem (9). Užitečnou mírou tloušťky, na které dojde ke značnému oslabení dopadajícího paprsku je $L = 1/\alpha$, kde L je délka zeslabení. Pro silné pohltitele $\alpha = 10^6 \text{ cm}^{-1}$ a $L = 10^{-6} \text{ cm}$, pro slabé pohltitele $\alpha = 10 \text{ cm}^{-1}$ a $L = 10^{-1} \text{ cm}$. Vztah mezi α a indexem lomu má tvar / 17 /

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = 4 \quad (15)$$

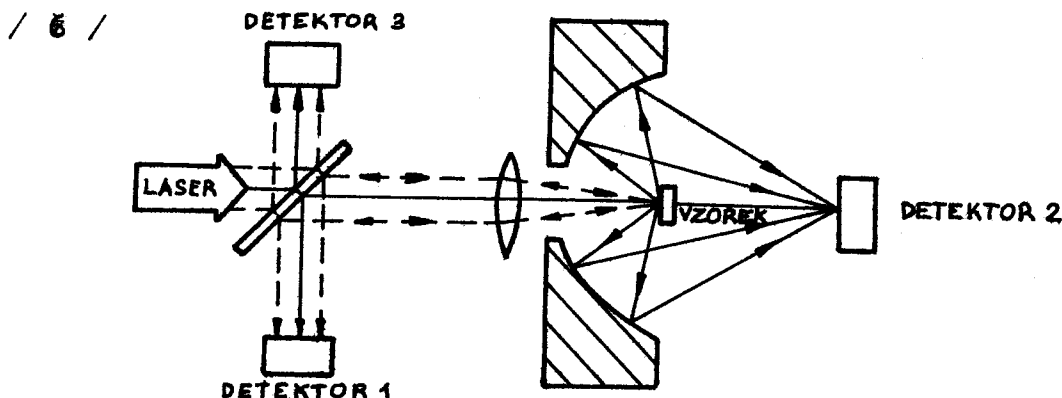
kde k je imaginární část komplexního indexu lomu $m = n - ik$ a λ je délka vlny dopadajícího záření. Ve viditelné oblasti pro formálně průzračné materiály je obvykle $k \sim 10^{-5}$ a $\alpha \sim 10 \text{ cm}^{-1}$. Na rozdíl od kovů, ve kterých pohlčení záření probíhá na povrchu ve skin-vrstvě, pohlčení v dielektriku a množství polovodičů probíhá v délce zeslabení L , která může být silnější než skin-vrstva.

V IČ oblasti $L \geq 10^{-4} \text{ cm}$ a v mnohých případech může být ohřev oběmový. Často se to vztahuje k ohřevu tenkých plechů, kde L může převyšovat tloušťku plechu.

3. METODY ZJIŠŤOVÁNÍ ABSORPCE

3.1 Metoda spočívající v měření dopadajícího, difuzně a přímo odraženého výkonu

Podstata této metody je zřejmá z její ilustrace viz obr. 4.



obr. 4. Metoda spočívající v měření dopadajícího difuzně a přímo odraženého výkonu.

Dopadající a přímo odražený výkon se měří za polopropustnou Zn-Se destičkou detektorem 3, respektive 1. Difúzně rozptýlený podíl se fokusuje do detektoru 2 rotačním elipsoidem.

Intenzita a doba záření se stanoví tak, aby nedešlo k natavení povrchu, eventuálně k destrukci absorbuujících vrstev. Při respektování ztrát v jednotlivých optických prvcích lze ze třech signálů detektorů zjistit absorbovaný výkon součástí takto

$$P_{\text{abs}} = P_3 - / P_2 + P_1 / \quad (16)$$

kde P_3 ... je výkon naměřený na detektoru 3

P_2 ... výkon naměřený na detektoru 2

P_1 ... výkon naměřený na detektoru 1

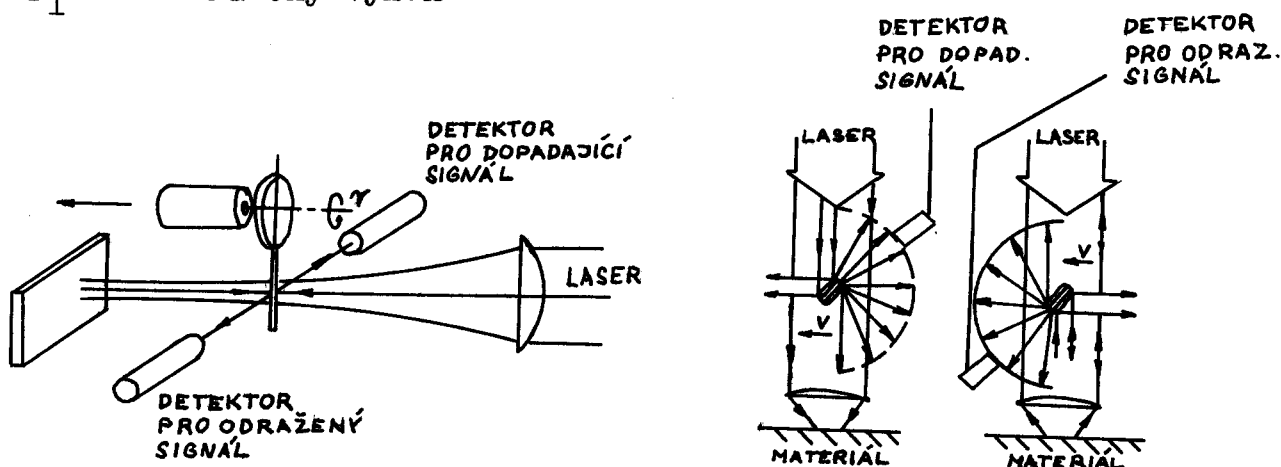
3.2 Metoda rotujícího drátu

Tato metoda se využívá např. k měření odrazu záření během laserového svařování. Drát je zbroušen tak, že jeden detektor udává jen dopadající a druhý jen odražený laserový signál. Průběh dráhy paprsků je znázorněn v druhé části obrázku č. 5 ve dvou schématech / 6 /. Tyto dva signály se přijímají současně. Z těchto dvou údajů lze zjistit absorbovaný výkon takto

$$P_{\text{abs}} = P_2 - P_1 \quad (17)$$

kde P_2 ... dopadající výkon

P_1 ... odražený výkon



obr. 5. Metoda rotujícího drátu

3.3 Metoda kalorimetrická

Kalorimetrickou metodou měření pohltivosti energie používáme pro měření pohltivosti povrchu v podmínkách ohřevu laserovým zářením ocelových vzorků, při konstantním času působení Δt / 10 /.

absorpci vyjadřujeme vztahem

$$A = \frac{(\theta - T_{wo}) / (C_w M_w + C_c M_c) - (T_{mo} - \theta) / C_m M_m}{P_o \cdot t} \quad (18)$$

kde M_w , M_c , M_m jsou hmotnosti vody kalorimetru a kovového materiálu

C_w , C_c , C_m - příslušná měrná tepla

T_{wo} - počáteční teplota vody v kalorimetru

T_{mo} - počáteční teplota materiálu

θ - teplota, která se ustaví po ponoření ozářeného vzorku do kalorimetru

P_o - výkon laseru

t - doba interakce záření

Výhodou této metody se jeví jednoduchost její realizace a nepřímé změření energie. Avšak je potřeba spolehlivého změření výkonu. Na druhé straně však můžeme měření výkonu vynechat, jestliže je možné provést změření teplotní vodivosti vzorku, kterého je pohlcovací schopnost rovna 1.

3.4 Metoda dle Hartha

Odráživost kovu podrobeného působení pozorovaného svazku paprsků CO_2 laseru není známa. Avšak odrazivost lze určit experimentálně. Odráživost je spojena s pohltivostí R_a

$$R = 1 - R_a \quad (19)$$

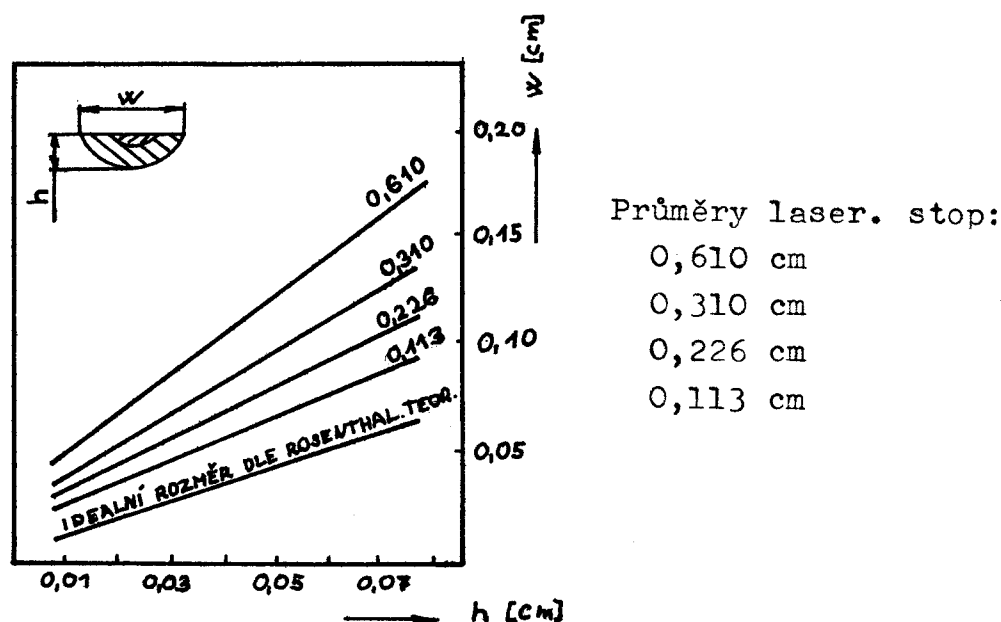
Pohltivost můžeme zjistit měřením oblastí příčného průřezu A_o , tepelně ovlivněného kovu vzniklé posuvem svazku paprsků laseru a pozorováním této oblasti s oblastí příčného průřezu, který by vznikl /teoreticky/, kdyby všechna energie svazku byla absorbována. R_a je vztažena k A_o a $A_t / 2$

$$R_a = \frac{A_o}{A_t} \quad (20)$$

Předpokládejme, že velikost tepelně ovlivněné oblasti je přímo úměrná energii absorbované kovem, Rosenthal zavedl teoretické rovnice požadující vztažení tepelně ovlivněných oblastí k energii absorbované od posouvaného bodového tepelného zdroje laserového svazku. Známe celkovou energii laserového svazku použitou v experimentech. Rosenthalovy rovnice nám však umožňují vypočítat A_t . Změřením A_o a vypočtením A_t pro daný experiment můžeme vyjádřit R_a a R .

Zvolme ke srovnání raději oblasti, než hloubky tepelně-
ho ovlivnění kovu. Rozdíl je důležitý vzhledem k možnosti nevhodné interpretace výsledků při pozorování hloubek tepelně ovlivněných oblastí. Je-li oprávněný bodový zdroj tepla, požadovaný teoretickou Rosenthalovou rovnicí, pak tepelně ovlivněná oblast má polokruhový obvod. Autoři uvádějí v experimentech / 2 /, že nemáme ideální bodový zdroj, jelikož laserový svazek má určitou šířku. Obvod oblasti zahrívané neideálním zdrojem je parabolický.

Abychom ilustrovali stupeň, do kterého se laserový tepelný zdroj použitý v experimentech může lišit od bodového zdroje, vyvíjíme obr. 6., který je vynesáním šířky proti hloubce tepelně ovlivněné oblasti. Údaje jsou porovnány s ideálním vztahem podle teorie bodových zdrojů Rosenthala. Jelikož průměr laserové skvrny vzrůstá, odchylka od ideálního se stává větší viz obr. 6.



obr. 6. Porovnání odchylek dle Rosenthalovy teorie bodových zdrojů se skutečnými rozměry skvrn.

Dříve již vyvinutý diagram / 18 / byl použit k určení vztahu mezi laserovými parametry a odrazivostí.

$$H = \frac{R_a \cdot Q}{S} \quad (21)$$

kde H ... energie absorbovaná na jednotku délky pohybu

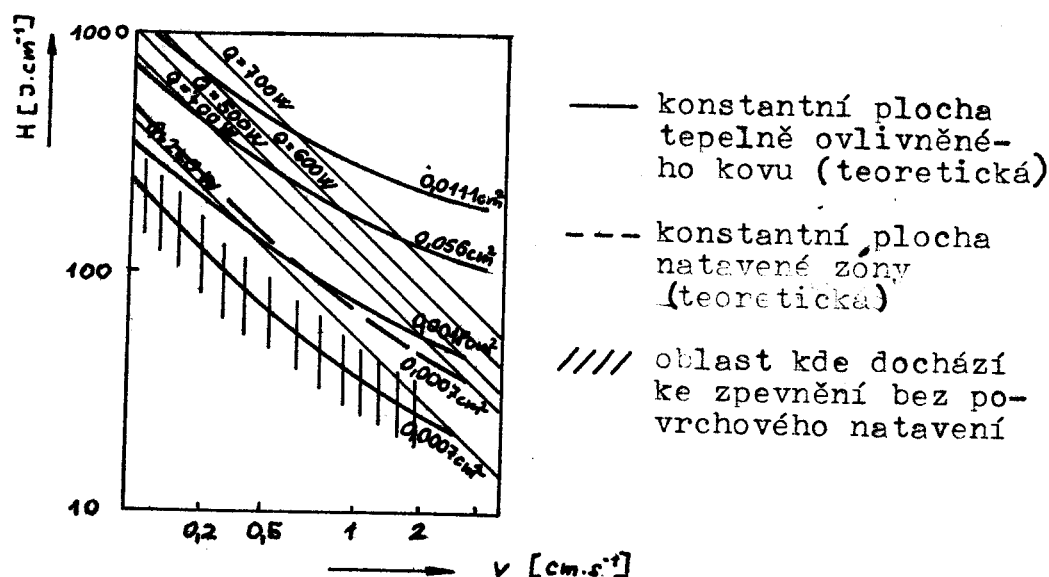
S ... posuvová rychlost

Q ... energie dodaná laserovým svazkem

v logaritmické formě

$$\log H = \log R_a \cdot Q - \log S \quad (21 a)$$

což je rovnice přímky vynesené v log H v závislosti na log S. V takovémto diagramu přímky konstantního $R_a \cdot Q$ jeví jako úhlopříčky / obr. 7./. Parametry H, R_a , Q a S určují velikost zpevnění oblasti při laserovém zpracování. Polohy uvnitř diagramu / obr. 7. / určují jednotlivé sady podmínek laserového zpracování.

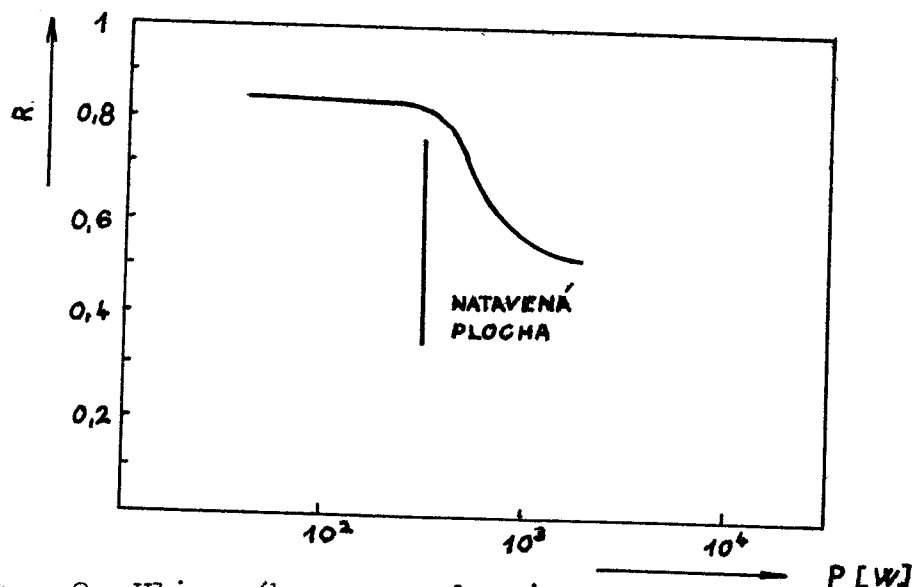


obr. 7. Závislost rychlosti posuvu na množství absorbované energie na jednotku délky při konst odrazivosti 0,81.

Čáry konstantních tepelně ovlivněných oblastí byly vypočteny a jeví se jako křivky na obr. 7.. Též lze vypočítat příčné průřezy oblastí natavení kovu. Jedna čára konstantní natavené oblasti byla vypočtena a vynesena v obr. 7.. Šrafovaná oblast je přibližná oblast, kde dochází ke zpevnění bez podstatného natavení. Teoretická oblast příčného řezu zpevnění vzniklého posuvem laserového svazku, která nevykazuje podstatnější natavení je $0,0007 \text{ cm}^2$.

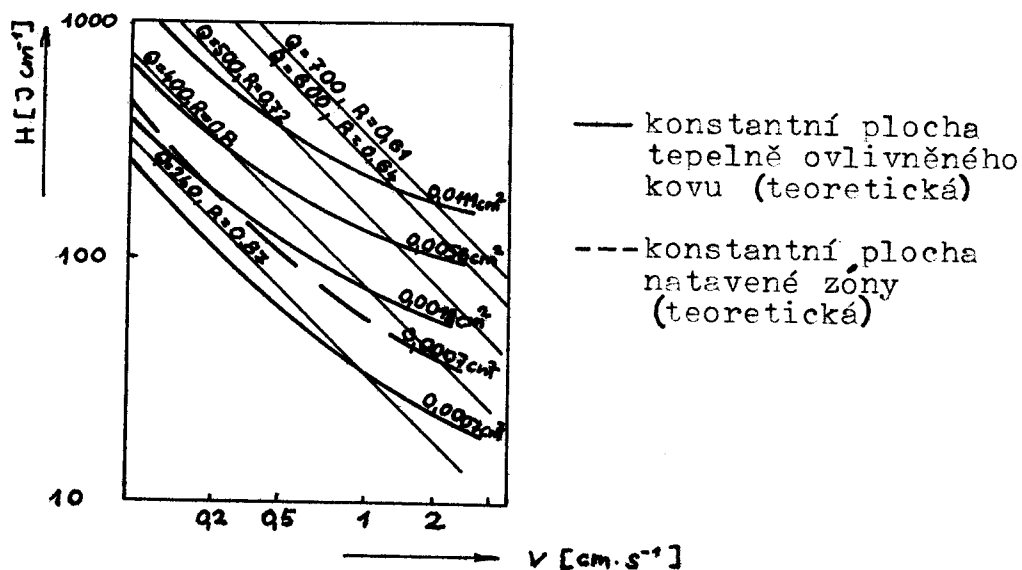
Čáry konstantních teoretických oblastí tepelného ovlivnění a natavení v obr. 7. předpokládají úplnou absorpci laserové energie. Při vynášení experimentálních dat v obr. 7. můžeme odrazivost volit tak, aby se naměřená tepelně ovlivněná oblast shodovala s teoretickou. Hodnoty laserových parametrů v našich experimentech spolu s odpovídajícími naměřenými tepelně ovlivněnými oblastmi jsou vyneseny v obr. 7.. Na obr. 7. předpokládáme konstantní odrazivost 0,81, která nejlépe vyhovuje experimentálním údajům laserového tepelného zpracování.

Odráživost ocelí s povlaky vystavených stacionárnímu působení svazků laseru se mění s výkonem laseru, jak je ukázáno na obr. 8.



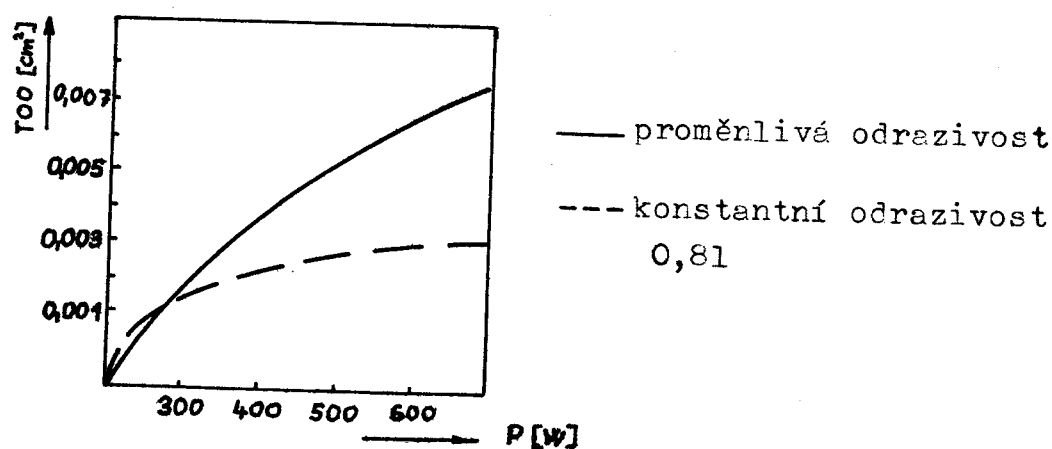
obr. 8. Vliv výkonu na odráživost

Autoři se pokusili určit, zda odráživost pohybujícího se svazku laseru se mění podobným způsobem. Údaje z obr. 7. byly znovu vyneseny s předpokladem, že R se mění způsobem označeným v obr. 8. Předpokládáme, že se R mění od 0,61 do 0,87, jelikož výkon se mění ze 700 na 240 W. Měřná oblast odpovídá lépe teoretickým předpokladům / obr. 9. /

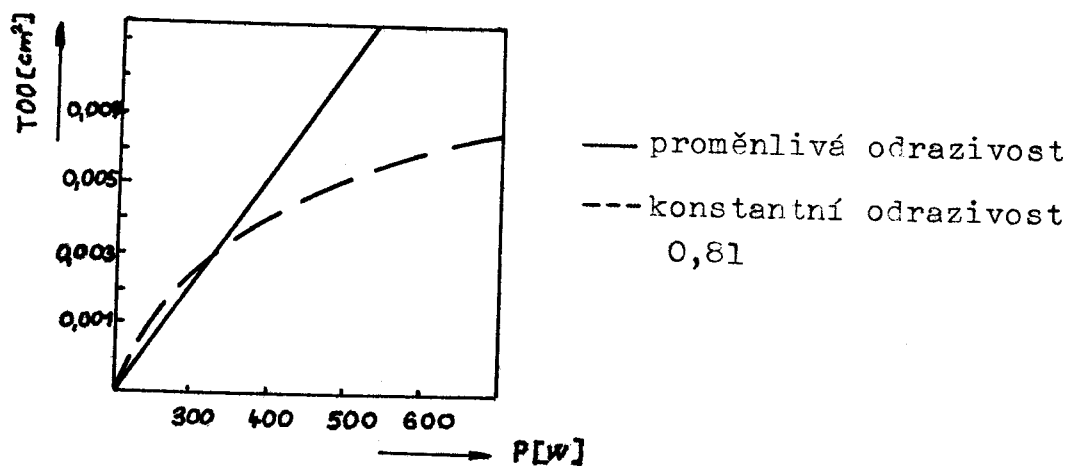


obr. 9. Závislost rychlosti posuvu na množství absorbované energie na jednotku délky při proměnné odrazivosti 0,61 a 0,87

Zlepšení souhlasu teorie a experimentu je lepší v obr. 10 a 11. odvozených z obrázků 9. a 8.. Použití proměnlivé odrazivosti velmi zlepšuje souhlas teorie a experimentu.



obr. 10. Závislost výkonu na tepelně ovlivněné oblasti při $S \neq \text{konst.}$



obr. 11. Závislost výkonu na velikosti tepelně ovlivněné oblasti při $S = 0,85 \text{ cm}^{-1}$.

Tato data experimentu ukazují, že odrazivost ocelí s povlaky vystavených posuvu laserového svazku se mění s výkonem způsobem podobným obr. 8.

Údaje v obr. 9. poskytují zajímavý výsledek. Mění-li se odrazivost, jako v obr. 8., pak lze pozorovat silný pokles odrazivosti z obr. 9..s oběvením se počátku významného natavení / jak je definováno čarou $0,0007 \text{ cm}^2$ na tavené oblasti/. Zatímco tyto experimenty nepotvrzují, že odrazivost souvisí s výskytem povrchového tavení, údaje výrazně ukazují, že další studium této možnosti je oprávněno.

Při laserovém zpevňování je všeobecně žádoucí, získat co možná nejhlubší zpevnění a zabránit povrchovému natavení. Je obtížné vyhovět oběma požadavkům. Obr. 9. ukazuje, že podstatná množství tepelně ovlivněných ocelí vznikají pouze při výskytu tavení. Tedy laserové tepelné zpracování s malým průměrem skvrny dává mělké zpevněné vrstvy. Bylo by však možné zvětšit hloubku zpevnění bez natavení, použitím svazků s větším průměrem, tj. použitím výkonějšího laseru, ale udržováním energie a hustoty výkonu v požadovaném intervalu.

3.5 Měření absorpce pomocí optických přístrojů

Měření absorpce světla se provádí pomocí spektrofotometru. Spektrofotometr je přístroj určený ke srovnání různých úseků spektra stejných zdrojů. Je to spojení spektrálního přístroje a fotometru / 18 /.

Měření absorpce spektrofotometry lze provádět v podstatě libovolným spektrálním fotometrem. Velká část spektrofotometrů je již přímo konstruována pro měření absorpce a vybave-

na příslušnými zařízeními, tj. zdrojem světla a držákem vzorků.

K měření absorpce můžeme použít buď subektivní fotometr nebo jednoduchý obektivní spektrální fotometr. Všechny subektivní fotometry pracují tak, že zorné pole přístroje je rozděleno na dvě nebo více částí, z nichž některé jsou osvětleny měřeným zdrojem a jiné referenčním zdrojem stejné barvy. Osvětlení pocházející od referenčního zdroje lze přitom definovaně měnit. Přístroj se nastaví tak, aby celé zorné pole bylo stejně jasné a podle jeho nastavení se pak určuje daná vlastnost měřeného zdroje.

Proto při použití subektivního fotometru je třeba použít tzv. dvoupaprskové uspořádání. Světlo zdroje se při něm dělí na dva paprsky stejné intenzity, z nichž jeden prochází měřeným vzorkem, druhý vzorkem srovnávacím. Fotometrem určíme poměr světelných toků, které prošly vzorky a získáme tak hodnotu transmitace. Abychom vyloučili chyby vzniklé nestejnou propustností optické soustavy pro oba paprsky, je třeba měření opakovat při záměně obou vzorků a brát z obou vzorků výslednou průměrnou hodnotu, nebo provést kontrolní měření se dvěma stejnými vzorky a určit příslušnou korekci. Jako referenční vzorek je vhodné volit podobný materiál jako vzorek měřený, v němž však nedochází k absorpci.

Při použití jednoduchého obektivního spektrofotometru se používá jednopaprskového uspořádání. V tomto případě, se světelný paprsek ze zdroje nedělí a měrný a referenční, vzorky se do jeho dráhy vkládají postupně. Z podílu naměřených svě-

telných toků lze vypočítat transmittací podobně jako v předchozím případě. Nevýhodou jednopaprskového uspořádání je, že se výsledek zatíží chybami způsobenými kolísáním svítivosti zdroje světla, není-li tento zdroj dostatečně stabilní.

Při měření absorpce kovových materiálů není možné získat hodnotu transmittace, což je podíl světelného toku na látku dopadajícího ku světelnému toku látkou prošlého, poněvadž hodnota záření prošlého kovem se blíží nule. Proto se u kovu měří světelný tok odražený od povrchu kovu, čímž dostaneme hodnotu reflektivity R a ze vztahu $A = 1 - R$ dostaneme hodnotu absorpce A . K tomuto měření je třeba, aby byl spektrofotometr vybaven tzv. integrační koulí, která zachytí světelný tok, který se odrazí od povrchu měřeného materiálu. Tímto způsobem lze vyhodnotit absorptivitu různých povrchových úprav na kovech.

4. MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL

4.1 Matematicko-fyzikální model absorpce laserového záření systém povlak - kovový substrát

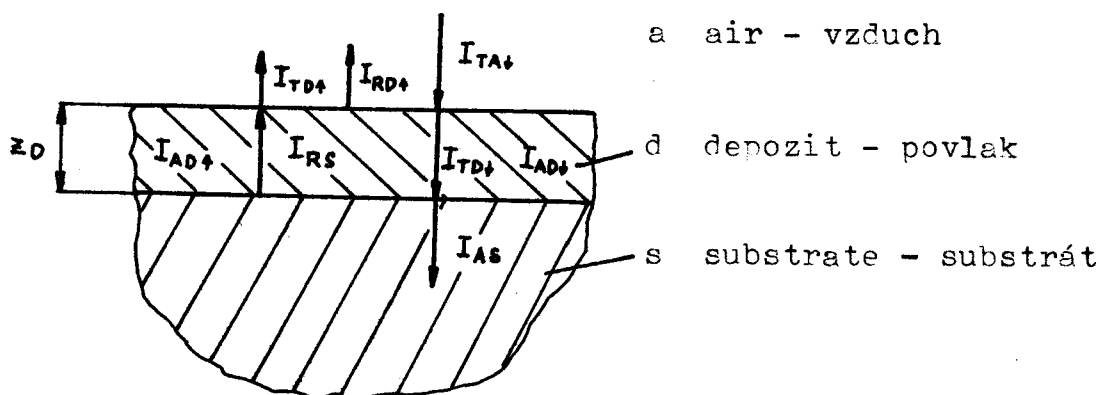
Znalost podílu energie záření pohlceného povrchem je potřebná pro volbu parametru zpracování a nezbytná pro matematicko-fyzikální modelování.

Matematická formulace modelu absorpce laserového záření systém povlak- kovový substrát vychází z Lambertova zákona

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad (9 \text{ a})$$

kde I_0 vyjadřuje intenzitu dopadajícího záření, α je koeficient absorpce, a I je intenzita záření v hloubce x .

Kvantitativní popis modelu je znázorněn na obr. 12



kde $I_{Ta} = I_0 \dots$ záření vystupují z laseru

$I_{Rd\uparrow} = I_1 \dots$ záření odražené povlakem

$I_{Td\downarrow} = I_2 \dots$ záření vstupující do povlaku na rozhraní
povlak vzduch

$I_{Ad\downarrow} = I_3 \dots$ záření pohlcené povlakem při přímém průchodu

$I_{AS} = I_4 \dots$ záření pohlcené kovem

$I_{RS} = I_5 \dots$ záření odražené kovem

$I_{AD\uparrow} = I_6 \dots$ záření pohlcené povlakem při zpětném průchodu

$I_{Td\uparrow} = I_7 \dots$ záření vyšlé zpět z povlaku

obr. 12. Kvalitativní nákres matematicko-fyzikálního modelu absorpce LZ.

Při matematické formulaci modelu absorpce laserového záření se předpokládá, že I_0 je intenzita dopadajícího záření, R_D odrazivost povlaku, α_D koeficient povlaku, z_D tloušťka povlaku.

Laserové záření, vystupující z laseru intenzity I_0 , se šíří vzduchem (a). Při dopadu záření intenzity I_0 na povrch systému povlak-substrát na rozhraní vzduch (a) - povlak (d), se část záření I_0 odrazí, což se vyjadřuje

$$I_{Rd\uparrow} = I_1 = R_D \cdot I_0 \quad (22)$$

zbylá část záření vstupuje do povlaku jako

$$I_{Td\downarrow} = I_2 = / 1 - R_D / \cdot I_0 \quad (23)$$

Část záření $I_{Td\downarrow}$, které vstoupilo do povlaku, se v povlaku pohltí. Tato pohlcená část záření se vyjadřuje s využitím Lambertova zákona

$$I_{Ad\downarrow(A,D)} = I_3 = / 1 - R_D / \cdot I_0 \cdot e^{-\alpha_D z_D} \quad (24)$$

Část záření, které vstoupilo do povlaku a nebylo pohlceno povlakem a na rozhraní povlak (d) - substrát (s) se část záření pohltí substrátem.

$$I_{AS(D,S)} = I_4 = I_{Ad\downarrow} \cdot / 1 - R_S / = / 1 - R_D / \cdot / 1 - R_S / \cdot I_0 \cdot e^{-\alpha_D z_D} \quad (25)$$

Ta část záření, která se substrátem nepohlítí, se na rozhraní substrát (s)- povlak (d) odráží

$$\begin{aligned} I_{RS\uparrow} &= I_5 = I_{Td\downarrow} - I_{Ad\downarrow} + I_{AS} / = \\ &= /1-R_D/.I_0 e^{-\alpha_0 z_0} + /1-R_D/. /1-R_S/. I_0 . e^{-\alpha_0 z_0} = \\ &= /1-R_D/. [1-e^{-\alpha_0 z_0} / 2-R_S /] . I_0 \end{aligned} \quad (26)$$

Odražené záření I_{RS} nám opět prochází povlakem, kde část záření pohlítí

$$I_{Ad\uparrow} = I_6 = I_{RS\uparrow} . e^{-\alpha_0 z_0} = /1-R_D/. e^{-\alpha_0 z_0} [1-e^{-\alpha_0 z_0} / 2-R_S /] I_0 \quad (27)$$

Ta část záření, která se při průchodu povlakem nepohltila, na rozhraní povlak (d) - vzduch (a) vychází zpět ze systému

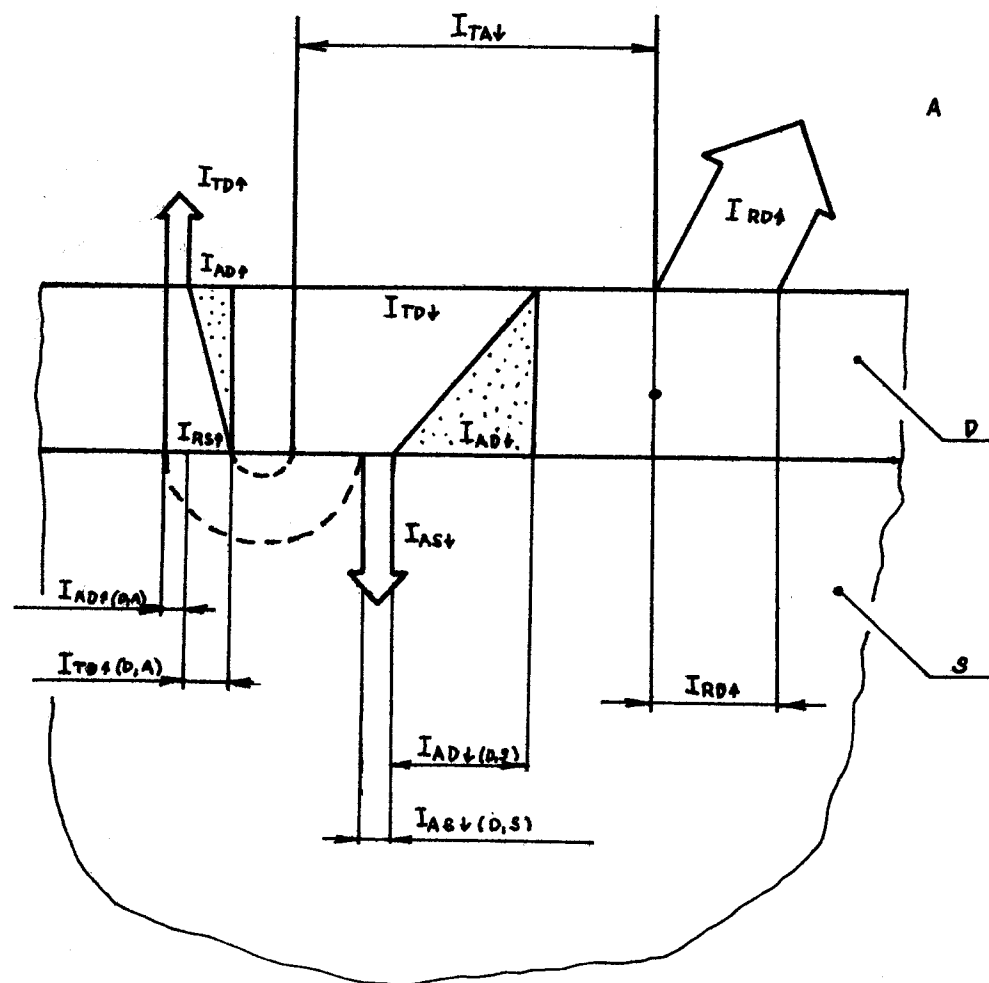
$$I_{Td\uparrow(a)} = I_7 = I_{RS\uparrow} - I_{Ad\uparrow} = /1-e^{-\alpha_0 z_0} /. \{ /1-R_D/. [1-e^{-\alpha_0 z_0} / 2-R_S /] \} I_0 \quad (28)$$

Celkové pohlčené záření systémem je vyjádřeno jako součet intenzit záření pohlčeného povlakem při přímém průchodu, pohlčeného substrátem a pohlčeného povlakem při zpětném průchodu

$$\begin{aligned} I_{A\omega} &= I_8 = I_{Ad\downarrow} + I_{Ad\uparrow} + I_{AS} = \\ &= /1-R_D/. e^{-\alpha_0 z_0} / 3-2e^{-\alpha_0 z_0} + e^{-\alpha_0 z_0} . R_S - R_S - R_D / . I_0 \end{aligned} \quad (29)$$

Celkově neabsorbované záření je vyjádřeno jako součet záření odraženého povlakem a záření vyšlého zpět ze systému

$$\begin{aligned} I_{Neabs} &= I_9 = I_{Td\uparrow} + I_{Rd\uparrow} = \\ &= /1-e^{-\alpha_0 z_0} /. /1-R_D/. [1-2e^{-\alpha_0 z_0} + R_S . e^{\alpha_0 z_0}] I_0 + R_D . I_0 \end{aligned} \quad (30)$$



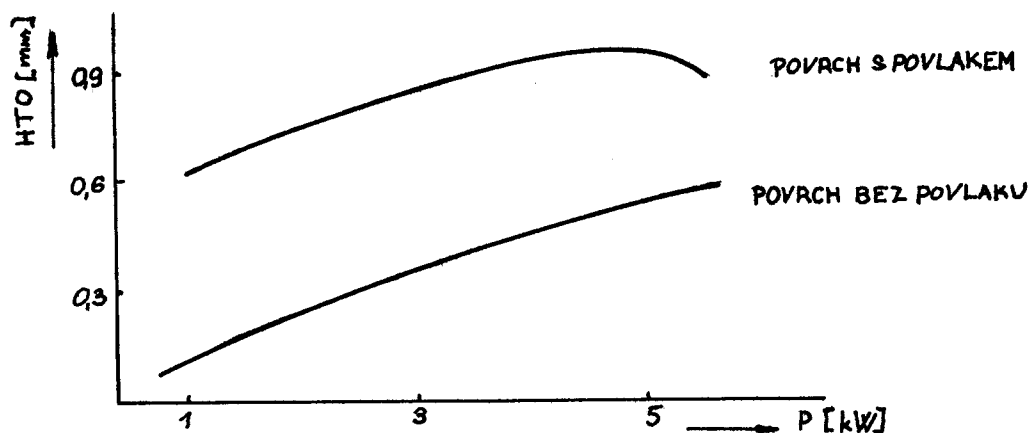
A - vzduch
D - povlak
S - substrát

obr. 13. Kvantitativní nákres matematicko-fyzikálního modelu absorpce laserového záření

4.2 Přehled dat pro aplikaci na matematicko-fyzikálním modelu

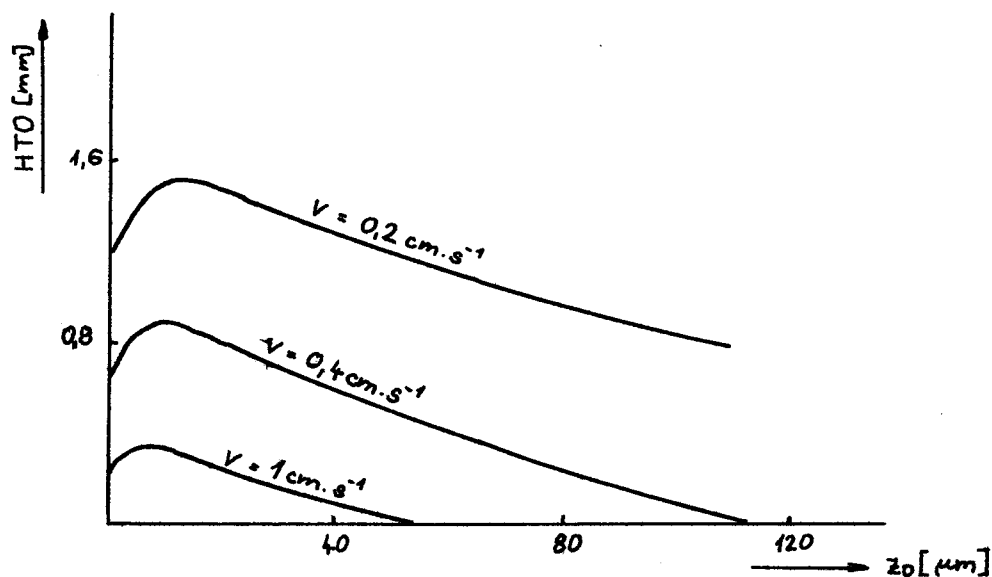
Z parametrů, které jsou potřebné pro aplikaci na matematicko-fyzikálním modelu jsou výkon laseru P , tloušťka povlaku, odrazivost povlaku, odrazivost kovu a absorpční koeficient povlaku α_p .

Jak již bylo řečeno, jedním z parametrů, který ovlivňuje absorpci laserového záření je výkon laseru. Jak je uvedeno na obr. 14 dle / 5 /, povrch s povlakem má značně větší účinnost než povrch bez povlaku v celém rozsahu výkonů. Pouze při maximálních výkonech 4,8 kW se účinnost povrchu s povlakem oproti povrchu bez povlaku snižuje. To lze vysvětlit změnou vlastností povlaků při působení teploty. Jako kritérium efektivnosti je brána hloubka tepelně ovlivněné oblasti.



obr. 14 Závislost hloubky tepelně ovlivněné oblasti na výkonu laseru

Dalším z parametrů, který ovlivňuje absorpci laserového záření je tloušťka povlaku. Tloušťka povlaku se opět vybírá z podmínky největší hloubky transformované oblasti. Závislost hloubky tepelně ovlivněné oblasti a tloušťky povlaku je znázorněná na obr. 15



obr. 15 Závislost hloubky tepelně ovlivněné oblasti a tloušťky povlaku

Maximální hloubka tepelně ovlivněné oblasti při rychlosti $0,2$ až 1 cm.s^{-1} je dosažena při tloušťce povlaku $5 - 10 \mu\text{m}$. Se zvětšením tloušťky povlaku do $30 \mu\text{m}$ se hloubka zakalení sníží o 30% , přičemž další zvětšení tloušťky povlaku vede k prudším změnám zmenšení hloubky tepelně ovlivněné oblasti, především pro velké rychlosti zpracování. Nepravidelnost tloušťky povlaku způsobuje značný rozptyl velikosti transformované oblasti. Proto je nutno zajistit dobrou rovnoměrnost a reprodukovatelnost tloušťky nanášených povlaků.

Dalším parametrem je odrazivost povlaku R_D . Studium odrazivosti některých povlaků se zabývali Heger a Faistauer / 14 /, / 15 /. Odrazivosti některých povlaků jsou znázorněny v tabulkách. 1. a 2. .

Povrchová úprava	odrazivost R_D [%]
BRUNIGAL	18,08
SYNFÁT 1409	8,07
SYNFÁT 1500	23,89
ZÁSADITÁ OXIDACE	11,82
KYSELÁ OXIDACE	9,96
RALLYE 0199	4,55
CHEMICKÉ LEPTÁNÍ HNO_3	21,38
GRAFIT	11,32
HNO_3 + GRAFIT	10,37
Al_2O_3	40,00

tab. 1 Odrazivost povrchových úprav / 14 /

Povrchová úprava	odrazivost R_D [%]
SYNFÁT 1100	10,97
SYNFÁT 1500	17,29
SYNFÁT 2030	22,59
Chemické černění	5,236
Chemické leptání	23,82
Barva celox	4,90
RALLYE 0199	3,47
Anorganický povlak	25,21

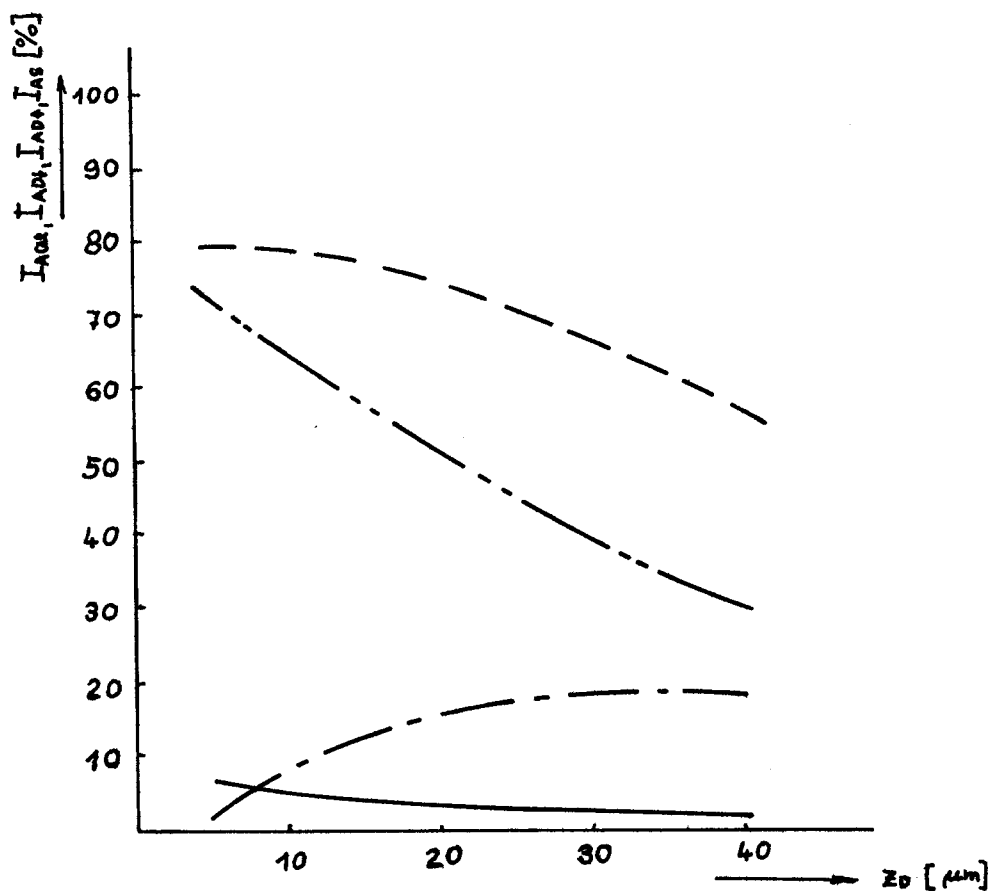
tab. 2 Odrazivosti povrchových úprav / 15 /

Obě dvě měření byly prováděny na spektrofotometru s integrační koulí. Záření, které bylo k měření odrazivosti použito, mělo vlnovou délku $1,06\mu m$. Ačkoliv byla měření prováděna nezávisle na sobě, při porovnání obou tabulek docházíme ke stejným výsledkům.

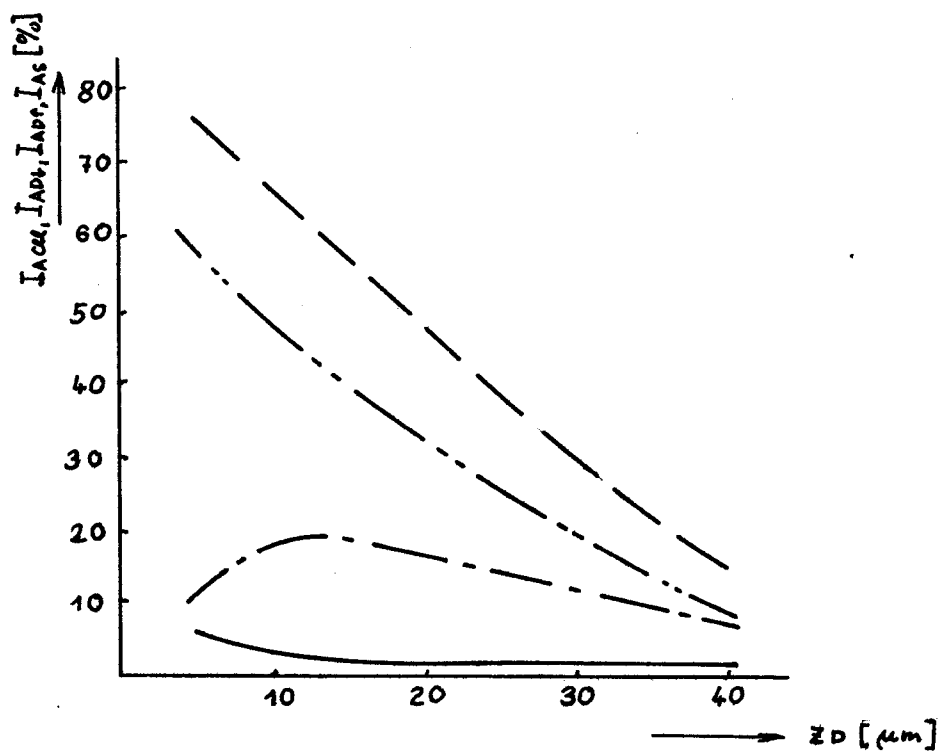
Dalším parametrem pro aplikaci na modelu je odrazivost substrátu. Jak udává Engel / 19 / pro vlnovou délku $1,06\mu\text{m}$ je odrazivost substrátu $R_S = 0,85$ a pro vlnovou délku $10,6\mu\text{m}$ CO_2 laseru je odrazivost substrátu $R_S = 0,9$.

Dalším parametrem pro aplikaci na modelu je absorpční koeficient povlaku. Absorpční koeficient povlaku byl zvolen dle Mc. Lachlana / 7 /, který uvádí $\alpha = / 375 \pm 25 / \cdot 10^2 \text{m}^{-1}$ pro hliníkovou fólii. Dále bylo čerpáno dle DULLEY / 17 /, který uvádí pro polovodiče a dielektrika α v rozmezí 10^4 až 10^6cm^{-1} . Toto rozmezí je dále použito při aplikaci na matematicko-fyzikálním modelu. Byl zkoumán vliv α na záření celkově pohlceném systémem I_{AQ} , záření pohlceném povlakem při přímém průchodu I_{ADL} , záření pohlceném povlakem při zpětném průchodu I_{ADT} a záření pohlceném kovem I_{AS} , při různých tloušťkách povlaku. Za parametry laserového tepelného zpracování byla dosazována intenzita dopadajícího záření 100%, odrazivost povlaku $R_D = 0,9$, tloušťka povlaku byla uvažována v intervalu 5 až $40\mu\text{m}$. Některé z těchto závislostí jsou znázorněny v grafech na obr. 16 až obr. 20.

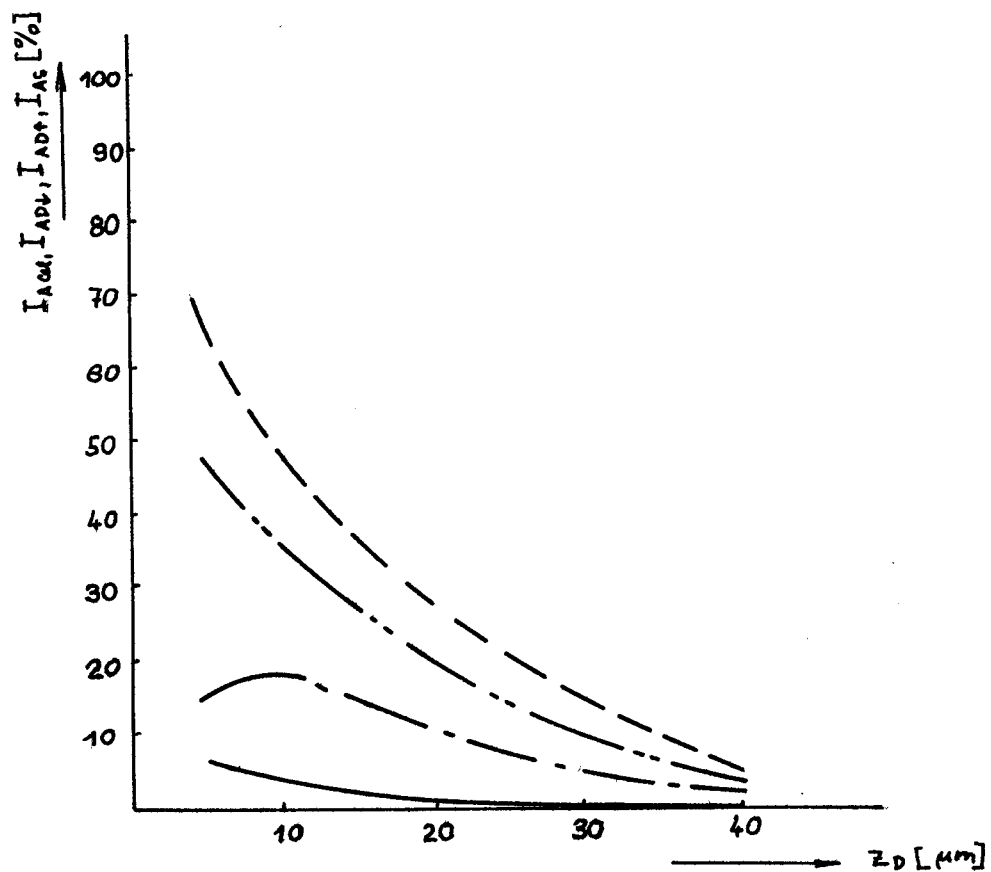
kde	-----	I_{AQ}	- záření celkově pohlcené
	-----	I_{ADL}	- záření pohlcené povlakem při přímém průchodu
	-----	I_{ADT}	- záření pohlcené povlakem při zpětném průchodu
	-----	I_{AS}	- záření pohlcené kovem



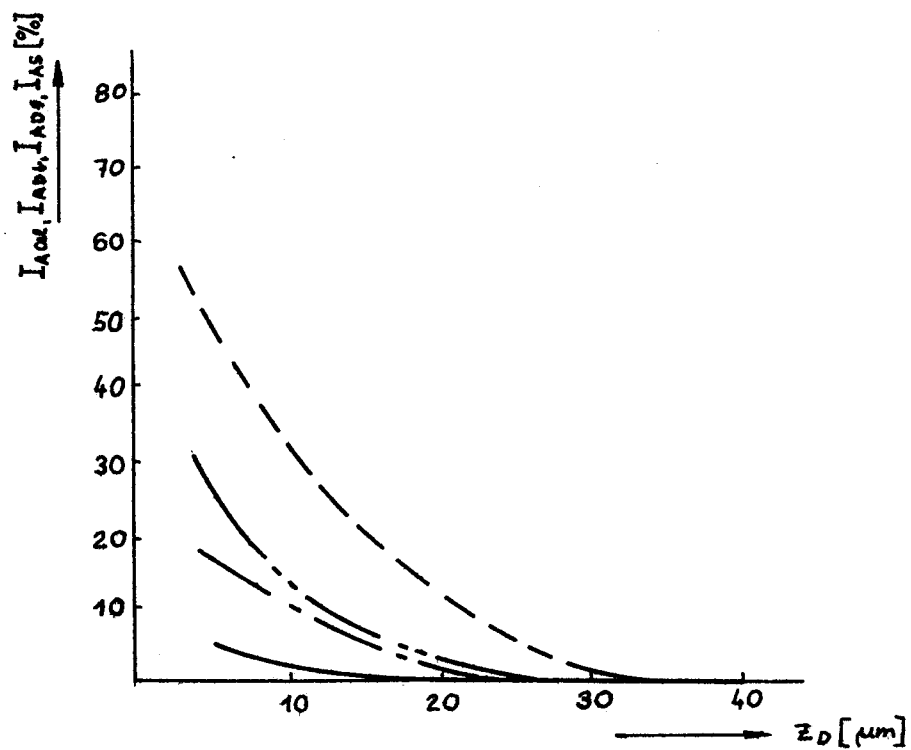
obr. 16. Závislost intenzit I_{AGE} , I_{AD+} , I_{AD-} , I_{AS} na tloušťce povlaku z při $\alpha = 20\,000\text{ m}^{-1}$



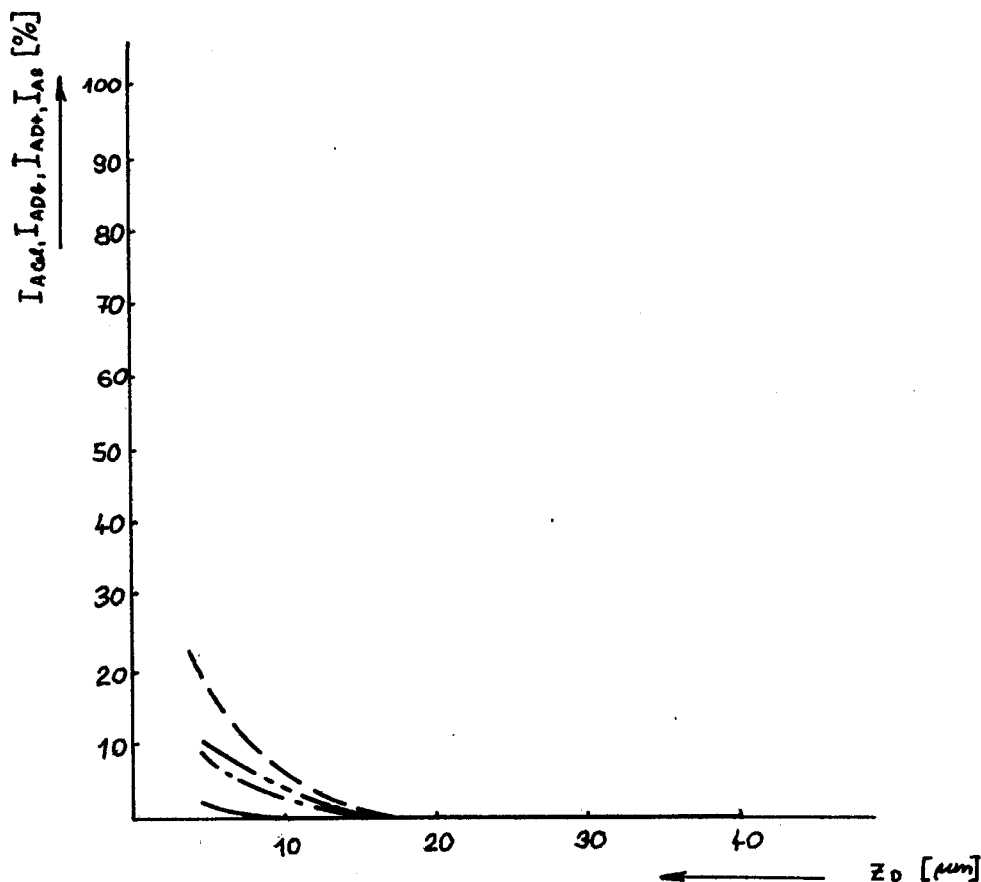
obr. 17. Závislost intenzit I_{AGE} , I_{AD+} , I_{AD-} , I_{AS} na tloušťce povlaku z při $\alpha = 60\,000\text{ m}^{-1}$



obr. 18. Závislost intenzit I_{AOI} , I_{AOI} , I_{AOI} , I_{AS} na tloušťce povlaku z při $\alpha = 100\,000\text{ m}^{-1}$



obr. 19. Závislost intenzit I_{AOI} , I_{AOI} , I_{AOI} , I_{AS} na tloušťce povlaku z při $\alpha = 200\,000\text{ m}^{-1}$



obr. 20. Závislost intenzit I_{Ac} , I_{AD+} , I_{AD} , I_{AS} na tloušťce povlaku z při $\alpha = 400\,000\text{ m}^{-1}$

Bylo zjištěno, že nejvíce energie se absorbuje při tloušťce $5\text{ }\mu\text{m}$ a s rostoucí tloušťkou povlaku absorpce klesá. Dále bylo zjištěno při zkoumání intervalu $\alpha = 10^4 - 10^6\text{ m}^{-1}$ /17 /, že s rostoucím koeficientem pohltivosti α absorpce systému klesá. Při $\alpha = 20\,000\text{ m}^{-1}$ a tloušťce $10\text{ }\mu\text{m}$ vychází celková pohltivost systému $I_{Ac} = 78,6\%$, při $\alpha = 100\,000\text{ m}^{-1}$ a tloušťce $10\text{ }\mu\text{m}$ $I_{Ac} = 49,7\%$, pro $\alpha = 200\,000\text{ m}^{-1}$ a tloušťce $10\text{ }\mu\text{m}$ $I_{Ac} = 21,12\%$, pro $\alpha = 600\,000\text{ m}^{-1}$ a tloušťce $10\text{ }\mu\text{m}$ $I_{Ac} = 0,42\%$ a pro $\alpha = 1\,000\,000\text{ m}^{-1}$ a tloušťce $10\text{ }\mu\text{m}$ je $I_{Ac} = 0,01\%$. Z tohoto je zřejmé, že pro dosažení maximální účinnosti systému z intervalu $\alpha = 10^4 - 10^6\text{ m}^{-1}$ /17 /, se volí povlak, který má α co nejmenší. Pro další zkoumání bylo zvoleno $\alpha = 20\,000\text{ m}^{-1}$.

4.3 Konkrétní parametry LTZ

V další části práce bylo provedeno proměření TOO na vzorcích oceli 12040 o rozměrech 100 X 40 X 10 mm. Materiál byl ozářen CO_2 laserem o $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$. Na materiál byla nanesena Rallye 0199 s různou tloušťkou povlaku. Parametry laserového tepelného zpracování byly: P v rozmezí 1,95 - 2 kW, rychlost posuvu 2 ms^{-1} , délka stopy 100 mm s defokusací na šířku stopy 5 mm. Tloušťka povlaku byla změřena na přístroji ULTRAMETR 52 polské výroby. Byla změřena jednak rovnoměrnost nanesení povlaku, jednak tloušťka povlaku v místě řezu. Z těchto hodnot byla vzata průměrná tloušťka povlaku v místě řezu. Byly provedeny metalografické výbrusy a na mikroskopu NEOP 2 proměřeny tepelně ovlivněné oblasti viz tab. 3.

vzorek č.	P [kW]	$Z_D [\mu\text{m}]$	HTO [mm]
1	2,05	22	0,30
2	2,00	17	0,29
3a	1,95	28	0,475
3b	2,00	23	0,50
3c	2,05	20	0,465
4	1,95	29	0,310
5	2,05	23	0,375
6	2,00	19	0,250
7	1,95	20,5	0,292
8	2,00	13	0,335
9	2,05	19	0,375
10	1,95	20	0,350

tab. 3. Hloubky tepelně ovlivněných oblastí při povlaku tvořeném Rallye 0199

Další parametry laserového zpracování a naměřené hloubky tepelně ovlivněných oblastí s různými typy a tloušťkami povlaků čerpáno z prací Roubíčka /16/ , Faistanera /14/ a Hegera /15/ .

V práci J. Roubíčka /16/ byl materiál ozářen CO_2 laserem, o vlnové délce $10,6 \mu\text{m}$, rychlost posuvu svazu byla $1,95 - 2,05 \text{ ms}^{-1}$, paprsek byl defokusován na šířku stopy 5 mm. Na vzorky byla nanесena barva RALLYE čern 0199 o různých tloušťkách viz tab. 4.

vzorek č.	P [k W]	V [m/min]	z [μm]	HTO [mm]
11	1,95	1,95	15	0,47
12	1,95	2,00	8	0,56
13	1,95	2,05	16	0,49
14	2,00	2,00	17	0,47
15	2,05	2,00	16	0,50
16	1,95	1,95	14	0,48
17	1,95	2,00	15	0,44
18	1,95	2,05	12	0,55

tab. 4. Hloubky tepelně ovlivněných oblastí při povlaku tvořeném RALLYE 0199.

V práci Faistanera / 14 / byly vzorky ozářeny CO_2 laserem o vlnové délce $10,6 \mu\text{m}$, rychlost posuvu byla 2 m/min, výkon laseru byl 2 kW a paprsek byl defokusován na šířku stopy 5 mm. Na vzorky byla nanесen SYNFÁT 1400.

vzorek č.	povlak	z [μm]	HTO [mm]
19	SYNFÁT 1400	12	0,666
20	SYNFÁT 1401	34	0,810

tab. 5. Hloubky tepelně ovlivněných oblastí při povlaku tvořených fosfátem.

V práci Hegera /15/ byly vzorky ozářeny YAG laserem o vlnové délce $1,06\ \mu\text{m}$. Výkon dopadajícího záření na vzorek byl 60 W. Rychlost posuvu svazku byla 2 mm/min, paprsek byl defokusován na šířku stopy 0,9 mm. Jako povrchová úprava byla nanášena na vzorky SYNFÁT 1100 a SYNFÁT 1500 o tloušťkách viz tabulka 6.

vzorek č.	povlak	z [μm]	HTO [mm]
21	SYNFÁT 1100	12	0,151
22	SYNFÁT 1500	12	0,144

tab. 6. Hloubky tepelně ovlivněných oblastí při povlácích tvořených fosfátem.

4.4 Aplikace konkrétních dat na matematicko-fyzikální model

Při aplikaci na model absorpce záření byly dosazeny konkrétní hodnoty do modelu. Za intenzitu dopadajícího záření byly dosazeny hodnoty výkonů laseru, viz tab. 3., 4., 5., 6.. Pro vzorky byly dosazeny odrazivosti povlaku, odrazivosti kovu, absorpční koeficienty viz kap. 4.2

Po dosazení těchto parametrů byl vypočten celkově pohlcený výkon I_{Acl} . Tento výkon byl dosazen do rovnice teplotního pole / 21 /. Hloubka tepelně ovlivněné oblasti byla vypočtena tak, že bylo sledováno, kdy teplota klesne pod teplotu austenitizace. V tabulkách 7. je vidět porovnání tepelně ovlivněných oblastí naměřených a vypočtených a odchylky jsou znázorněny v procentech.

vzorek č.	I_{Acl} [W]	HTO [mm]	HTO [mm]	Δ HTO [%]
1	1470	0,300	0,46	35
2	1500	0,290	0,50	42
3a	1311	0,475	0,40	25
3b	1420	0,500	0,44	12
3c	1498	0,465	0,46	1
4	1296	0,310	0,38	18
5	1455	0,375	0,46	18
6	1475	0,250	0,46	46
7	1412	0,292	0,44	33
8	1544	0,335	0,50	33
9	1512	0,375	0,50	25
10	1425	0,350	0,44	20
11	1485	0,470	0,48	2
12	1545	0,560	0,48	14
13	1474	0,490	0,44	10
14	1500	0,470	0,46	2
15	1550	0,500	0,48	4
16	1496	0,480	0,48	0
17	1485	0,440	0,46	4
18	1505	0,550	0,46	16
19	1554	0,666	0,50	14
20	1250	0,810	0,40	51
21	53	0,144	0,18	16
22	48	0,151	0,16	10

tab. 7. Porovnání HTO vypočtených a naměřených.

Ø 18,7

4.5 Zhodnocení výsledků

Model absorpce vyjadřuje závislost tloušťky povlaku z_D , odrazivosti povlaku R_D , odrazivosti substrátu R_S a koeficientu pohltivosti α na záření pohlceném povlakem při přímém průchodu I_{AD} , pohlceném povlakem při zpětném průchodu I_{AD} , pohlceném kovem I_{AS} , záření odraženém povlakem I_{RD} , vyšlém zpět z povlaku I_{TD} , odraženém kovem I_{RS} , což umožňuje vypočítat záření celkově pohlcené I_{AG} . Podle modelu s rostoucí tloušťkou povlaku absorpce systému klesá. Vliv odrazivosti povlaku je malý vzhledem k absorpci povlaku. S rostoucím absorpčním koeficientem α absorpce systému klesá.

Vliv odrazivosti povlaku neovlivňuje relativní podíly absorpce. Nejvýznamnější vliv na výslednou absorpci kovů má povlak. V něm se při přímém průchodu pohltí až 65% veškerého záření a při zpětném průchodu 6% záření, kdežto pohltivost kovu je 6% celkově dopadajícího záření.

Slabým místem aplikace modelu je neznalost konkrétní hodnoty α . Vliv byl zkoumán výpočetně, jako optimální se jeví $\alpha = 20\,000\text{ cm}^{-1}$.

Při aplikaci modelu absorpce laserového záření bylo zjištěno, že rozměry tepelně ovlivnitelné oblasti vypočtených a změřených se v průměru o 18,7% liší. Tyto nepřesnosti byly způsobeny při výpočtu hloubky tepelně ovlivněné oblasti, kdy bylo dosazováno do modelu teplotního pole dle Ashbyho / 20 /. Tento model teplotního pole je nepřesný. Neuvažuje teplotní závislost veličin. Jako zdroj energie bere ideální bodový zdroj energie, kdežto skutečné laserové záření je soustředěno na určitou plochu. Tyto nepřesnosti způsobily odchylky ve vy-

počtených a naměřených hodnotách.

Pro další práci s modelem absorpce laserového záření by bylo potřebné zjistit konkrétní hodnoty α pro různé povlaky, objektivní hodnoty odrazivosti povlaku. Bylo by potřebné použít model pro výpočet teplotních polí, který respektuje lépe realitu.

5. ZÁVĚR

Seznámil jsem se s problematikou absorpce laserového záření. Zpracoval jsem přehled a metodách jejího zjišťování. Formuloval jsem model absorpce laserového záření systémem povlak - kovový substrát. Vytipoval jsem z literárních údajů a experimentálních výsledků svých předchůdců údaje potřebné pro aplikaci modelu. Výsledky modelu absorpce jsem dosadil do rovnice pro teplotní pole a konfrontoval takto vypočtené hodnoty rozměrů tepelně ovlivněných oblastí s výsledky experimentů.

6. SEZNAM LITERATURY

- / 1 / Sokolov, A. V. : Optičeskiye svojstva metalov, 1. vydání, Moskva 1961
- / 2 / Harth, G. H. a kol. : Journal of metals, 1976, č. 4., str. 5 - 11.
- / 3 / Rykalin, N. N. a kol. : Vysokotemperaturnyje technologičeskiye processy, 1. vydání, Moskva 1986
- / 4 / Honzík, O. a kol. : Využitie laseru pri tepelnom spracovaní, 1. vydání, Bratislava 1988
- / 5 / Michejev, A. J. a kol. : Povjerchnost', 1986, č. 1, str. 117
- / 6 / Horyna, J. a kol. : Impulzní ohřevy v tepelném zpracování kovů - další výsledky na čsl. ocelích a zařízeních, [Výzkumná zpráva] , Liberec, VŠST 1985
- / 7 / Mc. Lachlan, A. D. - Whitbourn, L. B. : Journal of Applied Physics 53, 1982, č. 6, str. 4038 - 45
- / 8 / Nosek, V. - Roubíček, J. - Faistauer, P. : Speciální technologie 90, 1. vydání, Plzeň 1990
- / 9 / Mathur, G. - Molian, H. : Trans. asme 107, 1985, č. 7, str. 200
- / 10 / Andriachin, V. M. : Fizyka i chimiija obrabotky materialov, 1984, č. 5, str. 89
- / 11 / Mehlhorn, H. - Herzer, H. : Feingßrettechnik, 1983, č. 32, str. 272 - 276
- / 12 / Tvrdíková, J. : Příprava a vlastnosti antireflexních povlaků pro laserové tepelné zpracování materiálu, [Diplomová práce] , Liberec 1990 VŠST, fakulta strojní
- / 13 / Brož, J. a kol. : Základy fyzikálních měření, 1. vydání, Praha 1983

- / 14 / Faistauer, P. : Vliv stavu povrchu na absorpci laserového záření, [Diplomová práce,] Liberec 1987 VŠST, fakulta strojní
- / 15 / Heger, P. : Vliv stavu povrchu na absorpci laserového záření, [Diplomová práce] , Liberec 1986 VŠST, fakulta strojní
- / 16 / Roubíček, J. : Reprodukovatelnost výsledků laserového tepelného zpracování, [Diplomová práce] , Liberec 1988 VŠST, fakulta strojní
- / 17 / Duley, W. W. : Lasernaja tehnologija i analiz materialov, 1. vydání, Moskva 1986
- / 18 / Harth, G. H. - Leslie, W. C. : Welding Journal, Res. supp. 54, 1975, str. 124 - 129
- / 19 / Engel, S. L. : American machinist, 1976, str. 120
- / 20 / Kumpošt, R. : Program ASHBY BAS., /Výpočet teplotních polí při laserovém zpracování materiálu podle Ashbyho
- / 21 //
- / 21 / Ashby, M. F. - Acta metallurgica 32, 1984, č. 11, str. 1935 - 1948

P o d ě k o v á n í

Tímto bych chtěl vyslovit poděkování ing. Vladimíru
N o s k o v i , vedoucímu mé diplomové práce, za cenné
radu a připomínky při jejím vypracování.

Miroslav Braun