

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23-07-8

Strojírenská technologie

Zaměření : strojírenská metalurgie

Katedra materiálů a strojírenské metalurgie

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ PAPERSEM LASERU

KMM - 055

Miloslav H o l ý

Vedoucí práce : ing. Jiří H o r y n a , CSc

Konsultant : ing. Vladimír N o s e k

Rozsah práce a příloh :

Počet stran	.....	49
Počet příloh	....	2
Počet tabulek	....	2
Počet obrázků	.....	21
Počet výkresů	....	0

Dne 22.5.1982

Vysoká škola:
strojn^í a textiln^í
v Liberci
Fakulta:
strojn^í

Katedra:
materiálů a strojírenské
metalurgie
Školní rok:
1981/82

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro
Miloslav H O L Ý
strojírenská technologie
obor

Protože jste splnil..... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství a kultury o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu:
Tepelné zpracování oceli paprskem laseru
.....
.....

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou tepelného zpracování paprskem laseru.
2. Navrhněte experimentální program s cílem, stanovit parametry tepelného zpracování.
3. Navrhněte metodiku metalografického zpracování vzorků.
4. Proveďte expozici vzorků dle navrženého programu.
5. Vyhodnoťte parametry laserového ohřevu.

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

Autorské právo se řídí směrnice
MŠK pro státní závěrečné zkoušky č.
727/62-III/2 ze dne 12. června
1962 - Věstník MŠK XVII, část 26 ze
dne 31. 8. 1962 § 19 aut. z. č. 115/62 Sb.

V 224 / 82 S

K. V. J. S. M.

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

Výzkumné zprávy VŠST

DP VŠST Liberec

Časopisy, Metallovedeniye i termičeskaja obrabotka metallov,
Fizika i chimija obrabotki materialov a další

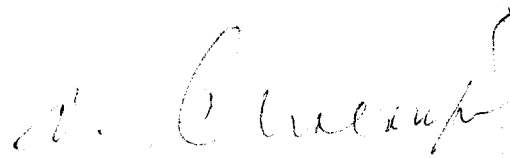
Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Horyna, CSc

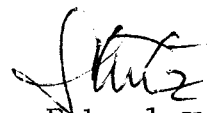
Konsultanti: Ing. Vladimír Nosek

Datum zadání diplomového úkolu: 14.9.1981

Termín odevzdání diplomové práce: 4.6.1982




Doc. Ing. Václav Chaloupecký, CSc
Vedoucí katedry


Doc. RNDr. Bohuslav Stříž, CSc
Děkan

Liberci 10.9.1981
V dne 19

Místopřísežné prohlášení

" Místopřísežně prohlašuji, že experimenty byly provedeny ve spolupráci s diplomantem s. Jar. Mohelským. Vypracování diplomové práce jsem provedl samostatně, s použitím uvedené literatury".

V Liberci dne 22.5.1982

Miloslav Holý

O B S A H

1.	Úvod	8
2.	Rešeržní část	9
2.1.	Tepelné zpracování ocelí a slitin paprsky laseru	9
2.1.1.	Zařízení pro tepelné zpracování laseru	9
2.2.	Problematika laserového ohřevu kovů a slitin	10
2.2.1.	Teplovní pole při laserovém ohřevu	13
2.3.	Metodika tepelného zpracování laserem	16
2.4.	Kalení ploch impulsy laseru	18
2.5.	Formování hloubky zakalené vrstvy	27
3.	Experimentální část	29
3.1.	Materiál pro experimentální zkoušky	29
3.2.	Metodika experimentu	29
3.3.	Metalografický rozbor	31
3.3.1.	Metalografický rozbor oceli ČSN 19436	33
3.3.2.	Metalografický rozbor oceli ČSN 19152	34
3.3.2.1.	Měření mikrotvrdosti po tepelném zpracování laserem	37
3.3.2.2.	Velikost a tvar transformované vrstvy	40
4.	Stanovení parametrů pro tepelné zpracování laserem	41
5.	Diskuse dosažených výsledků	43

6.	Závěr	45
7.	Další směr experimentu	46
	Seznam literatury	47

Seznam zkratek a symbolů

$I_{(x)}$	.....	intenzita světelného toku v hloubce x
I_0	.....	intenzita světelného toku
q	.....	plošná hustota výkonu
q_0	.....	plošná hustota výkonu ve středu fokusované skvrny
q_{max}	.....	max. plošná hustota výkonu ve středu fokusované skvrny
Q	.....	plošná hustota energie
A	.....	výkon
E	.....	energie
t	.....	doba zpracování
α	.....	koeficient pohltivosti světla
a	.....	koeficient teplotní vodivosti
K	.....	koeficient tepelné vodivosti
T	.....	teplota
C	.....	tepelná kapacita za jednotku času
A	.....	apertura
F	.....	ohnisková vzdálenost
F	.....	vzdálenost ohniska od předmětu
L	.....	vzdálenost od clony k fokusujícími objektivu
θ	.....	úhel rozptylu paprsku laseru
λ	.....	vlnová délka záření
S	.....	plocha skvrny
S	.....	rozteč
h	.....	hloubka zakalené vrstvy
h'	.....	minimální hloubka v místě překrytí skvrn
D	.....	průměr zakalené vrstvy
L	.....	celková délka zpracovávaného místa
K_p	.....	koeficient překrytí

n počet impulsů
 f četnost impulsů
 v rychlost posuvu paprsku
 K_z koeficient zaplnění profilu
 K_i koeficient využití impulsu
 F' plocha ozářeného povrchu
 F plocha podléhající ozáření
 h_2 šířka překrytí
 h_1 výška překrytí
 P výkonnost procesu
 t_p doba ozáření materiálu laserem
 T_0 teplota fázových přeměn
 ρ měrná hmotnost materiálu
 r efektivní rozměr poloměru svazku paprsků laseru
 c tepelná kapacita materiálu
 t_{tav} doba od začátku záření do chvíle tavení
 T_{tav} teplota tavení
 T_p přebytečná teplota tavení
 b koeficient akumulace
 x, y, z ... souřadnice

1. Ú v o d

Na XVI. sjezdu KSČ byly vytyčeny úkoly nejen pro oblast ekonomiky, ale i pro jednotlivá odvětví a obory, to znaemná i pro strojírenství. Hlavním cílem je snižovat materiálovou, surovinovou a energetickou náročnost výroby a zvyšovat produktivitu práce.

Tepelné zpracování kovů a slitin je z časového a hlavně energetického hlediska velice náročné.

V této souvislosti celosvětový výzkum v oblasti tepelného zpracování směřuje k intenzivnímu studiu možností zkracování pracovních cyklů intenzifikace ohřevů, které vedou především k úsporám energie. V současné době je možné pozorovat přechod od objemového tepelného zpracování ke zpracování lokálnímu. Tohoto lokálního zpracování se může velmi dobře využít ke zpracování například povrchu součástí, nebo jen části povrchu, a to často ve velmi tenké vrstvě.

Jednou z nových technologií je možnost tepelného zpracování kovů a slitin použitím kvantových generátorů, světelných paprsků - laserů. Tento způsob existence se výrazně rozšířil v technologii tepelného zpracování.

Uvedená diplomová práce se zabývá problematikou využití laserové techniky pro tepelné zpracování ocelí a slitin československé výroby. Práce navazuje na poznatky získané v předešlých diplomových pracech. Vysvětluje metodiku experimentálních prací, podrobně se zabývá zpracováním zakalených ploch, vyhodnocováním vzorků a volbou parametrů. Ve druhé části je proveden metalografický rozbor, včetně proměření mikrotvrlosti. Z výsledků této experimentální části byly v závěru formulovány technologické parametry z hlediska využití výsledků v praxi.

2. Rešeržní část

2.1. Tepelné zpracování ocelí a slitin paprsky laseru

Jedna z nových technologických možností tepelného zpracování je aplikace laserové techniky. V průmyslově vyspělých státech se tato technika výrazně prosazuje do praxe.

Důvody zavádění spočívají jednak v kvalitativně nových vlastnostech takto zpracovávaných materiálů, jednak v energetické úspornosti tohoto způsobu. Energetická úspornost vyplývá především z možnosti přesné lokalizace ohřevu.

Vzhledem k tomu, že rešerže byla provedena v dřívějších diplomových pracech, je rešeržní práce zaměřena především na technickou stránku této technologie.

2.1.1. Zařízení pro tepelné zpracování laserem

Lasery se dělí do tříd podle skupenství aktivního prostředí jednotlivých typů, a to na lasery na pevné bázi, lasery kapalinové a lasery plynové. /8/

Zvláštní třídu tvoří lasery polovodičové, protože mají odlišný způsob generování záření. Z uvedených typů má v současnosti pro tepelné zpracování největší význam lasery na pevné bázi a plynové lasery, které splňují podmínky dostatečně velkého výkonu.

Mezi lasery na pevné bázi patří především lasery rubínové, zářící na vlnové délce $1,064\mu\text{m}$. Ostatní typy laserů na pevné bázi nejsou zatím využívány pro tepelné zpracování kovů a slitin.

Uvedené typy laserů jsou buzeny opticky xenoxovou

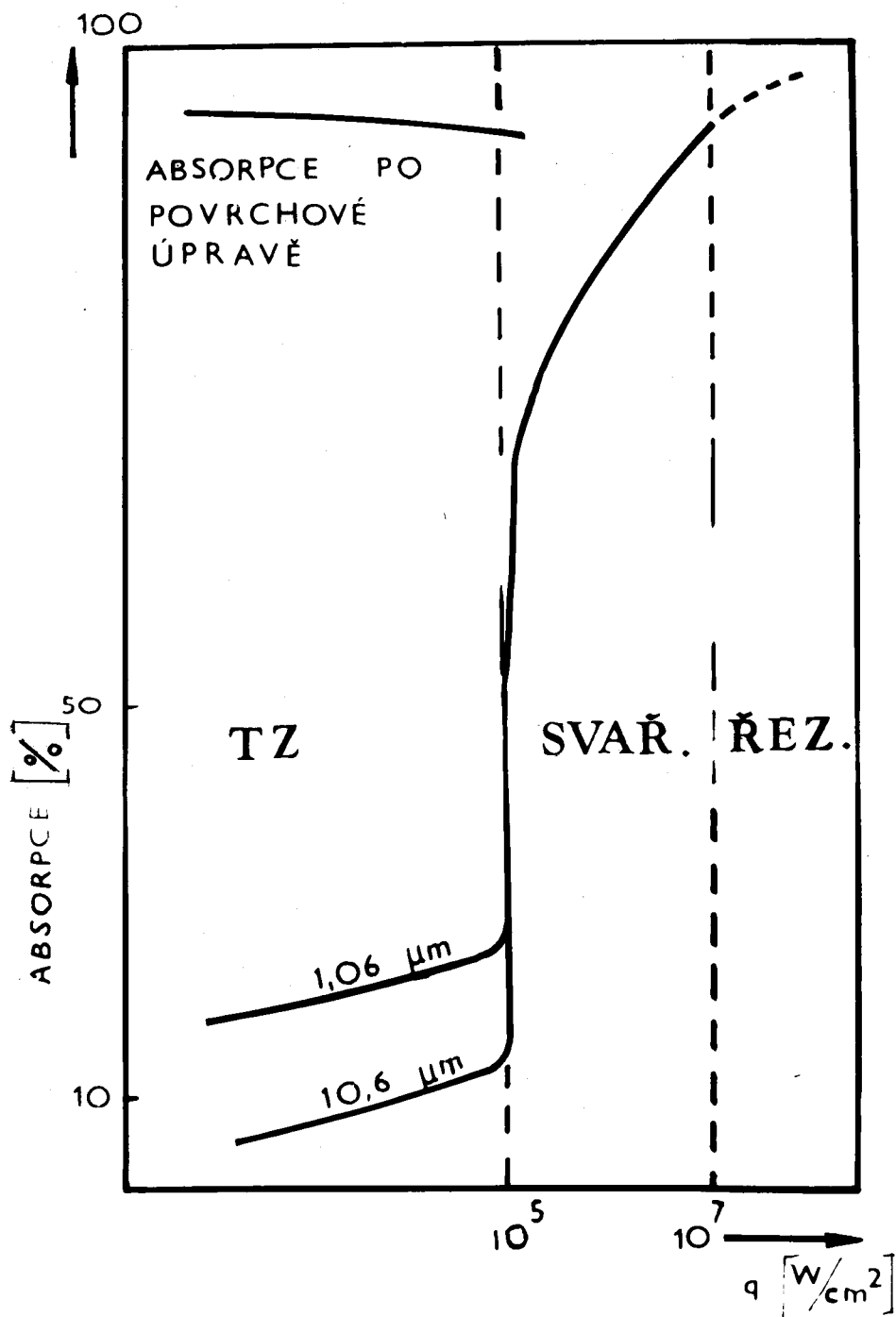
resp. kryptonovou výbojkou pracující v impulsním režimu.

Nejvýznamnějšími plynovými lasery jsou lasery molekulární na bázi CO_2 , které pracují se směsí CO_2 , N a He. Zářívají v infračervené oblasti spektra, obvykle na vlnové délce 10,6 μm . Lasery na bázi CO_2 jsou nízkotlaké, celkový tlak směsi je kolem 10 kPa. Jsou konstruované jako trubice s pomalým, s případně rychlým průtokem směsi, nebo jako nádoby, v kterých je umožněn příčný průtok směsi přes výbojovou komoru resp. přes rezonátor. Toto konstrukční uspořádání je vhodné pro generování velkých výkonů. Využití ostatních typů plynových laserů je v porovnání s CO_2 zatím méně významné. /13/

2.2. Problematika laserového ohřevu kovů a slitin

Problematika laserového ohřevu vyplývá hlavně z přívodu velkého množství energie na povrch zpracovávaného kovu, v krátkém časovém okamžiku.

Při působení tak velkého množství energie mohou vzniknout následující stádia: přívod laserového toku na materiál, pohlcení světelného toku, přeměna jeho energie, nahřátí materiálu, natavení materiálu, vypařování a vyplavování produktů z roztaveného kovu, vychladnutí materiálu po laserovém působení. Všechna tato stádia ovšem nemusí proběhnout. Míra průběhu těchto stádií závisí na měrném teple a teplotě tání a vypařování, na hmotnosti materiálu, na teple a teplotní vodivosti materiálu, na drsnosti, na vlnové délce záření, na absorpci a odrazivosti apod. Některé tyto vlivy jsou uvedeny na obrázku 1.



obr. 1. Ukazuje závislost mezi absorpcí a plošnou hustotou výkonu pro různé druhy použití laseru a různou vlnovou délku. /10/

Platí, že čím je vlnová délka menší, tím nižší je odrazivost, ale vyšší podíl pohlcené energie. Při povrchové úpravě (viz dále) se značně zvýší podíl pohlcené energie. Tato velká a nežádoucí odrazivost resp. malá absorpce se dá snížit resp. zvýšit například pískováním, leptáním, načerněním povrchu (nad svíčkou) apod. /11/

Při použití stejných parametrů tepelného zpracování laserem bylo zjištěno, že největší mikrotvrdost, největší hloubka zakalené vrstvy a největší šířka stopy byla dosažena na povrchu zpracovaného nakouřením. Nejnižších hodnot bylo dosaženo na povrchu zpracovaném pískováním. Na nalep-
taném povrchu byly hodnoty mezi těmito dvěma extrémy. /11/

Záření je pohlcováno tenkou vrstvou materiálu, to je možné popsat vztahem :

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x) , \quad (1)$$

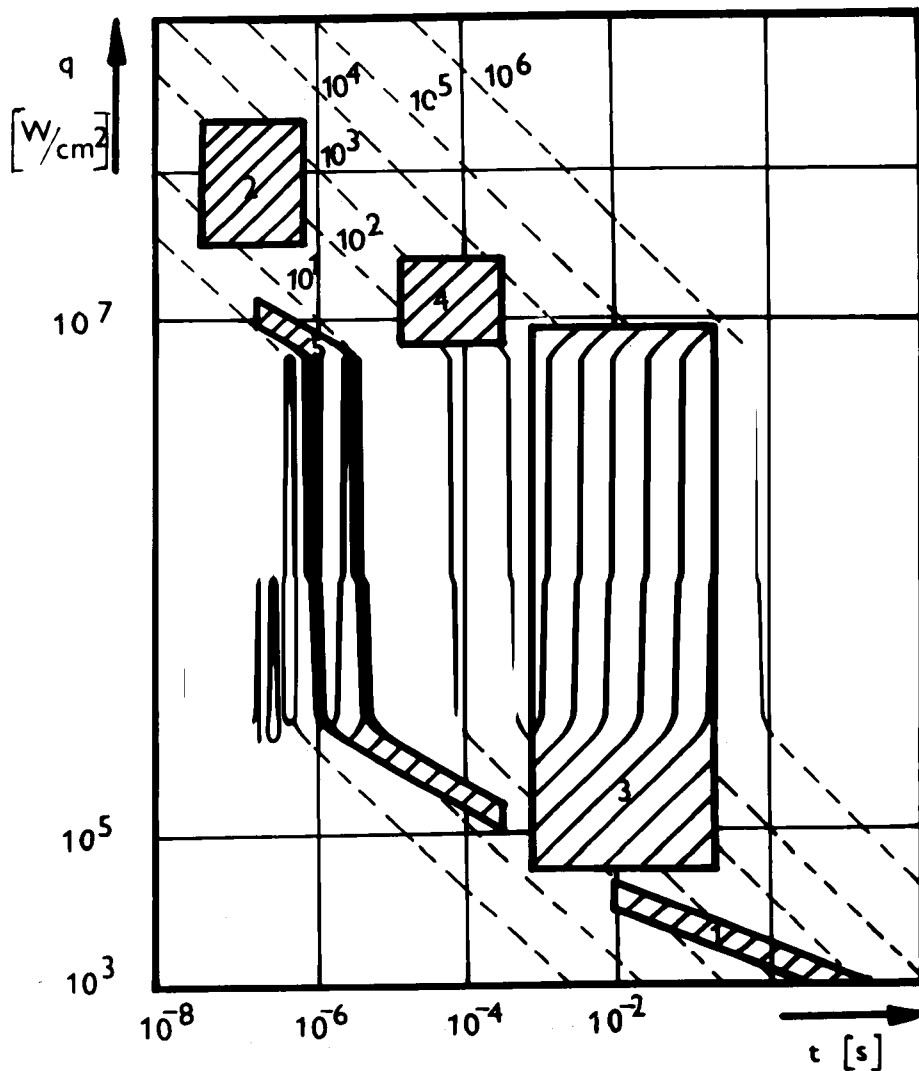
kde $I(x)$ - intenzita světelného toku v hloubce x ; I_0 -
- intenzita světelného toku; α - koeficient pohltivosti
světla v kovu. /9/

Prakticky pro většinu kovů platí, že světelná energie se pohlcuje v hloubce menší než $0,1 \mu\text{m}$. Přenos této energie do větších hloubek je způsoben tepelnou vodivostí.

Při nízké plošné hustotě výkonu ($10^3 + 10^4 \text{ W/cm}^2$) vzniká ohřev materiálu bez natavení nebo bez vypaření materiálu. S vyššími hodnotami (do $10^6 + 10^7 \text{ W/cm}^2$) se materiál natavuje. Při hodnotách větších než 10^7 W/cm^2 už dochází k intenzivnímu vypařování materiálu. (obr.2)

Na tomto obrázku je názorně vidět, jakých hodnot lze použít pro různé druhy tepelného zpracování paprskem laseru.

1 - povrchové kalení ; 2 - laserové zpracování šokem ;
3 - svařování ; 4 - vrtání otvorů ; 5 - vytváření amorfních povlaků.



obr. 2. Energetické charakteristiky rozložení některých procesů laserového tepelného zpracování materiálů (zpracováno podle /9/).

2.2.1. Teplotní pole při laserovém ohřevu

Pro výpočet teplotního pole v polonekonečném tělese byla v práci /9/ uvedena diferenciální rovnice:

$$\nabla^2 T(x,y,z,t) - (1/a) \cdot \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = -C(x,y,z,t) \cdot K, \quad (2)$$

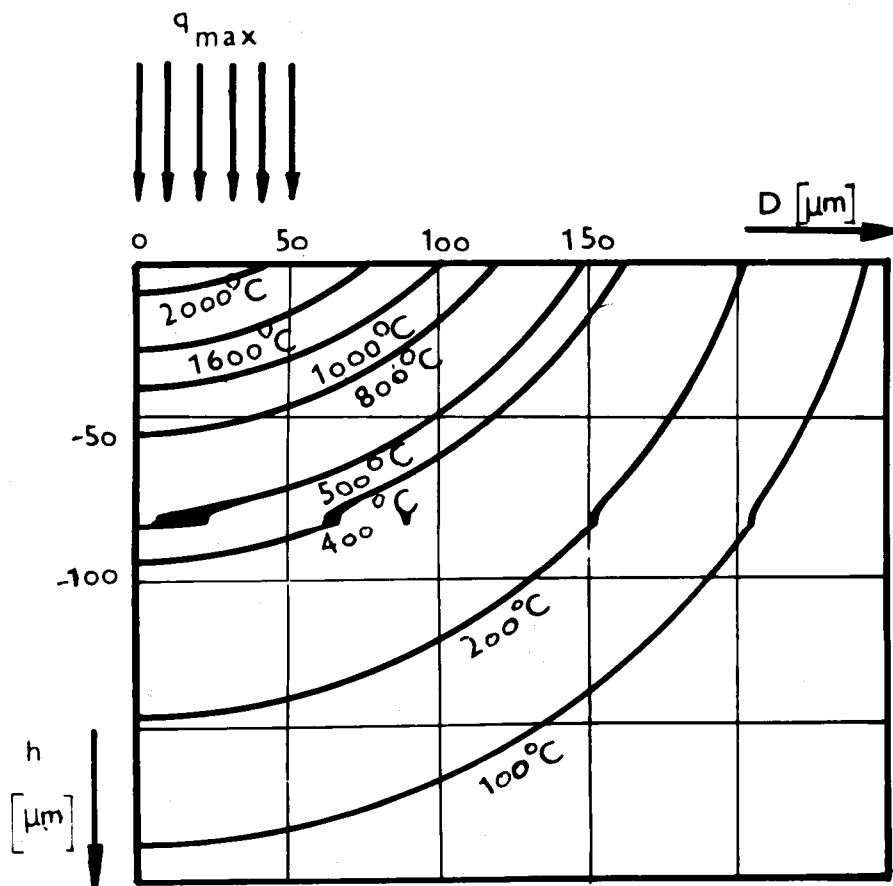
kde T - teplota ; t - čas ; a - koeficient teplotní vodivosti ;
 K - koeficient tepelné vodivosti ; C - množství tepla v jednotce objemu za jednotku času. /9/

Množství pohlcené energie za čas ve skvrně je dáno vztahem:

$$q(x) = q_0 \cdot \exp \cdot \left(- \frac{x^2}{r^2} \right), \quad (3)$$

kde q_0 - plošná hustota výkonu ve středu fokusované skvrny;
 r - poloměr svazku paprsků.

Vztah provýpočet teploty, jako funkce souřadnic a času nelze vyjádřit v analytické formě pro libovolné $C(x, y, z, t)$, protože C je závislé na skutečných vlastnostech impulsu, kdežto vztah (2) je pro ideální impuls laseru s rovnoměrným rozložením intenzity. Pro konkrétní materiál a podmínky lze použít vztah pro výpočet teploty, který byl uveden v práci /9/. Podle tohoto vztahu byl vytvořen obrázek teplotních polí č. 3:



obr. 3 . Teplotní pole v místě dopadu laserového paprsku.

$$(a = 0,1 \text{ cm}^2/\text{s} ; K = 0,3 \text{ W/cm}^2 \times \text{C}^0 ;$$

$$D = 0,01 \text{ cm} ; t = 0,001 \text{ s}). \quad /9/$$

Vztah pro výpočet teploty je :

$$T(x,y,t) = \frac{q_{\max} r^2}{k} \left(\frac{a}{\pi} \right)^{1/2} \int_0^t \frac{P(t-t') dt' \exp. \left[\frac{z^2}{4at'} - \frac{x^2}{4at'} \right]}{\sqrt{t'} \cdot (4at' + r^2)}, \quad (4)$$

kde r - poloměr svazku paprsků ; q_{\max} - max. plošná hustota výkonu ve středu skvrny ; T - teplota jako funkce hloubky z (od povrchu), radiální vzdálenosti x od středu a času t . /9/

V práci /12/ je uvedeno, že rychlost ohřevu při laserovém záření dosahuje hodnot $10^5 \div 10^8$ °C/s. Ochlazovací rychlost při krystalizaci tekutého kovu je jen o málo nižší než rychlost ohřevu, a to do 10^6 °C/s. Při těchto vysokých rychlostech ochlazování se fixuje složení neovlivněného materiálu, kdežto ovlivněné místo dosáhne značných změn, které nejsou dosud přesně definovány, ale vyznačují se vysokou tvrdostí.

Při uvažování všech těchto vlastností a vztahů bylo použito těch parametrů, které jsou uvedeny v tabulce č. 1. Tyto parametry jsou získány z několika různých prací. V této tabulce je vidět, že se dá používat velké rozmezí hodnot. Je to dáno tím, že laserové kalení je závislé na mnoha již vyjmenovaných okolnostech.

2.3. Metodika tepelného zpracování laserem

Na obr. 4. je znázorněno laserové zařízení pro kalení ocelí a slitin.

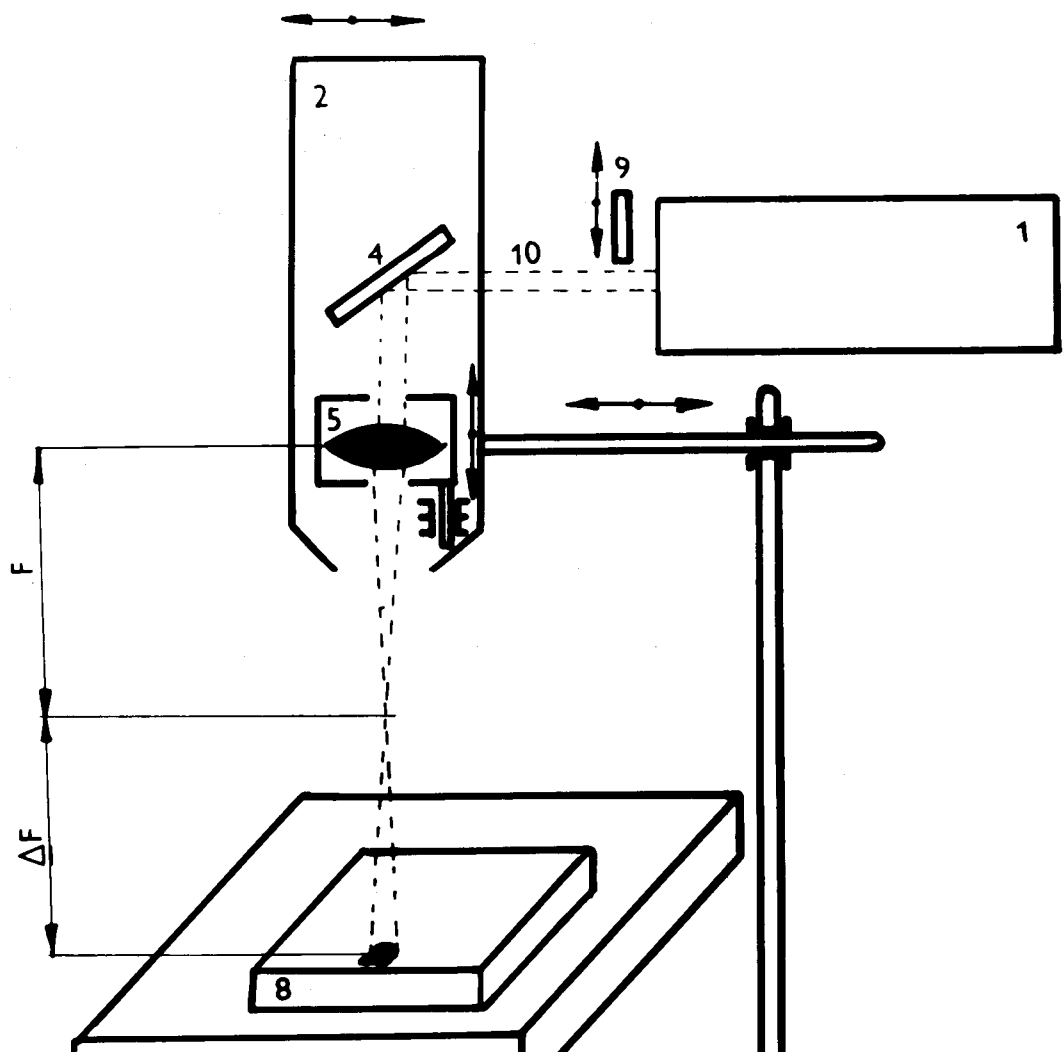
Laserový paprsek vytváří prakticky rovnoběžný svazek infračerveného záření o určitém průměru. Svazek vychází ze zdroje, odráží se od zrcadla do čočky s určitou ohniskovou vzdáleností, odkud dopadá proud světelného paprsku na zpracovávané místo. Vzorek nebo zpracovávaný předmět je umístěn na pohyblivém stole, který je poháněn elektromotorem, kde lze libovolně nastavovat otáčky, a tím měnit rychlost pohybu vzorku. Soustava se skládá z : 1 - zdroj ; 2 - hlavice s optikou; 3 - stojan; 4 - zrcadlo; 5 - čočka; 6 - pohyblivý stůl; 7 - motor stolu ; 8 - zpracovávaný vzorek; 9 - grafitová clona pro přerušování paprsku; 10 - svazek paprsků laseru.

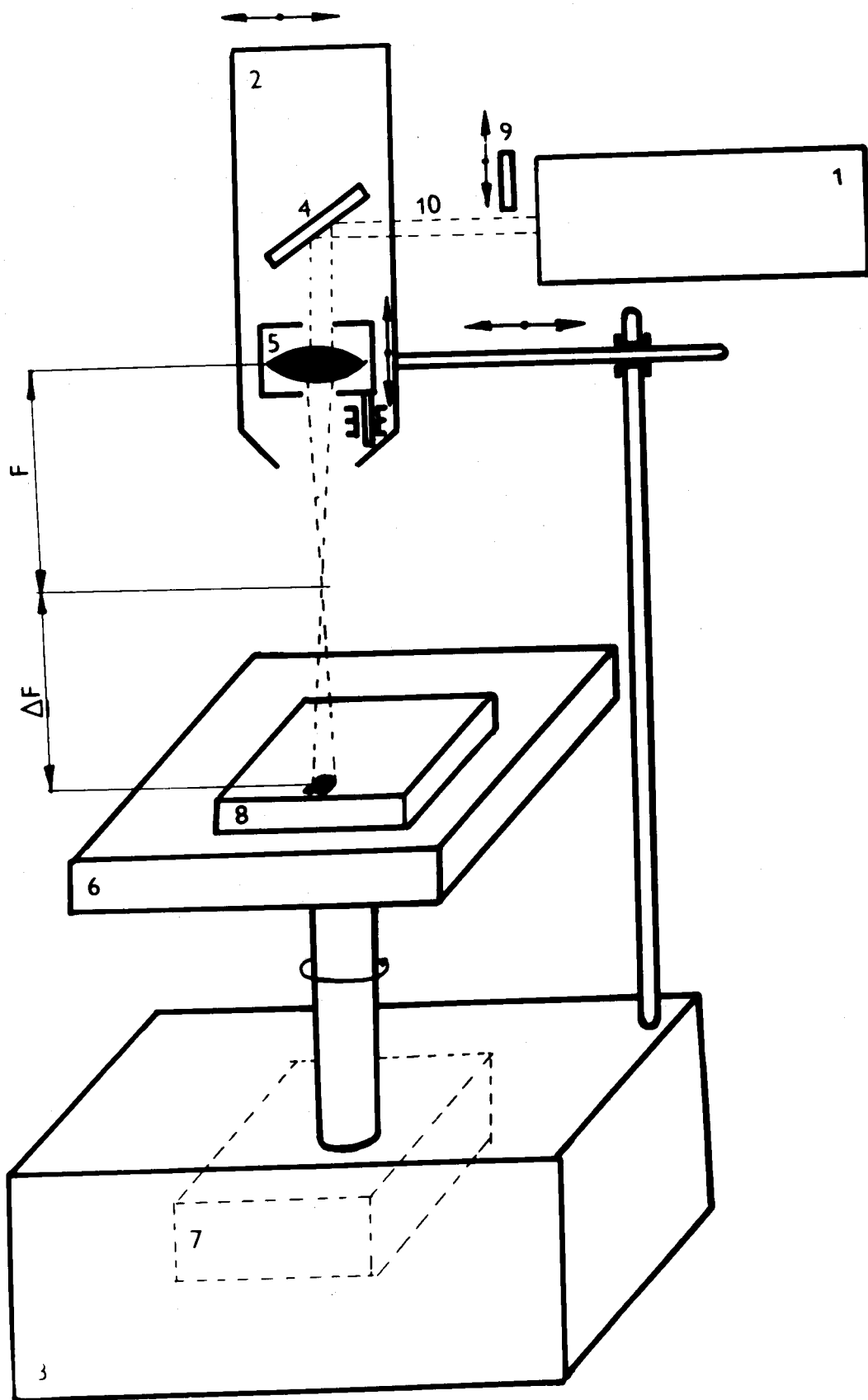
Zpracovávaná plocha se nemůže nacházet v libovolné vzdálenosti, ale musí být přesně určena. Tak např. při výstupu paprsku o průměru 24 mm a ohniskové vzdálenosti $F = 254$ mm, dosáhneme vzdálenosti ohniska od předmětu $\Delta F = 14$ mm a plochu zakaleného místa $S = 0,005 \text{ cm}^2$. L - vzdálenost od clony k fokusujícímu objektivu. Pak pro výpočet ΔF platí vztah:

$$\Delta F = \frac{F^2}{L - F} \quad (5) \quad /9/$$

Svazek paprsků vychází ze zdroje s minimálním úhlem rozptylu, který je popsán vztahem :

$$\theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{A} \quad (6)$$





obr. 4. Laserová soustava pro povrchové kalení. /11/

kde θ - úhel rozptylu paprsku ; λ - vlnová délka ;
A - apertura.

Minimální průměr skvrny D, který může být dosažen, se vypočítá :

$$D = F \cdot \theta = F \cdot \frac{1,22}{A} , \quad (7)$$

kde F - ohnisková vzdálenost fokusující čočky.

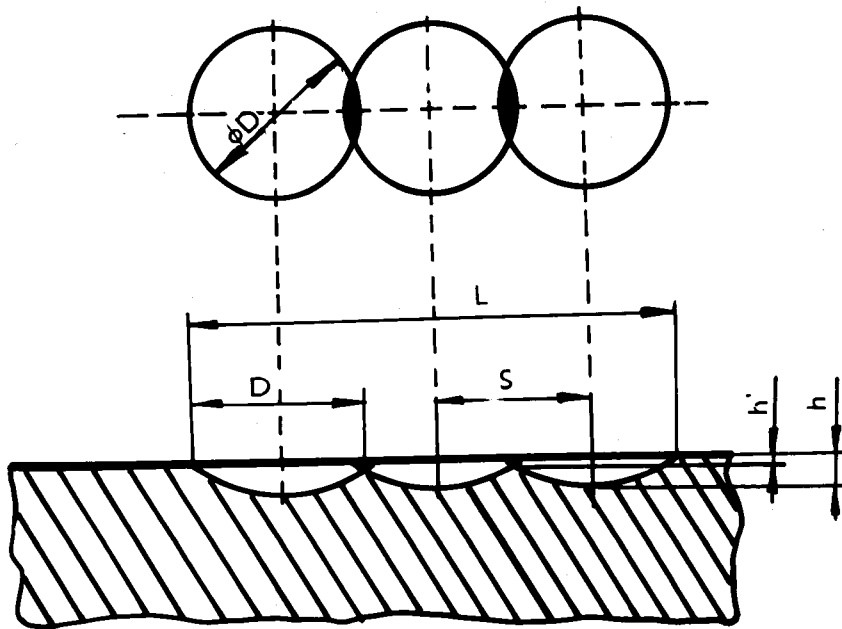
Plocha skvrny je rovna :

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = 1,169 \cdot \left(\frac{F}{A}\right)^2 \cdot \lambda^2 . \quad (8)$$

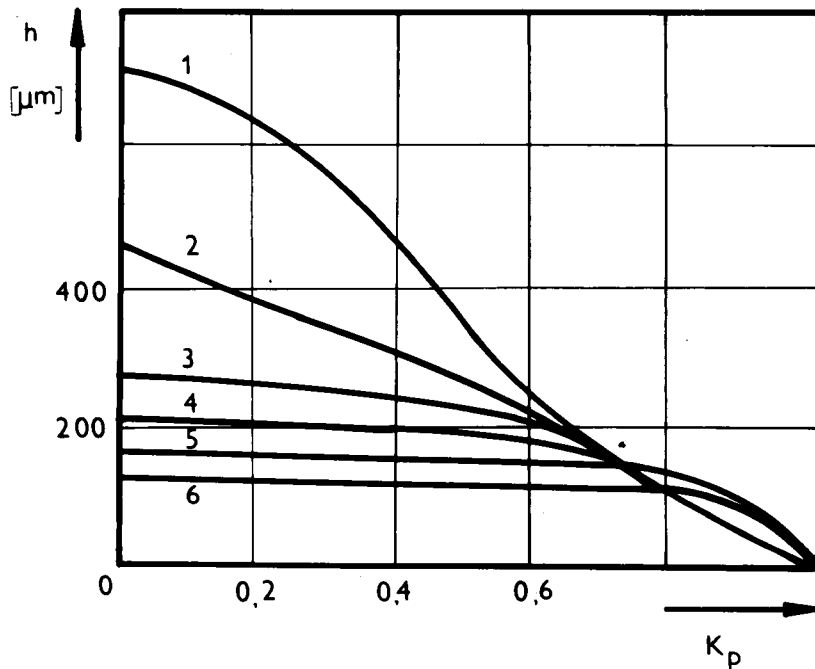
Z tohoto vzorce lze vyjádřit, jak průměr, tak i plochu skvrny. /18/

2.4. Kalení ploch impulsy laseru

Tepelné zpracování plochy laserem lze provést jak sférickou, tak i cylindrickou optikou. Pro naše účely nyní stačí využít poznatků z působení pomocí sférické optiky. Při tomto způsobu fokusace je zóna vzniklá laserem ohraničena průměrem D. Pro vytvoření zakalené plochy je nutné využít vhodné způsoby překrytí jednotlivých impulsů. Příklad takového překrytí zón je na obr. 5. Kde D - průměr skvrny; S - rozteč dvou sousedních skvrn; h - max. hloubka zakalené vrstvy ve středu skvrny; h' - min. hloubka v místě překrytí skvrn; L - celková délka zpracovávaného místa. /9/



obr. 5. Kalení plochy impulsy laseru. /9/



obr. 6. Závislost tloušťky zakalené vrstvy na koeficientu překrytí. /9/

Důležitou charakteristikou je také koeficient překrytí K_p , což je vidět na obrázku 6. K_p představuje poměr rozteče následujících skvrn k rozměru průměru jedné skvrny. Tento poměr je dán vztahem:

$$K_p = S/D, \quad (9).$$

Ze vztahu (9) lze vypočítat rychlost zpracování:

$$v = L/t = \frac{n \cdot D \cdot K_p}{t}, \quad (10)$$

kde t - doba zpracování; n - množství impulsů.

Při impulsním režimu zpracování je četnost výskytu impulsů rovna :

$$f = n/t, \quad (11)$$

po dosazení do vztahu (10) vyjde, že :

$$v = D \cdot K_p \cdot f, \quad (12)$$

dosazením vztahu (9) do (12) platí :

$$v = S \cdot f. \quad (13)$$

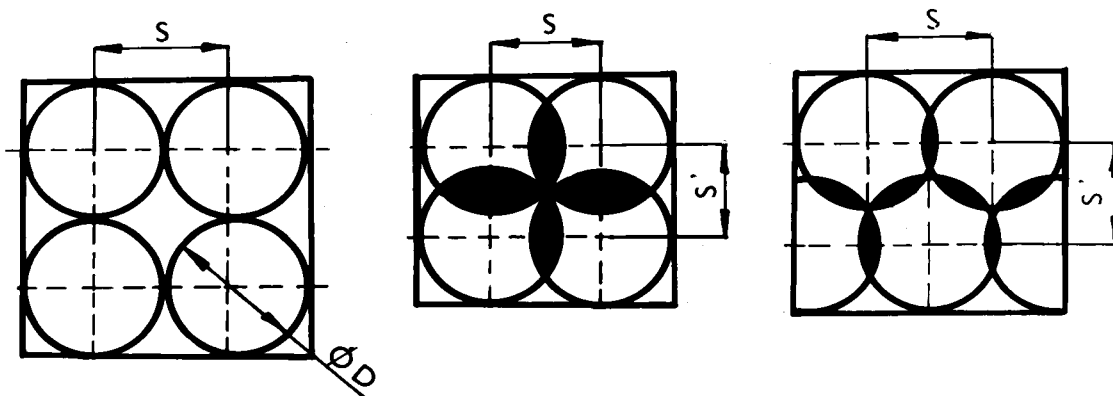
Ze vztahu (13) vyplývá, že při tepelném zpracování paprskem laseru se vzrůstající roztečí S roste také rychlost zpracování, ale přitom roste plocha neozářených míst. /9/

K doplnění k obr. 6. pro koeficient překrytí platí tyto parametry plošné hustoty výkonu : 1 - $q = 2,3 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$;
 2 - $q = 2,2 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$; 3 - $q = 1,9 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$;
 4 - $q = 1,6 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$; 5 - $q = 8,1 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$;
 6 - $q = 5,8 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$.

Ukazuje se, že rozteč S je potřeba vybrat takovou, aby zabezpečovala jak optimální zaplnění profilu - tedy rovnoměrnost tloušťky tepelně zpracované vrstvy, tak i rovnoměrné ozáření. Pro efektivnost realizace lze uvést koeficient zaplnění profilu - K_z , koeficient využití impulsu - K_i . Koeficient zaplnění je dán :

$$K_z = \frac{F'}{F} , \quad (14)$$

když F' - plocha ozářeného povrchu ; F - plocha profilu podléhajícího ozáření.



obr. 7. Různé způsoby překrytí skvrn. /9/

Koeficient využití impulsu K_i představuje poměr reálné plochy ozářeného místa impulsy n k maximální teoretické ploše ozářeného povrchu. Tento koeficient je dán vztahem:

$$K_i = \frac{4 \cdot F'}{n \cdot \pi D^2} , \quad (15)$$

kde D - průměr ozářené zóny; n - počet impulsů.

Na obr. 7a. se předpokládá, že $S = S' = D$. Toto schéma je charakteristické pro malý koeficient zaplnění profilu ($K_z = 0,8$), ale s vysokým koeficientem využití

impulsů ($K_i = 0,68$), což dovoluje vysokou výkonnost a rychlost opracování. U tohoto schematu je koeficient překrytí roven jedné. Rychlost opracování $v = D \cdot f$.

Pro mnoho technologických operací je potřebné plné zaplnění profilu povrchu. Toho lze dosáhnout vzájemným překrytím zón laserového záření. V takovýchto případech je koeficient překrytí menší než jedna. Ale v důsledku efektivnosti je nutné co nejmenší překrytí.

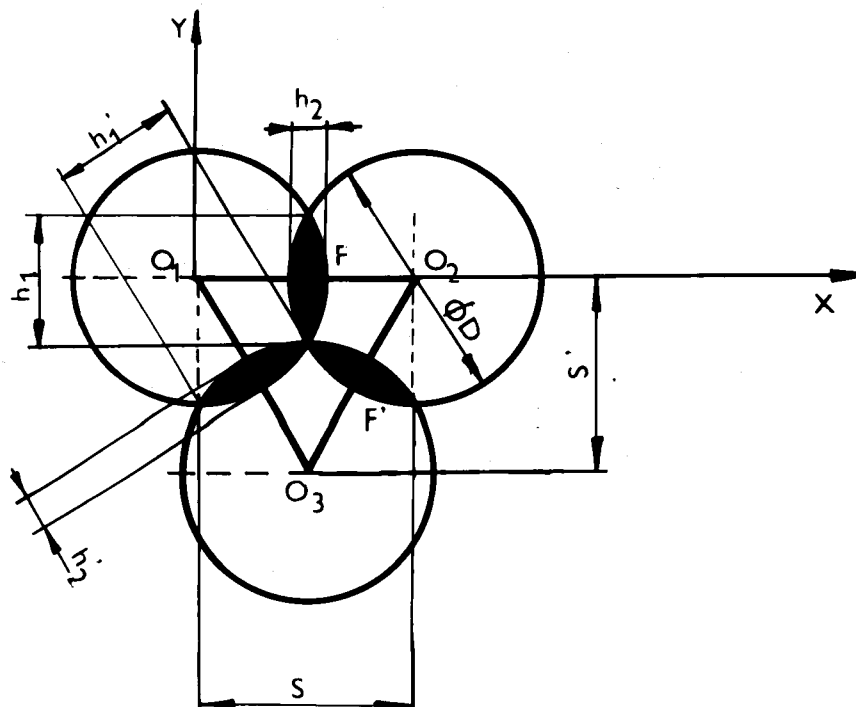
Při rozmístění zón laserového záření podle obr. 7b., kde $S = S' = 0,7 D$ a rychlost zaplňování $v = 0,7 D \cdot f$. V tomto případě je maximální zaplnění profilu ($K_z = 0,96$), ale koeficient využití impulsu je velmi malý ($K_i = 0,46$). To má za následek malou efektivnost procesu. Nedostatkem je také to, že rozměry překrytí jsou značně veliké. To znamená, že část energie přicházející na překrytá místa se nevyužívá. Kromě toho v těchto místech dochází k popouštění materiálu.

Tento nedostatek je odstraněn na obr. 7c., kde je na maximum zvětšen koeficient zaplnění profilu a maximálně zvýšen koeficient využití impulsu. To je možné při zvolení rozteče $S = 0,8 D$, a při rychlosti zaplňování $v = 0,8 D \cdot f$. /9/

Stanovení optimální hodnoty koeficientu překrytí K_p je názorné z obr. 8., kde X, Y - osy ; h_1 - výška překrytí; h_2 - šířka překrytí. Z tohoto obrázku je patrné, že :

$$h_2 = D - S = D (1 - K_p) \quad (16)$$

$$h_1 = D \sqrt{1 - K_p^2} \quad (17)$$



obr. 8. Stanovení optimálního koeficientu překrytí. /9/

Pak z obrázku 8. lze vyjádřit, že :

$$O_1O_3 = \frac{D}{2} \cdot \sqrt{2 \left(1 + \sqrt{1 - K_p^2} \right)}. \quad (18)$$

Potom lze vypočítat optimální koeficient překrytí K_p , kde plochy F a F' si jsou rovny :

$$K_p = 0,86. \quad (19)$$

Když známe koeficient překrytí můžeme určit i optimální velikost roztečí S a S' :

$$S_{opt} = 0,86 D, \quad (20)$$

$$S'_{opt} = 0,74 D. \quad (21)$$

Protože S a S' se liší jen nepatrně, lze použít, že :

$$S = S' = 0,8 D. \quad (22)$$

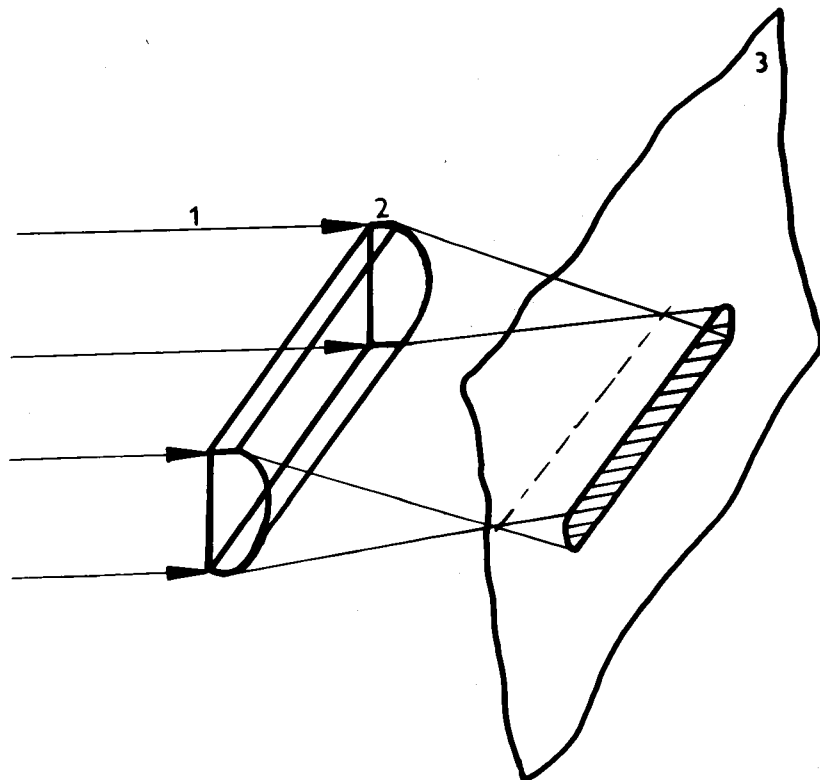
Při použití tohoto vztahu je vhodné zvolit koeficient zaplnění profilu $K_z = 0,94$, který dostatečně zaplní ozařované místo a koeficient efektivity impulsů $K_i = 0,72$, který je také postačující pro efektivnost procesu.

Výkonnost tohoto procesu lze vyjádřit vztahem :

$$P = \frac{\pi D^2 \cdot K_p \cdot f}{4}, \quad (23)$$

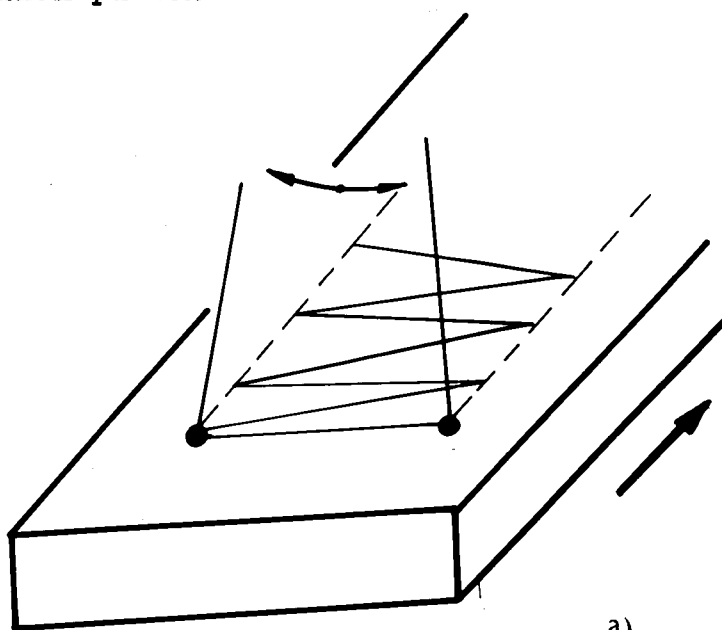
kde D - průměr zóny laserového záření; f - četnost výskytu impulsů; K_p - koeficient překrytí. /9/

Kalení ploch jde provádět fokusováním paprsku přes cylindrickou optiku, která nám může dát ozářené místo, ne kruhového tvaru, ale tvaru, který je na obr. 9., což je velice výhodný tvar pro kalení ploch.

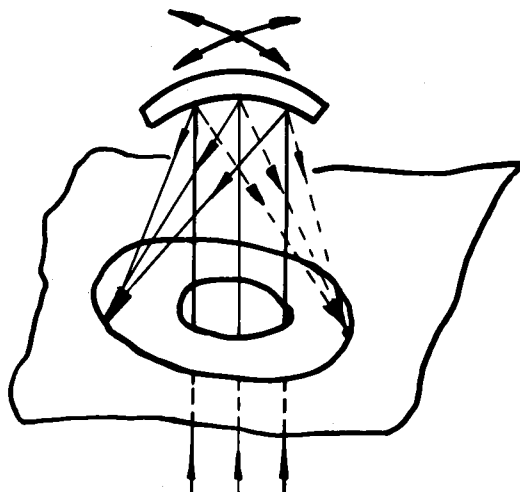


obr. 9. Formování paprsku pomocí cylindrické optiky
1 - paprsek ; 2 - cylindrická čočka; 3 - zakalené místo. /9/

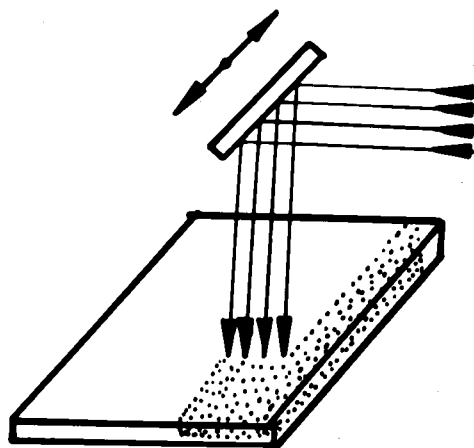
To bylo kalení impulsním laserem. Jde ale také využít kalení pomocí kontinuálního toku paprsku. Tento způsob je značně rozšířený např. v USA. Využívá se ho v práci /10/, kde použili na kalení ploch kmitavého pohybu paprsku, jak je na obr. 10 a. vidět. Laserem lze zpracovávat i těžko přístupná místa. Obr. 10 b. - opracování otvorů vibračním zrcadlem ; 10 c. - opracování ploch ; 10 d. - opracování vnitřních ploch pomocí hyperbolického zrcadla ; 10 e. - opracování vnitřních ploch.



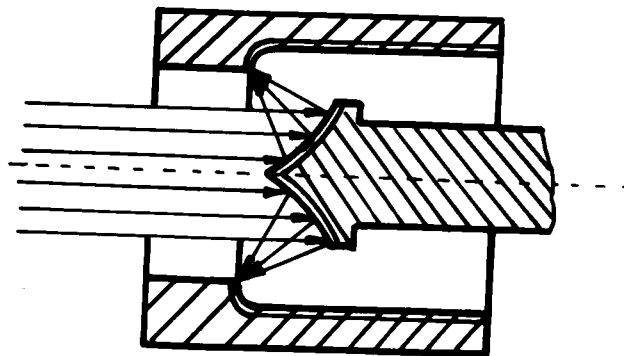
a)



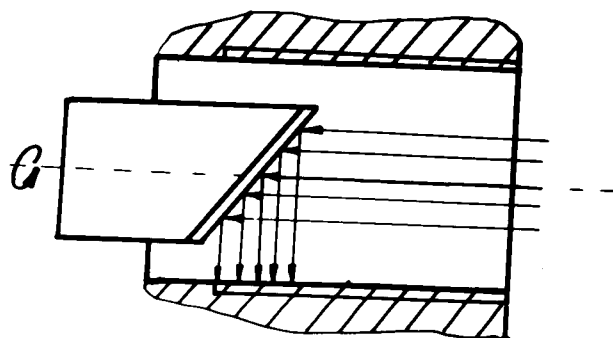
b)



c)



d)



e)

obr.10. Několik druhů opracování součástí paprskem laseru./9,10/

2.5. Formování hloubky zakalené vrstvy

Hloubka zóny h narušeného nebo přeměného materiálu impulsem laseru bude záviset na délce doby ozáření materiálu laserovým paprskem - t_p , na průměru vytvořené plošky - D , na rychlosti posunu - v . Platí, že :

$$t_p = D/v \quad . \quad (24)$$

Pro výpočet přibližné hloubky platí podle práce /9/ :

$$h = \sqrt{a \cdot t_p} \quad , \quad (25)$$

kdežto pro přesnější vyjádření hloubky zakaleného místa se dá užít vztahu v práci /5/, pak platí :

$$h = \sqrt{\frac{8 ar}{v \cdot \pi} - \frac{\pi a \cdot c \cdot r^2 \cdot \varphi \cdot T_0}{\alpha \cdot q}} \quad , \quad (26)$$

kde a - teplotní vodivost materiálu; T_0 - teplota fázových přeměn; q - plošná hustota výkonu laserového toku; φ - hustota materiálu; α - koeficient pohltivosti povrchu základního materiálu; r - efektivní rozměr svazku paprsků laseru; v - rychlost přemístění paprsku; c - měrná tepelná kapacita materiálu.

Pro informativní poznatky o hloubce zakalené vrstvy se stačí opírat o vztah (25), kdežto vztah (26) je mnohem přesnější a pro přesnost vypočítané hloubky lepší. Jenomže přesné zjištění všech členů ve vztahu není příliš jednoduché. A to ještě jsou uvedeny jen ty nejhlavnější členy, které ovlivňují hloubku zakalené vrstvy.

Pomocí vztahu (24) a (25) lze vyjádřit relativní rychlost přemísťování paprsku laseru :

$$v = \frac{a \cdot D}{h^2} \quad (27)$$

Při použité době trvání účinku t , impulsem laseru na materiál je možné dostat přímkovou zónu zpracovaného materiálu délky :

$$L = v \cdot t = \frac{a \cdot D \cdot t}{h^2} \quad (28)$$

Jestliže nedochází k natavení povrchu, pak se doba ozáření rovná době ohřevu materiálu. Dochází-li k natavení, pak je doba t_p ve skutečnosti menší než je uvedeno ve vzorci (24). Potom platí, že doba od začátku do chvíle, ve které začíná natavení povrchu, je dána :

$$t_{\text{tav.}} = \frac{K \cdot (T_{\text{tav.}})^2}{4 a q^2}, \quad (29)$$

kde $T_{\text{tav.}}$ - teplota tavení; K - koeficient tepelné vodivosti materiálu; q - plošná hustota výkonu; a - teplotní koeficient vodivosti materiálu. Pak místo vzorce (24) platí :

$$t_p = \frac{2r}{v} - \frac{\pi \cdot K \cdot T_{\text{tav.}}^2}{4 a q^2} \quad (30) \quad /9/$$

3. Experimentální část

3.1. Materiál pro experimentální zkoušky

Experimentální zkoušky tepelného zpracování ocelí laserem byly provedeny na vybraných materiálech ČSN 19436 a 19152.

Tyto materiály byly vybrány jednak z důvodu návaznosti výzkumných prací prováděných na katedře a jednak také z toho hlediska, že fázové přeměny, v podmínkách velmi rychlých ohřevů, probíhající při procesu tepelného zpracování laserem, byly již dříve předmětem studia. Záměrně bylo použito těchto materiálů také z důvodu, že byly v průběhu tepelného zpracování laserem očekávány poměrně jednoduché fázové přeměny.

Chemické složení základního materiálu použitých ocelí bylo pro ocel ČSN 19152 následující :

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	/3/
0,815%	0,320%	0,210%	0,020%	0,028%	0,080%	0,080%	.

Ocel ČSN 19436, která byla před tepelným zpracováním laserem vyžehána na měkko, měla zvýšený obsah Cr . Její chemické složení je :

C	Mn	Si	S	P	Cr	/4/
1,980%	0,420%	0,330%	0,030%	0,30%	11,79%	.

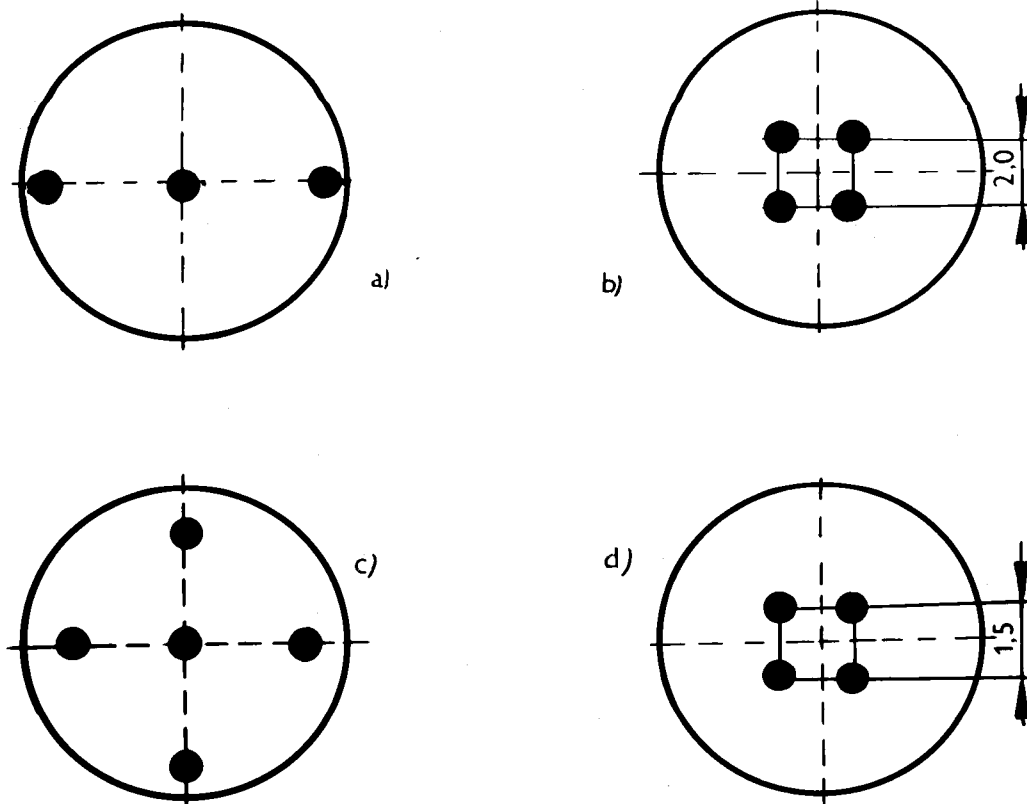
Jako výchozí materiál pro přípravu válcových vzorků o průměru 14 mm a délky 8 mm byla použita tyčovina.

3.2. Metodika experimentu

Tepelné zpracování laserem bylo provedeno vždy na čele vzorků, které byly před tímto zpracováním povrchově upraveny naleptáním v důsledku snížení odrazivosti.

Rozmístění tepelně zpracovaných oblastí na jednotlivých

vzorcích je názorně vidět na obr. 11.



obr. 11. Rozmístění jednotlivých tepelně zpracovaných míst u některých vzorků.

Každý zakreslený bod představuje oblast zasaženou jedním impulsem laseru přibližně o plošné hustotě výkonu $q=127 \text{ KW/cm}^2$. (Vyjímaje obr. 11.a).

Na obr. 11.a. byl ve vyznačených místech proveden ohřev dvěma po sobě jdoucími pulsy, a to tak, že se jednotlivé lokality ohřevu navzájem neovlivňovaly.