VYSOKÁ ŠKOLA STROJÍ A TEXTILNÍ

FAKULTA STROJNÍ

JAKOST ŘEZU PŘI ŘEZÁNÍ LASEREM - OVLIVNĚNÍ PARAMETRY ŘEZÁNÍ

MICHAEL KAHANEC
KMT - č. 39

LIBEREC : 20. prosince 1994

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ

Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8

STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE

ZAMĚŘENÍ

Tepelné zpracování a zkoušení materiálů

JAKOST ŘEZU PŘI ŘEZÁNÍ LASEREM - OVLIVNĚNÍ PARAMETRY ŘEZÁNÍ

Michael Kahanec

KMT - č. 39

Vedoucí diplomové práce : Doc. Ing. Jiří Horyna, Csc.

Rozsah práce a příloh

Počet stran : 66

Počet tabulek : 3

Počet příloh : 5

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI
3146075469

Liberec : 20. prosince 1994

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu Školní rok: 1993/94

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Michael K A H A N E C

obor Strojírenská technologie

zaměření Tepelné zpracování a zkoušení materiálu

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

Název tématu: Jakost řezu při řezání laserem

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se se zadanou tematikou a zpracujte rešerši.
2. Experimentálně sledujte závislost jakosti řezu při řezání kovu na parametrech řezání (výkon, posuv).
   Experimenty proveďte ve spolupráci s firmou LASER TECH Olomouc.
3. Dosažené výsledky vyhodnoťte a formulujte závěry ze zjištěných závislostí.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1329, Liberec 1
PSČ 461 17

V 164/94 S

KMT/ST

66 s., 18 p. příl.

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran textu

Seznam odborné litaratury:

PLUHAŘ, J. a kol.: Nauka o materiálech. SNTL Praha, 1989
Další literatura podle pokynů vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jiří Horyna, CSc.

Konzultant:

Zadání diplomové práce: 20.3.1994

Termín odevzdání diplomové práce: 30.12.1994

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ FAKULTA STROJNÍ L. S. LIBEREC

Doc.Ing. Karel DAĎOUREK, CSc
Vedoucí katedry

Prof. Ing. Jaroslav EXNER, CSc.
Děkan

V Liberci dne 14.3. 1994

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

V Liberci, dne 20. prosince 1994

.....

ANOTACE

KAHANEC M. :Jakost řezu při řezání laserem - ovlivnění parametry řezání (posuv, výkon).

Předložená diplomová práce řeší otázku volby nejvhodnějších parametrů laserového paprsku pro kvalitativní i vyskoproduktivní způsob řezání plechů materiálu ČSN 11 373.1 o tloušťkách 2, 4, 6, 8 mm.

V první části práce jsou shrnuty současné teoretické poznatky, uvedené především v zahraniční literatuře. Jedná se především o sledování parametrů důležitých pro obrábění. Zároveň jsou zde rozebrány vlivy ovlivňující kvalitu řezaného povrchu.

V experimentální části jsou vyhodnoceny dosažené výsledky měření - šířka řezu, drsnost povrchu řezu, mikrotvrdost, velikost tepelně ovlivněné oblasti, úhel rozevření řezné spáry.

OBSAH

	Seznam zkratek a symbolů	3
1.	ÚVOD	4
2.	TEORETICKÁ ČÁST	5
2.1	Obecná charakteristika laseru	5
2.2	Zásady řezání laserovým paprskem	9
2.2.1	Mechanismy laserového dělení materiálu	10
2.2.2	Parametry procesu laserového řezání	14
2.2.2.1	Řezatelnost materiálu	15
2.2.2.2	Rychlost řezání	16
2.2.2.3	Výstupní výkon laserového svazku	16
2.2.2.4	Tlak pomocného plynu	17
2.3	Technologické zákonitosti při laserovém řezání	17
2.3.1	Interakce CO_2 laseru s řezaným materiálem	18
2.3.2	Technologické hodnocení řezání LP	23
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
3.1	Charakteristika materiálu plechu 11 373.1	30
3.1.1	Příprava vzorků	32
3.2	Parametry použitého laserového záření	32
3.3	Vyhodnocení ozářených vzorků	36
3.3.1	Měření šířky řezu	36
3.3.2	Úhel rozevření řezné spáry	38
3.3.3	Hodnocení drsnosti povrchu ozářených vzorků	38
3.3.4	Hodnocení mikrotvrdosti vzorků	39
3.3.5	Měření tepelně ovlivněné oblast	40
3.3.6	Pozorování otřepů	41
3.4	Zhodnocení dosažených výsledků	41

3.4.1 Šířka řezu 42

3.4.2 Vyhodnocení úhlu rozevření řezné spáry 42

3.4.3 Výsledky drsnosti 43

3.4.4 Hodnoty mikrotvrdosti 45

3.4.5 Tepelně ovlivněná oblast 47

4. DISKUSE VÝSLEDKU 57

5. ZÁVĚR 61

6. POUŽITÁ LITERATURA 64

Seznam zkratek a symbolů :

LZ	laserové záření
LP	laserový paprsek
LŘ	laserové řezání
DP	diplomová práce
vz.č.	vzorek číslo
P	výkon laserového paprsku
p	tlak pomocného plynu
F	rychlost posuvu řezaného materiálu
TOO	tepelně ovlivněná oblast
TEM	mód laserového paprsku
KMT	katedra materialu
S_H	šířka řezu na horní straně vzorku
S_S	šířka řezu na spodní straně vzorku
tl. mtr.	tloušťka materiálu

1. ÚVOD

Vývoj nových konstrukčních materiálů, intenzifikace procesu obrábění a také ekonomické faktory způsobili prudké rozšíření nových obráběcích strojů, ale i speciálních nástrojů vysoké jakosti, přesnosti a výkonnosti. K těmto velmi produktivním zařízením se řadí i lasery.

Laserová technika zaznamenala v 80. letech mimořádný vzestup v průmyslově vyspělých státech světa, zejména v USA a Itálii.

Uplatnění laserové technologie u nás je zatím v počátcích. Mezi instituce, jež vlastní laser patří např. VÚ Praha, Laser - Tech s.r.o. Olomouc. Dále se u nás používají lasery v závodě Adast Adam, Kovošrot Sezimovo Ústí a mnoho dalších.

Pružnější zavádění laserové technologie je u nás spojeno s vysokou pořizovací cenou a nutnosti dovozu provozních plynů.

Pro technologické účely se nejvíce uplatňují CO_2 lasery pracující v pulsním nebo kontinuálním pracovním režimu.

Působením laserového zařízení lze dosáhnout extrémních podmínek ohřevu vedoucích nejen k natavení, ale i k řezání materiálu.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA LASERU

Laserový paprsek (dále jen LP) je v podstatě vlnění optického druhu, které patří do skupiny elektromagnetického záření a od jiných druhů záření se liší vlnovou délkou.

Laser (Light Amplicafication by Stimulated Emission of Radiation, je nekonvenční zdroj tepla, který vysílá laserové záření.

Z fyzikálního hlediska je laser kvantově elektrický zesilovač elektromagnetického záření, nejčastěji v oblasti viditelného světelného spektra a přilehlých vlnových délek (je zdrojem intenzivního monochromatického a časově i prostorově koherentního záření).

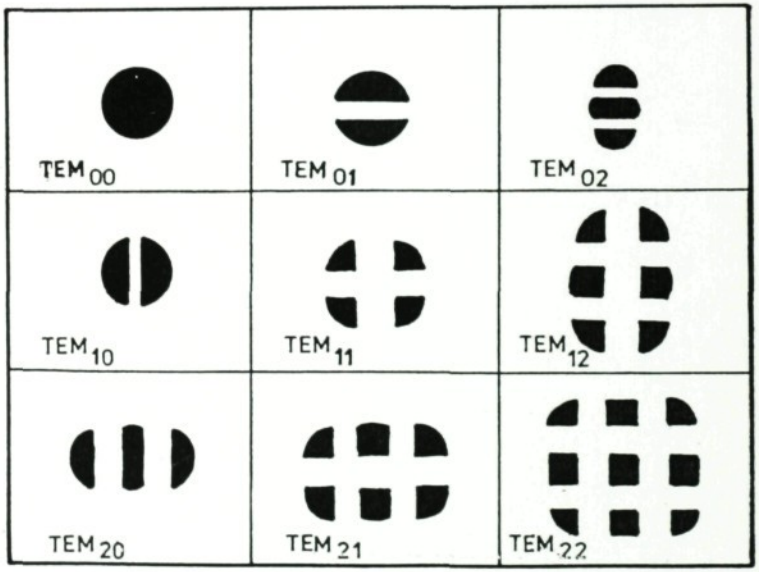
Princip laseru [1] je založen na stimulované emisi fotonů v aktivním prostředí - optickém rezonátoru laseru. Rezonátor představuje buď samostatný, speciálně opracovaný krystal, popřípadě válec naplněný plynem, zakončený protilehlými zrcadly z nichž jedno je částečně propustné druhé nepropustné.

Za normálních podmínek se částice, které tvoří aktivní prostředí laseru nachází v nejnižším energetickém stavu. Jsou-li tyto částice exitovány do vyšších energetických stavů vnějším zdrojem energie např. intenzivními světelnými záblesky nebo elektrickým výbojem, využívají při přechodu do původního energetického stavu světelné záření.

Při průchodu fotonu kolem excitované částice dojde k její

stimulaci a vyzáření fotonu stejné vlnové délky a směrem pohybu, který měl původní foton. Pak dochází k postupnému zvětšování toku fotonů, které po průchodu poloprostupným zrcadlem vytváří velmi intenzivní svazek koherentního záření.

Pro charakteristiku vlastností laserů je důležitý tzv. příčný profil svazku neboli, tvar průřezu laserového svazku. Tvar průřezu svazku záření vystupující z optického rezonátoru je závislý na vlnové délce fotonů, na souososti, vzdálenosti a zakřivení zrcadla a na průřezu laserové trubice (u CO_2 laserů výbojové trubice). Tvar průřezu svazku neboli mód je označován TEM. Teoreticky může být nekonečné množství módů, ale jen některé mají praktické průmyslové uplatnění.



Obr. 2 - 1 Schema některých typů módů $TEM_{m,n}$

Módová struktura obecně udává rozložení energie na průřezu LP. V teorii elektromagnetického pole jsou módy označovány symbolem $TEM_{m,n}$ (Transverse Excitacion Mode), kde index m udává počet uzlů pole v příčném směru ve směru osy x. Index n udává počet uzlů ve směru osy y. Některé typy módů jsou uvedeny na obr. 2-1. Pro LŘ je nejvýhodnější módová struktura TEM_{oo}. Laserové řezání je možné provádět i lasery pracujícími v nejbližším vyšším módu jako je TEM_{o1}, TEM_{1o}, TEM_{11} atd. V tomto případě je nutné počítat s větší drsností řezaných ploch a s tím, že při řezání tenkých plechů není rychlost řezání úměrná zvyšujícímu se výkonu laseru. Struktura TEM_{oo} má rozložení energie podle Gaussovy křivky. Dostáváme tak úzkou řeznou spáru, rovnou řeznou plochu a úzkou TOO a můžeme použít laser s nižším výkonem.

Pro řezání a dělení materiálů, především slitin Fe - C, mají v současné době největší uplatnění lasery CO_2 s pracovním (jmenovitým) výkonem 1 až 5 kW, s využitím módů TEM_{oo} a hustoty výkonu laseru až 10^9 [W.cm^{-2}].

Laserové záření je fokusační optikou soustřeďováno na povrch materiálu, část záření se odrazí a část je materiálem pohlcena.

Mezi důležité parametry laserového záření, které charakterizují jeho vlastnosti patří především výkon laseru, hustota výkonu (intenzita) I měřená na povrchu materiálu [W.cm^{-2}], vlnová délka záření [μm].

Podle režimu vyzařování lze lasery rozdělit na:

A) nepřetržité (kontinuální), označované jako CW lasery (Continuous Wave Laser);

B) pulsní, které vyzařují paprsek nespojitě.

Podle systému čerpání (zdroje exitace) mají největší význam dvě skupiny laserů: lasery s optickým čerpáním (většina pevnolátkových laserů) a lasery čerpané elektrickým výbojem (většina plynových laserů). Laserové záření se dále vyznačuje některými specifickými vlastnostmi, jako monochromatičnost, vysoká koherence, malou rozbíhavostí (směrovostí) svazku a vysokým zářivým výkonem.

K popisu vlastností laserového záření kontinuálního laseru se používají tyto základní pojmy:

1) Hustota energie svazku (energie svazku dopadající na jednotku plochy kolmé ke směru šíření svazku) [$J.cm^{-2}$];

2) Výkon svazku (energie svazku vyzářená za 1s) [W];

3) Intenzita - hustota výkonu (výkon připadající na jednotku plochy kolmé na směr šíření) [$W.cm^{-2}$].

Lasery používané pro řezání materiálu se vyznačují těmito vlastnostmi:

a) paprsek není ve fyzickém kontaktu s materiálem, nedochází k opotřebování nástroje;

b) širším sortimentem řezatelných materiálů od tlouštěk 0.1 do 20 mm s možností řezání např. vrstvených materiálů;

c) hustota výkonu se může na základě chromatičnosti laserového světla v širokých mezích měnit až do hodnoty 10^9 $W.cm^{-2}$;

d) vysokou produktivitou práce a výbornou kvalitou řezných ploch ;

e) lze provádět řez těžko přístupných míst materiálu;

f) tato technologie vykazuje i několikanásobné snížení měrné

energie proti jiným metodám řezání

g) lze řezat materiály s vysokou teplotou tání (Ta, W , Nb);

h) řez vykazuje chemickou čistotu materiálu a minimální deformaci

V tabulce 2.1 je provedeno porovnání různých parametrů laserového řezání s ostatními metodami.

Tab. 2.1:

Porovnání laserového řezání kovu s ostatními metodami

Použitá metoda :	šířka řezu v mm	produktivita v $cm^2.min^{-1}$
Laserové řezání	0.1 ÷ 0.5	40 ÷ 50
Anodo-mechanické řezání	0.5 ÷ 2.0	4 ÷ 10
Elektrochemické řezání	0.25 ÷ 0.4	0.7 ÷ 1.0
Elektrojiskrové řezání	0.1 ÷ 0.5	0.1 ÷ 1.0
Elektrokontaktní abrazivní řezání	0.5 ÷ 1.0	14 ÷ 20

CO_2 lasery se však vedle výhod vyznačují i nezanedbatelnými nedostatky.

Laser vyžaduje vysoké investiční náklady a pravidelnou údržbu. Obrobení materiálu závisí na parametrech a charakteru laseru. Světlo, které je těmito lasery vyzařováno, má relativně dlouhou vlnovou délku a od lesknoucích ploch se z 90 % odráží. Další nevýhodou laseru je jeho těžko měnitelná ohnisková vzdálenost a požadavek vysoké bezpečnosti práce.

2.2 ZÁSADY ŘEZÁNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM

Řezání je odstraňování materiálu v jedné nebo více osách z důvodu jeho dělení.

Nejvíce se laser využívá při řezání kovů, zejména při

dvojrozměrném tvarovém řezání tabulí plechů, které by jinak musely být zhotovovány prostřihovacím lisem nebo ručně po pracném narýsování tvaru. Většina řezacích prací laserem je prováděna u tlouštěk plechů do 10 mm, neboť tento proces je nejefektivnější. Řezání laserem je ideální pro zpracování v dávkách nebo malých až středně objemových výrobách. Pro zpracování materiálu dle [2] se používá především CO_2 laseru, neboť mají relativně vysokou účinnost (10 - 15 %) a splňují základní požadavky na vysokou rychlost obrábění, přesnost řezu a kvalitu povrchu řezných ploch. CO_2 lasery také zajišťují dosažení vysokých výkonů v trvalém provozu.

2.2.1 Mechanismy laserového dělení materiálu

Základní princip laserového dělení materiálu je lokální ohřev pevné látky laserovým svazkem na teplotu tavení nebo odpaření. Roztavený nebo odpařený materiál je ze spáry odstraňován proudem inertního plynu vedeného koaxiálně s laserovým paprskem.

Pro dělení materiálu laserem dle [4] se využívá velmi úzkého fokusovaného svazku vysoké hustoty výkonu až 1.10^9 Wcm^{-2} v základním módu (TEM_{00}), což umožňuje lokální ohřev na vysoké teploty v místě jeho dopadu na povrch materiálu a pouze malá část této energie je materiálem absorbována. U přechodových kovů, např. železa, niklu, molybdenu, je při vlnové délce záření 1 μm absorbováno asi 40 % záření, zatímco při vlnové délce 10 μm již pouze 5 až 10 %. Je však třeba konstatovat, že dopadem záření na již roztavený kov se jeho absorpce podstatně zvyšuje. Jiné poměry jsou u většiny plastů

- v oblasti viditelného záření jsou téměř propustné, zatímco v rozsahu vlnových délek 2 až 10 μm absorpce stoupá na 80 až 90 %.

Dělení materiálu laserem je možné provádět třemi různými způsoby. Při laserovém protavování dochází absorbcí energie laserového svazku fokusovaného do ohniska o průměru 0.05 až 0.25 mm k ohřevu materiálu nad teplotu tavení. Roztavený materiál je ze spáry odstraňován proudem inertního plynu vedeného koaxiálně s laserovým svazkem. U nekovových materiálů, které snadno hoří, (např. plexisklo, polypropylén, PVC atd.), se používá inertních plynů např. argonu nebo dusíku, jako ochrany proti vznícení nebo opálení řezných hran. Tato metoda je charakteristická vysokou rychlostí řezání a nízkou spotřebou energie na jednotku délky řezu. Na řezu jsou patrny stopy po odběru materiálu (striace) a v některých případech i otřep na spodní straně řezu.

Laserové sublimační řezání je jednou z variant laserového protavování při němž fokusovaný laserový svazek ohřívá materiál na teplotu odpaření. Vznikající páry jsou z řezné spáry odstraňovány proudem inertního plynu z trysky. Charakteristickými rysy této metody jsou úzká řezná spára a vysoká jakost řezu. Ve srovnání s laserovým protavováním je však spotřeba energie na jednotku délky řezu vyšší.

Další způsob vychází z vlastnosti oceli velmi rychle, po dosažení zapalovací teploty (leží pod teplotou tavení cca 1200° C), se spalovat v čistém kyslíku.

Laserové pálení je dalším způsobem, jež vychází z vlastnosti ocelí velmi rychle se, po dosažení zapalovací

teploty (pod teplotou tavení cca 1200° C), spalovat v čistém kyslíku. Materiál je v místě dopadu laserového svazku zahřátý na zápalnou teplotu a spálen v proudu aktivního plynu nejčastěji kyslíku. Oxidační účinky se projevují jednak počáteční oxidací povrchu, a tím zvýšením schopnosti materiálu absorbovat energii laseru (snížením koeficientu odrazivosti materiálu R), jednak vznikem přídavného exotermického tepla hoření, které se projevuje podstatným zvýšením rychlosti řezání. Vlastní proces řezání je pak důsledkem exotermické reakce materiálu s kyslíkem. Se stoupajícím podílem legujících prvků (především uhlíku, chromu a křemíku) se však řezací proces stává obtížnější.

Tento princip se používá při řezání kovů. Výhodou tohoto principu (oproti předchozím) spočívá v řezání kovů větších tloušťek s použitím větších rychlostí. Nevýhoda je širší tepelně ovlivněná oblast a vyšší drsnost povrchu řezů. Použití CO_2 laserů je dle [3] nejvýhodnější do tloušťky 6 až 7 mm.

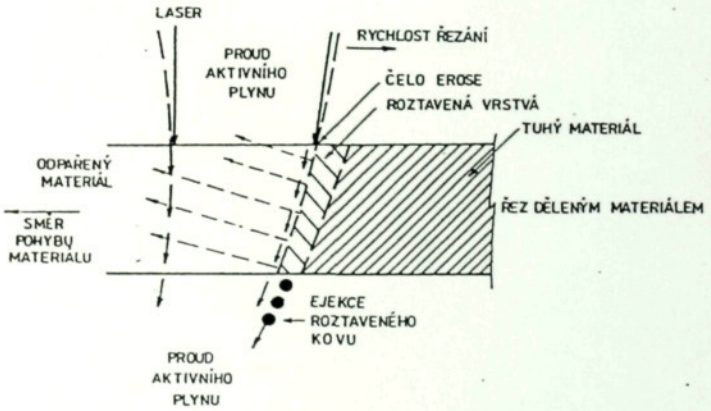
Prakticky lze řezat ocele do tloušťky asi 12 mm. Při této tloušťce se však již začínají projevovat negativní účinky v podobě negativního úhlu rozevření řezné spáry. Řezat lze i plechy povrchově upravené, např. pozinkované. Při sledování této problematiky byla vypracována řada modelů popisujících mechanismus laserového pálení. Většina z nich však nebere ohled na tři skutečnosti:

a) opomíjí vlivy různých účinků toku aktivního plynu jako např. ohřev zpracovaného dílu reaktivním účinkem plynu , tření roztaveného kovu a ochlazování vedením,

b) předpokládá, že k absorpci laserového záření dochází v rovině rovnoběžné s povrchem děleného materiálu,

c) opomíjí, že jak laserový svazek tak přídavný plyn jsou vedeny stěnami řezu do větších hloubek materiálu poblíž spodního povrchu.

Dosud nejpřijatelnější model úběru materiálu při laserovém dělení je na obr. 2 - 2. Zobrazený model je založen na skutečnosti, že k erozi a úběru materiálu nedochází v rovině rovnoběžné s povrchem děleného materiálu, ale ve vertikální rovině při spodním okraji . Tato rovina se nazývá "čelo eroze". Ani laserové záření ani aktivní plyn nejsou absorbovány v rovině rovnoběžné s povrchem děleného materiálu, ale jsou vedeny stěnami řezu a absorbovány ve vertikální rovině poblíž spodního okraje - to v případě, když je rovina polarizace laserového svazku rovnoběžná s rovinou



Obr. 2 - 2 Teoretický model mechanismu laserového pálení

řezu. Je-li rovina polarizace kolmá na rovinu řezu, stěny řezu absorbují více energie než čelo eroze a výsledkem je nižší účinnost řezání. Čelo eroze je s největší pravděpodobností pokryto tenkou vrstvou roztaveného kovu, která je ohřáta teplem z absorbovaného laserového svazku a z reakce mezi dopadajícími molekulami aktivního plynu a roztaveným kovem. K úběru materiálu dochází ejekcí roztaveného kovu u spodního povrchu děleného materiálu v důsledku tření taveniny a proudícího plynu a vypařováním na čele eroze.

2.2.2 Parametry procesu laserového řezání

Proces LŘ je dle [4] popisován parametry, které mohou být buď pevné (neproměnné) nebo proměnné v určitém rozsahu. Hodnoty pevných parametrů a rozsahy proměnných parametrů jsou určovány vlastnostmi technologického zařízení. Parametry jsou vzájemně svázány ve funkčních závislostech, souborně nazývaných technologické zákonitosti laserového řezání. Řezy materiálů nemají největší kvalitu v celém rozsahu těchto parametrů. Největší kvalitu mají jen při určitých hodnotách. Tyto hodnoty se nazývají optimální parametry laserového řezání. Tyto parametry se dají určit procesem optimalizace technologických zákonitostí. Pro každý druh technologického zařízení je tedy nezbytné experimentálně určovat optimální parametry.

Parametry popisující proces LŘ jsou následující:

1) druh řezaného materiálu a jeho tloušťka (řezatelnost);
2) tlak pomocného plynu;
3) rychlost pohybu LP po povrchu materiálu (tj. rychlost

řezání);

4) výkon LP při dopadu na materiál;

5) poloměr LP v místě fokusace;

6) polarizace LZ;

Optické vlastnosti fokusovaného LP jsou závislé na ohniskové vzdálenosti fokusační čočky a na dalších parametrech kontinuálních CO_2 laserů a laserového paprsku jako je výstupní výkon laseru, módová struktura a divergence laserového paprsku, vlnové délce laserového záření a nejmenším poloměru laserového paprsku ve svazku laserového záření.

2.2.2.1 Řezatelnost materiálu

Laserovým paprskem se mohou přirozeně řezat jen materiály, které laserové záření vůbec přijímají t.j. absorbují. Tato absorpční schopnost je funkcí materiálu a jeho povrchu, délky vlny laseru a teploty. Dosažením teploty tavení materiálu absorpce prudce vzroste. Jakmile se materiál taví, je řezání možné. Dále hraje značnou roli tepelná vodivost řezaného materiálu. Řezání není možné, jestliže se přivedené teplo ihned odvede a nepřispěje k potřebnému nárůstu teploty. Materiály jako zlato, stříbro, měď, mosaz a technicky důležitý hliník lze laserem řezat jen velmi těžko nebo vůbec ne. Jak již bylo zmíněno, hraje také řezací plyn důležitou roli. Zpravidla se používá dusík, vzduch nebo kyslík. Použití kyslíku při laserovém řezání oceli vede v důsledku dodatečné exotermické reakce k podstatnému zvýšení řezacího výkonu. Důležité je přitom také rozdělení energie v laserovém

paprsku. Má dosahovat nejvyšší hodnoty v jeho středu a k vnějšku má klesat v souladu s Gaussovou křivkou.

Tab.2: CO_2 lasery - řezatelnost uhlíkové oceli při danném výkonovém rozsahu

Rozsah :	200÷300W	300÷500W	500÷800W	800÷1500W	1500÷3000W
Max. řezaná tloušťka	1.5	5	9.5	13.0	19.0

2.2.2.2 Rychlost řezání

Rychlost a směr posuvu má velký význam pro kvalitu i kvantitu řezného procesu. Je nutno ji vždy podrobit optimalizaci podle požadovaného kritéria pro daný materiál (maximální řezný výkon, maximální kvalita integrity obrobeného povrchu atd.).

2.2.2.3 Výstupní výkon svazku

Výstupní výkon svazku dle [7] má rozhodující vliv na řezný výkon laserového obráběcího systému, avšak s použitím kritéria maximalizace ekonomické efektivnosti se pro řezání jeví optimální použití CO_2 laserů s maximálním výstupním výkonem od 1 do 5 kW. Zvyšování výkonu nad tuto hranici nemá očekávaný vliv na nárůst maximálního měrného úběru materiálu. Lasery vyšších výkonů mají naději na efektivní využití hlavně u hybridních metod obrábění s podporou laserů. Při tomto hodnocení je však třeba rozlišovat výkon v kontinuálním a v pulsním režimu.

2.2.2.4 Tlak pomocného plynu

Používání pomocných reaktivních plynů usnadňuje proces řezání. Působením plynu dochází k eliminaci taveniny v erozní frontě a tím ke zmenšováním šířky tepelně ovlivněné oblasti a tím i minimalizaci výskytu trhlin a deformací v důsledku tepelného pnutí. Pomocný plyn též pomáhá minimalizovat šířku řezné spáry.

Použitý plyn (kyslík, inertní plyn nebo vzduch) závisí na druhu materiálu a požadavcích kvality. Při řezání ocelí se ponejvíce užívá kyslík. Podle [5] dochází při použití kyslíku k 70 % zastoupení podílu exotermní reakce v energetické bilanci procesu úběru materiálu. Při porovnávání řezné rychlosti při použití argonu a kyslíku zjišťujeme dle [6], že přibližně 60 % energie pochází z exotermní reakce. Při řezání tlustých plechů z oceli nad 10 mm s asistencí reaktivních plynů dochází k situaci, že podíl exotermní reakce v celkové energetické bilanci se zvyšuje nad 90 %. To je stav kdy kvalita i kvantita řezného procesu je v rozhodující míře dána mechanismem hoření, se všemi negativními důsledky na přesnost a kvalitu sledované plochy materiálu. Je-li požadován povrch bez oxidů , použije se inertní plyn jako je helium. Tlak kyslíku je v rozsahu 0.1 až 0.34 MPa, zatímco tlak inertního plynu a vzduchu je v rozsahu 0.2 až 0.62 MPa.

2.3 TECHNOLOGICKÉ ZÁKONITOSTI PŘI LASEROVÉM ŘEZÁNÍ

Technologické zákonitosti při laserovém řezání souvisí s nejrůznějšími parametry laserového paprsku , které se dle

[2] dělí na pevné, limitující a proměnné.

Pevnými parametry jsou polarizace LZ a vlnová délka LZ. Limitující parametr je hloubka ostrosti, která limituje ohniskové vzdálenosti fokusačních čoček na základě tloušťek řezaných materiálů. Tyto parametry jsou při LŘ určité konstanty, které nevstupují do technologických zákonitostí. Do těchto zákonitostí vstupují zbylé parametry zařazené jako proměnné. Jedná se o poloměr LP v ohnisku a výkon LP dopadající na materiál. Dále do technologických zákonitostí vstupují ostatní parametry, t.j. druh a tloušťka materiálu, rychlost řezání a tlak pomocného plynu. Navíc důležitost rychlosti spočívá také v tom, že určuje ekonomickou efektivnost LŘ, která se zvětšuje se zvyšující se rychlostí LŘ. Zvyšování rychlosti řezání není možné provádět neomezeně, ale jen do určité hranice, při které se řezaný materiál začíná neprořezávat. Dolní hranice rychlosti je ta, při které začne docházet k autogennímu řezání. To se u uhlíkových ocelí projevuje širokou a nerovnoměrnou řeznou štěrbinou, u ostatních materiálů se projevuje velmi zhoršenou kvalitou řezu ve spodní části. Mezi touto horní a dolní hranicí rychlostí LŘ je kvalita řezných ploch nejlepší uprostřed rozsahu, kde ale není ekonomická efektivnost nejvyšší.

2.3.1 Interakce CO_2 laseru s řezaným materiálem

Jak již bylo uvedeno, pro řezání (dělení) materiálu se používají kontinuální CO_2 lasery, jejichž výkony se pohybují řádově od 0.4 do 5 kW. Výkon laseru je určen druhem a tloušťkou řezaného materiálu. Též je důležitý mód TEM

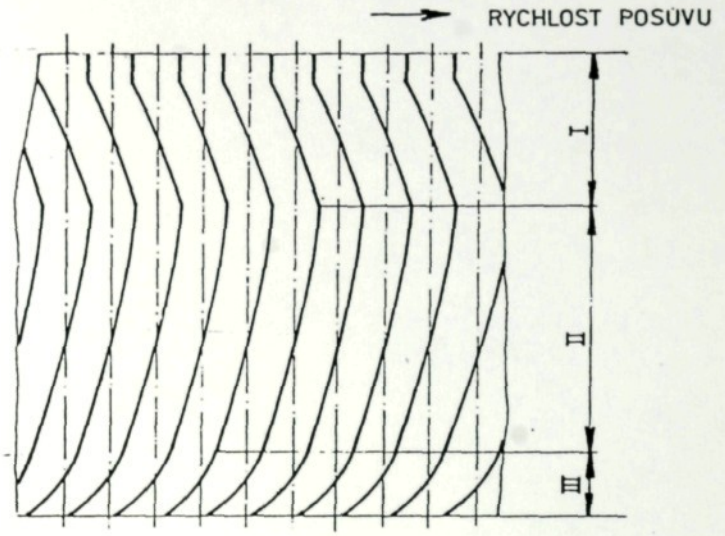
laserového záření. Nejčastěji se používá mód TEMoo, při použití vyšších módům je třeba uvažovat nebezpečí zvýšení drsnosti řezaného povrchu.

Laserové záření dopadá na řezný materiál v podobě světelné stopy. Materiál je nejčastěji upevněn na pohyblivý stůl. Pohyb stolu udává v podstatě rychlost posuvu laserového paprsku a tím rychlost řezání.

Uvažujeme-li řezání CO_2 laseru, pak při interakci laserového záření s materiálem dochází nejprve k ionizaci a vytvoření oblasti plazmy nad materiálem. Postupně začíná docházet k vytrhování částí materiálu a tvoření tlakových vln šířících se materiálem.

Po odstranění určité povrchové vrstvy materiálu vzniká úzká řezná štěrbina. A nutným požadavkem na parametry LP je kruhová polarizace, která zabezpečí rovnoměrnou absorpci laserového záření v řezné štěrbině. Vzniklá štěrbina je důležitým technologickým parametrem pro další postup paprsku řezaným materiálem jak uvádí [7]. Postupující LP vytváří na řezné ploše materiálu řeznou stopu tzv. mikroreliéf. Studium mikroreliéfu povrchu řezu na materiálu z uhlíkové oceli se zabýval OLEŠUK [8]. Zaměřil se též na zkoumání drsnosti povrchu řezu. Autor popisuje rozložení "brázd" na povrchu řezu. Tento výzkum byl prováděn na uhlíkové oceli při rychlosti řezu 2,5 m/min. Povrch řezu je schematicky zobrazen na obr.2 - 3. Je na něm možné rozlišit tři základní zóny, které se od sebe navzájem liší drsností povrchu a různým náklonem rýh ("brázd") ke směru obrábění na povrchu řezu.

Existence zóny I. na povrchu řezu charakterizuje rozrušení



Obr. 2 - 3 Schéma rozložení " brázd"

nepravidelně protékající od vrchní hrany dovnitř materiálu. Náklon "brázd" (ke směru obrábění) závisí na rychlosti přemisťování laserového zdroje. O něco níže je rozložena zóna II., ačkoli se formuje souvisle, má také zbrázděnou strukturu (méně výraznou) následkem periodického vytrhování produktu rozrušení vlivem proudu O_2 ze zóny I. Sklon "brázd" ze zóny II.je opačný ke směru řezání. Při velmi nízkých rychlostech řezání se sklon "brázd" zmenšuje v zóně I. i v zóně II..

Na pokračování procesu řezání, ale již bez účasti laserové energie poukazuje existence zóny III. Proces probíhá pouze za účasti proudu kyslíku vyfukujícího ze zóny obrábění přehřátý tekutý kov a jeho kysličníky. Rychlost prořezávání se přitom prudce snižuje, o čemž svědčí znatelný náklon "brázd" k hraně kovu. Současně se také snižuje kvalita hran řezu.

Při studiu příčných řezu u uhlíkové oceli bylo zjištěno, že šířka řezu u vrchní hrany je větší, než ve střední části, což potvrzuje teoretické domněnky. Existence zóny III. na povrchu řezu, charakterizovaná snížením rychlosti prořezávání, způsobuje znatelné rozšíření řezu na tomto úseku, u spodní hrany řezu.

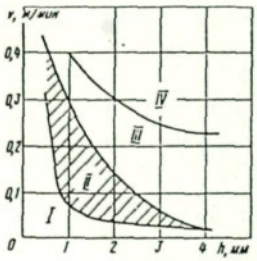
Drsnost povrchu řezu u uhlíkové oceli má proměnlivou hodnotu. V zóně I. je hodnota Ra minimální, její povrch je tvořen pravidelnými rýhami. Následující zóna II. je charakterizována tím, že některé rýhy jsou nezřetelné, nebo chybí, některé jsou naopak hlubší a širší než v zóně I. To způsobuje celkově větší R_a II. zóny až o několik stupňů. U materiálů s vysokou tepelnou vodivostí jako např. Cu, Al je šířka I. zóny mnohem menší než u ocelí, rýhy jsou velmi nezřetelné.

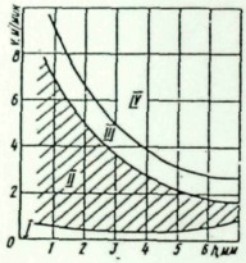
Zóna II. je charakteristická některými zvýšenými hodnotami mikrotvrdosti. Při nízkých rychlostech u desek menších tlouštěk (v našem případě h = 3.3 mm) je charakteristická jen přítomnost zón I. a II. Při zvýšení rychlosti řezání se na povrchu řezu objevuje i zóna III..

Proto je nutné pro získání kvalitních řezů, kdy drsnost povrchu nepřevyšuje hodnoty R_a = 40 - 50 µm, ohraničit rychlost, aby se zabránilo na povrchu řezu vytvoření zóny III.

Vedle způsobů řezání laserem vedoucích k vysoké kvalitě řezu se používají metody vysokoproduktivního obrábění tj. řezání materiálu laserem vysokou rychlostí bez zajištění vyšší kvality řezu. Takovým způsobem se při řezání uhlíkové

oceli liší režimy vysokoproduktivního obrábění (povrch řezu obsahuje všechny tři zóny) liší od režimu, který má zabezpečovat zvýšenou kvalitu řezu (povrch řezu neobsahuje zónu III.). Na obr. 2 - 4 a 2 - 5 jsou závislosti dosažitelných rychlostí řezání na tloušťce řezaných desek z uhlíkové oceli při laserovém výkonu 0.2 a 0.1 kW. Každá z křivek je hranicí, rozdělující oblasti s různou kvalitou získaných řezů. Oblast I. odpovídá autogennímu procesu řezání, II. - získání kvalitních řezů, III. - vysokoproduktivnímu obrábění, ale s nízkou kvalitou řezu, IV. - neúplnému prořezání desky. Z grafů je patrné, že optimální režimy kvalitativního řezání součástí, odpovídající maximální produktivitě procesu, se nacházejí blízko vrchní části zóny II., a režimy nejvíce produktivního řezání, ale s nízkou kvalitou řezu, jsou blízko vrchní hranice zóny III.





Obr. 2 - 4 Změna dosažených rychlostí řezání uhlíkové ocele s různou kvalitou v závislosti na tloušťce přípravku při P = 0.2 kW.

Obr. 2 - 5 Závislost dosažených rychlostí řezání na tloušťce přípravku při P = 1.0 kW.

Režimy obrábění, odpovídající I. a IV. zóně jsou technologicky neužitečné. Při snížení měrného výkonu LP začíná autogenní hoření při znatelně nižších rychlostech řezání. Současně je třeba dodat, že kvalita řezání uhlíkových ocelí souvisí s tlakem vháněného kyslíku. Se vzrůstem tlaku O_2 se dle [2] zužuje oblast stálého rozrušení (stopy) a zhoršuje se i drsnost řezu. Zlepšení kvality dosáhneme tlakem pomocného plynu od 0.05 až 0.15 MPa.

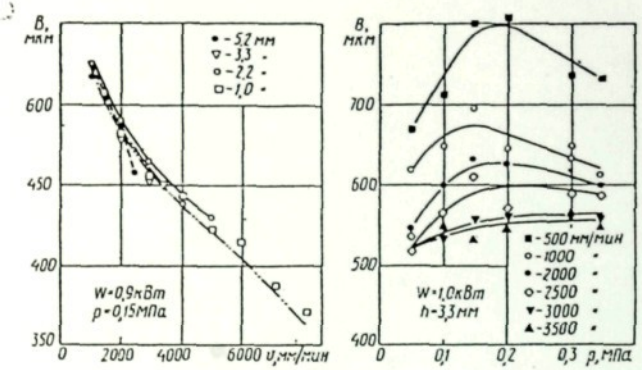
Při řezání nerezavějících ocelí pomocí kontinuálního laseru jsou na rozdíl od uhlíkových ocelí "brázdy" méně výrazné. Často povrch řezu je definován dvěma zónami, které charakterizují existenci neperiodického a nepřetržitého rozrušení. S klesající rychlostí řezání se snižuje i kvalita povrchu řezu druhé zóny. Tento jev je podobný autogennímu procesu řezání charakteristického pro uhlíkové ocele. Vysvětluje se snížením rychlosti řezání, výsledkem čehož se zvětšuje množství tepla, odvedeného od místa rozrušení tepelnou vodivostí, následně vzrůstá šířka řezu v nižších vrstvách oceli , zároveň zvyšuje drsnost jeho povrchu. Samovznícení kovu se v daném případě neprovede, protože na povrchu nerezavějící oceli se vytvářejí špatně tavitelné oxidy.

2.3.2 Technologické hodnocení řezání laserem

Dle [7] je řezání CO_2 laserem nízkoodpadový technologický proces. Z hlediska efektivnosti tohoto procesu, je důležité stanovit optimální podmínky jeho průběhu a zhodnotit jeho kvalitu dle ukazatelů jako jsou šířka řezu,

velikost tepelně ovlivněné oblasti (TOO), drsnost povrchu řezu ,velikost otřepu a další charakterstiky.

a) Šířka řezu představuje nejzávažnější kritérium stejně jako u klasických metod obrábění.Čím je větší, tím větší je množství odpadu. Šířku řezu zkoumal [7] na uhlíkové oceli a sestrojil závislost šířky řezu na rychlosti řezání jak je uvedeno na obr. 2 - 6 a. Též byl sledován vliv tlaku plynu (O_2) na šířku řezu. Tato závislost je na obr. 2 - 6 b.



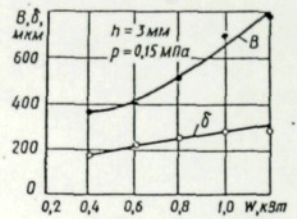
Obr. 2 - 6 a,b Závislost šířky řezu uhlíkové oceli na :

a) rychlosti řezu

b) tlaku O_2

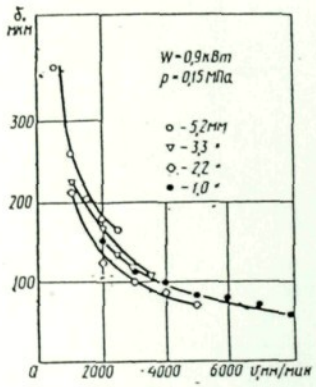
Šířka řezu závisí také na výkonu laserového záření (obr. 2 - 7). Se zvětšováním výkonu roste i šířka řezu.

b) Tepelně ovlivněná oblast zahrnuje část materiálu se změnou struktury, změnou tvrdosti, změnou barvy na povrchu vzorku, oblast s vytvořenými trhlinami a drobnými defekty na povrchu vzorku.



Obr. 2 - 7 Závislost šířky řezu (B) a TOO (označené jako δ) na výkonu LP u uhlíkové oceli

Po provedení předběžných pozorování na nařezaných vzorcích z uhlíkové oceli bylo stanoveno, že v podstatě hranice změny tvrdosti odpovídají hranicím změn barvy na povrchu vzorku. Bylo zjištěno, že na změnu barvy má vliv nejen hustota výkonu záření, ale i vlastnosti povrchu, existence oxidační vrstvy atd. To nám pomáhá při přibližném odhadu velikosti TOO. Změna barvy může mít nežádoucí efekt při vysokokvalitativním řezání.



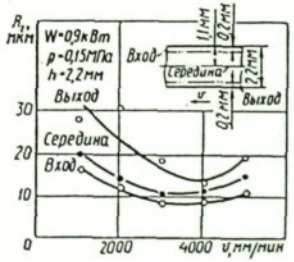
Obr. 2 - 8 Závislost rozměrů TOO na rychlosti řezání u uhlíkové oceli

U uhlíkové oceli se rozměry TOO zmenšují s vzrůstem rychlosti řezání (obr.2 - 8) a prakticky nezávisí na tloušťce oceli. Velikost TOO je závislá i na tlaku kyslíku. S vzrůstem tlaku se projevuje tendence ke zmenšování rozměru TOO při jakékoli rychlosti.

Obyčejně se však při malých rychlostech řezání (např. v=500 mm/min) tato tendence projevuje silněji. Při hodně vysokých rychlostech jsou rozměry TOO daleko stabilnější a skoro nezávisí na tlaku plynu.

Též byla stanovena závislost rozměrů TOO na výkonu záření. Se vzrůstajícím výkonem záření se několikrát zvětšují i rozměry TOO, jak je patrno z obr. 2 - 7.

c) Drsnost povrchu je velmi důležitá při odhadu kvality řezu. Hodnota drsnosti odráží vliv podmínek při opracování. Drsnost povrchu a rozměry TOO jsou důležité parametry pro stanovení tloušťky vrstvy materiálu, která se musí dále odstranit při další úpravě povrchu např. finišováním. Drsnost povrchu řezné plochy výpalku se mění se vzdáleností od lícní



Obr. 2 - 9 Závislost drsnosti povrchu řezu na rychlosti řezání pro uhlíkovou ocel tl. = 2.2 mm

plochy materiálu - plechu. Při řezání uhlíkové ocele malé tloušťky (tl. 1 mm) je kvalita povrchu řezu poměrně vysoká a hodnota drsnosti povrchu R_a je stabilní po celém povrchu řezu. Na drsnost povrchu řezu má vliv rychlost řezu. Existuje také její optimální hodnota, při kterém je R_a nejmenší. Při větších tloušťkách oceli je drsnost nestejnorodá, což ilustruje obr. 2 - 9.

V okolí místa, kde laserový paprsek vstupuje do řezaného materiálu je hodnota drsnosti R_a minimální. Ve střední části povrchu řezu je hodnota R_z vyšší a vzrůstá více v té části povrchu řezu, kde LP vychází z materiálu. Se změnou rychlosti se mění i drsnost ve všech třech úsecích povrchu řezu. Hodnota R_a na vstupu paprsku do materiálu se pohybuje cca 10 µm.

Dalšími charakteristikami řezu jsou např. vnější vzhled řezu, jeho příčný řez, množství vytvořeného otřepu a jeho rozvrstvení, stejnorodost řezu atd.

Pozorováním profilu řezu vzorku, opracovaného při optimálních režimech řezání za účelem získání nejvyšší kvality povrchu řezu (minimální drsnost na vstupu paprsku do materiálu), mikroreliéf uhlíkové oceli vykazuje stejnorodost (ustálenost) a dosažená kvalita povrchu je nejvyšší ve srovnání s ostatními materiály (nerezavějící ocel, titan, hliník). Mikronerovnosti nejsou výrazně odlišné.

Při řezání uhlíkové oceli velké tloušťky (h = 5.2 mm) při malé rychlosti (500 mm/min) začíná intenzivně hořet kov, dle toho na jakou teplotu se vzorek zahřívá (zda je dostatečná pro udržení tohoto procesu). Proto je na začátku řezání šířka

řezu často malá. Ale později, když se vzorek prohřál, se iniciuje proces hoření, šířka řezu se ustálí na 4 - 6 násobku (původní šířky) a řez vykazuje nepravidelný vzhled.

Je nezbytné vyhradit režimy obrábění jak kvalitativních, tak i hloubkových řezů. Musíme uvážit, že při rozřezávání uhlíkových a nerezavějících ocelí, titanových a hliníkových slitin je charakteristické tvoření otřepu, rozloženého na spodní hraně součásti.

Tvoření otřepu významně snižuje kvalitu laserového řezání. Je to následek navlhčování povrchu pevného kovu vyloučeným tekutým kovem a jeho kysličníky. Tímto způsobem dochází v povrchové vrstvě kovu difuzní cestou ke vzniku chemických sloučenin a roztoků.

Množství otřepů na hranách závisí na výkonu záření, tloušťce materiálu, rychlosti řezání a tlaku kyslíku. V tabulce č.3 je zaznamenána vzájemná závislost výšky a šířky otřepu na hranách v závislosti na výkonu záření a tloušťce kovu při p = 0.5 MPa u uhlíkové oceli.

Tabulka č.3 :

Tloušťka desky v (mm)	Hodnota výšky a šířky otřepu při výkonu LP(W) 800	450	300
1.0	0.12/0.24	0.25/0.45	0.31/0.52
1.5	0.22/0.31	0.37/0.60	0.49/0.69
2.0	0.31/0.36	0.45/0.70	0.58/0.82

Velikost otřepu může znatelně snížit správný výběr režimu řezání. Studium prokázalo, že při řezání uhlíkové oceli v režimu s nejvyšší produktivitou je posuzováno znatelné

tvoření otřepu. Při režimech nutných k získání kvalitních řezů je nižší hrana bez otřepů. Efektivní se zdají být povrchově aktivní vrstvy, které mění smáčitelnost součástky jejími tekutými oxidy, které nemění svoje vlastnosti ani za vyšších teplot. Experimentálně bylo zjištěno, že fosfátování, oxidování a chromování vzorků způsobuje znatelné zmenšení vznikajícího otřepu při laserovém obrábění.Avšak pro předběžné nanesení takového povlaku potřebujeme doplňující technologické operace, a kromě toho, né vždy jsou vhodné Proto je nejcílevědomější vypracovávat speciální režimy , které odstraňují bezprostředně tvoření otřepu na hranách řezu.

Je nutno připomenout i některá negativní zjištění, která se týkají např. zhoršování kvality obrobeného povrchu, což souvisí se vzrůstající tloušťkou obrobku ve směru kraniálním (zhoršování drsnosti R_a, zvětšování tloušťky TOO, Výskyt ulpělých kapek taveniny "otřepů" na výstupní ploše materiálu atd.). Nelze opomenout ani negativní vliv tepelných a optických vlastností obrobku.

Negativní vliv v procesu obrábění má také odpařování řezaného materiálu, jež způsobuje vytvoření obláčku laserové plazmy, která zhoršuje účinnost úběru materiálu.V kapalném skupenství zvětšuje R_z a způsobuje otřepy. Zvětšování vzdálenosti nastavení laserové hubice od vstupní plochy obrobku se projevuje negativně v procesu obrábění vzhledem k omezeným fokusačním možnostem laserové hubice, fokusující jak laserový svazek, tak i proud pomocného plynu.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Předmětem výzkumu bylo řezání materiálu ČSN 11 373.1 kontinuálním CO_2 laserem, s cílem rozšíření znalostí a vzájemné vazby technologických parametrů a jejich vliv na jakost řezu i produktivitu práce.

Vlastní zpracování bylo provedeno na laserovém technologickém centru vyrobeném britskou firmou Control Laser, Ltd., jehož výkonovým zdrojem je kontinuální CO_2 laser s plynule měnitelným výstupním výkonem laserového svazku od 600 do 2500 W. Toto centrum je vlastnictvím firmy Laser - Tech. s. r. o. , která podniká v oblasti aplikací laserových technologií ve strojírenské výrobě. Je registrována od roku 1991 a byla založena několika vědecko - výzkumnými a technickými pracovníky bývaleho výzkumného ústavu koncernu Sigma v Olomouci.

Materiál - plech 11 373 byl zvolen proto, že patří mezi technicky nejpoužívanější.

3.1 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU PLECHU 11 373.1

Uvedené plechy se vyrábí v provedení jako tenké (tj. max. 3 mm) a tlusté (tj. nad 3 mm) válcováním, popřípadě válcováním za tepla. ČSN 42 0113 označuje tento materiál ve stavu normalizačně žíhaném. Povrch plechu může být dle ČSN okujený nebo mořený.

Chemické složení materiálu 11 373.1

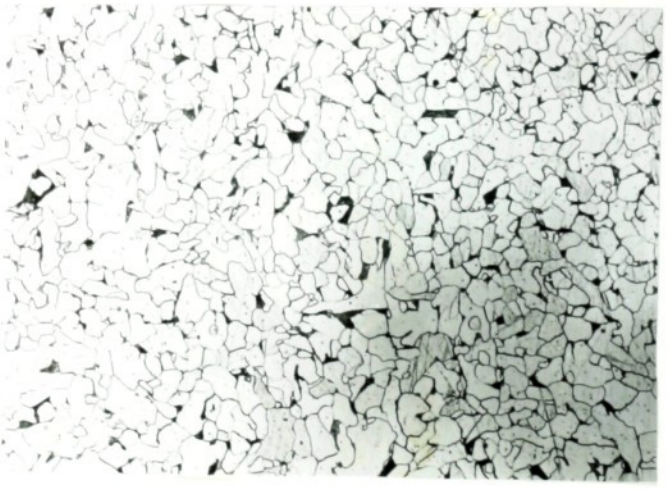
(0.05 ÷ 0.2) % C

(0.01 ÷ 0.05) % P

(0.01 ÷ 0.05) % S pozn.×

× = pro ø nad 16 mm - max 0.22 %

Struktura základního materiálu použitých plechů je feriticko-perlitická, byla vyhodnocena běžným metalografickým způsobem. Uvedená struktura je na obr. 3 - 1. Hodnocení výchozí struktury vzorků plechu bylo provedeno dle ČSN 42 0469 a ČSN 42 0462. Výchozí struktura byla sledována při 100 násobném zvětšení. Velikost zrna byla stanovena dle etalonové řady A, velikost zrna č. 9 (cca 95 ÷ 98 % feritu).



Obr 3 - 1 Struktura ocelového plechu 11 373.1
Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital

Mechanické vlastnosti plechu

minimální mez kluzu R_e : 235 MPa

pevnost v tahu R_m : 360 - 470 MPa

minimální tažnost A_{10} příčně : 23 %

zkouška lámavosti dle ČSN 42 0401:

úhel ohybu α = 180° průměr trnu D = 0.5 × a (a = ø tyče)

svařitelnost zaručená

Plech 11.373.1 je jedním z nejpoužívanějších materiálů a má dle ČSN 42 0074 široké praktické uplatnění.

Patří mezi oceli obvyklých jakostí používaných na bezešvé trubky, pro konstrukce a potrubí, láhve pro stlačený a zkapalněný vzduch, oceli na ventily, valivá ložiska, pro stavbu plavidel, oceli na nýty a pro součásti kolejových vozidel. Tento materiál lze také použít pro pruhy na ráfky kol či jiné součásti strojů staticky a dynamicky namáhaných.

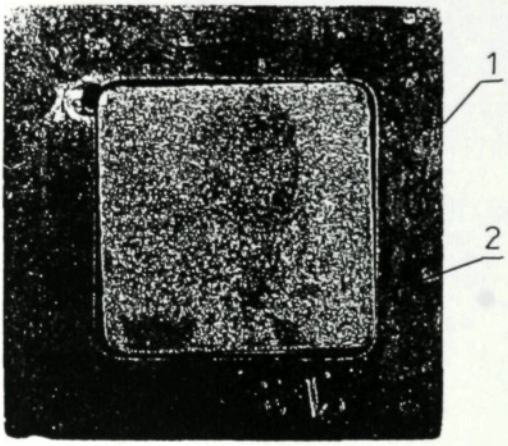
3.1.1 Příprava vzorků

Z daného materiálu (plechu) byly vyhotoveny vzorky různé tloušťky o rozměrech 55 × 55 mm. Celkem bylo takto zhotoveno 35 vzorků o tloušťkách 2, 4, 6, a 8 mm.

Na obr. 3-2 je uveden vzorek ocelového plechu, kde je patrný vnější obvodový řez a současně i řez vnitřní, který byl předmětem zkoumání.

3.2 PARAMETRY POUŽITÉHO LASEROVÉHO ZÁŘENÍ

Vyhodnocované vzorky plechů materiálu 11 373.1 měly tloušťku 2, 4, 6 a 8 mm. Větší tloušťky nebyly voleny, protože jsou již válcovány za tepla. Toto má vliv na velikost



1 - obvodový řez

2 - vnitřní řez - experimentálně hodnocený

Obr. 3 - 2 Pohled na zkoumaný vzorek

okují na povrchu plechů a tudíž i kvalitu řezů, která by zbytečně zkreslila sledované zákonitosti. Menší tloušťka nebyla volena, poněvadž se při jejím dělení používá až dvojnásobný tlak pomocného pracovního plynu. Toto by zkreslovalo zákonitosti s konstantním tlakem pomocného plynu pro všechny tloušťky materiálu.

Ozáření studovaných vzorků je charakterizováno

a) výkonem laserového paprsku

b) tlakem pomocného plynu

c) rychlostí posuvu materiálu.

Při provádění ozáření těchto vzorků byla vždy jedna z těchto veličin proměnná pro určitou skupinu vzorků.

Při ozařování všech tloušťek plechu byla pro jednu skupinu vzorků proměnná rychlost posuvu LZ (vzorku) a konstantními parametry zůstaly výkon LZ a tlak pomocného plynu.

Další skupinou vzorků o tloušťce 8 mm, jsou vzorky s proměnným byl tlakem pomocného plynu za použití konstantního výkonu i rychlosti posuvu materiálu. Tloušťka 8 mm byla volena proto, že se u ní nejvíce projevuje vliv tlaku plynu na drsnost řezu.

Poslední skupinou vzorků byly plechy o tloušťce 4 mm, kde proměnnými parametry LZ byl výkon při konstantní rychlosti posuvu a tlaku pomocného plynu.

Tato skupina byla použita z důvodu, že u tloušťky plechu 4 mm se již projevují všechny tři zóny drsností a lze pro toto řezání použít i výkon laseru 2000 W, kdežto na tloušťce 6 a 8 mm se používá jen maximální výkon laseru 2500 W.

Vedle výše uvedených proměnných parametrů laserového záření je třeba uvést, že bylo dále použito těchto konstantních parametrů

a) mód laseru TEM_{01}(90 %) a TEM_{10} (10 %)

b) ohnisková vzdálenost fokusační čočky 150 mm

c) pomocný plyn a jeho čistota O_2 99.5 %

Přehled vzorků a parametrů laserového záření

1) Vzorky s proměnnou rychlostí posuvu F

a) tl. 8 mm, P = 2500 W, p = 1.0 bar

vzorek č. 11 F = 1000 mm/min

12 F = 1100 mm/min

13 F = 1200 mm/min

14 F = 1300 mm/min

15 F = 1400 mm/min

b) tl. 6 mm, P = 2500 W, p = 1.0 bar

vzorek č. 11 F = 1200 mm/min

12 F = 1400 mm/min

13 F = 1600 mm/min

14 F = 1800 mm/min

15 F = 2000 mm/min.

c) tl. 4 mm, P = 2000 W, p = 1.0 bar

vzorek č. 11 F = 1200 mm/min

12 F = 1400 mm/min

13 F = 1600 mm/min

14 F = 1800 mm/min

15 F = 2000 mm/min.

16 F = 2200 mm/min

17 F = 2400 mm/min

d) tl. 2 mm, P = 1500 W, p = 1.0 bar

vzorek č. 11 F = 1500 mm/min

12 F = 2000 mm/min

13 F = 2500 mm/min

14 F = 3000 mm/min

15 F = 3500 mm/min

16 F = 4000 mm/min

2) **Vzorky s proměnným tlakem pomocného plynu p**

tl. 8 mm, F = 1200 mm/min, P = 2500 W

vzorek č. 21 p = 0.6 bar

22 p = 0.7 bar

23 p = 0.8 bar

24 p = 1.0 bar

25 p = 1.2 bar

26 p = 1.4 bar

3) **Vzorky s proměnným výkonem laseroveho záření P**

tl. 4 mm, F = 2000 mm/min, p = 1.0 bar

vzorek č. 31 P = 1500 W

32 P = 1750 W

33 P = 2000 W

34 P = 2250 W

35 P = 2500 W

3.3 VYHODNOCENÍ OZÁŘENÝCH VZORKŮ

S využitím již uvedených poznatků přistoupíme k vyhodnocování parametrů, které ovlivňují vlastnosti sledovaných řezů. K těmto parametrům patří především šířka řezu, drsnost povrchu řezu, průběh mikrotvrdosti v blízkosti řezné hrany, šířka tepelně ovlivněné oblasti, úhel rozevření řezné spáry a velikost otřepu na spodní hraně vzorku.

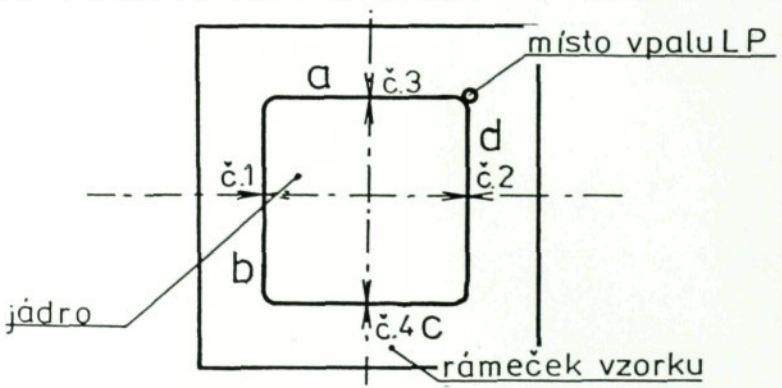
3.3.1 Měření šířky řezu

Šířka řezu byla sledována u všech vzorků, u kterých byly

proměnnými parametry rychlost posuvu a výkon laserového záření, neboť patří mezi nejdůležitější kritéria, určující rozměrovou přesnost budoucího výrobku, množství odpadu, kvalitu řezu atd.

Vyhodnocení tohoto parametru bylo provedeno tak, že příslušný vzorek byl ustaven v pomocném přípravku, kde byla současně přesně centrována vyříznutá střední část (jádro) vzorku.

Měření bylo u každého vzorku provedeno celkem čtyřikrát. Dvakrát v podélném směru a dvakrát ve svislém směru, vždy v jedné přímce, která souhlasila se směrem posuvu manipulační desky mikroskopu (byla současně rovnoběžná s hranou vzorku) a protínala řeznou spáru ve dvou místech. Schema znázorňující místa měření šířky řezu je znázorněno na obr. 3 - 3. Z těchto čtyř měření byl vždy vypočten aritmetický průměr. Každé měření bylo tabelárně zpracováno a je uvedeno v příloze 1.



Obr. 3 - 3 Schéma míst měření šířky řezu a označení hran řezu

Měření bylo provedeno na mikrotvrdoměru ZWICK, výrobce SRN, který měří s přesností na desetitisíciny milimetru a to za pomoci modulu pro měření vzdáleností. Při opakovaném

měření bylo zjištěno, že se naměřené hodnoty se neliší více než o 15 %.

3.3.2 Úhel rozevření řezné spáry

Hodnocení měření úhlu rozevření řezné spáry navazuje přímo na měření šířky řezu a vychází z úvahy, že by tyto úhly měli být při optimálních řezech malých tloušťek materiálu, téměř nulové. U větších tloušťek, u nichž se již rozlišují tři oblasti na povrchu řezné plochy, by se měl začít projevovat určitý úhel úkosu. Velikost úhlu rozevření spočteme ze vztahu (3.1) .

$$tg\ (\alpha\ /\ 2) = \frac{S_v - S_s}{2 \times t} \qquad (3.1)$$

kde značí: S_v - šířku řezu na vrchní straně vzorku,

S_s - šířka řezu na spodní straně vzorku.

t - tloušťka materiálu

Jednalo - li se o takové rozevření řezné spáry, že šířka řezu na vrchní straně je větší než na spodní, je pak úhel označen v tabulkách jako P (pozitivní) nebo naopak, označený jako N (negativní).

Získané hodnoty úhlu α, tabelárně zpracované, jsou uvedeny v příloze.

3.3.3 Hodnocení drsnosti povrchu ozářených vzorků

Jedním z nejvýznamnějších parametrů, hodnotícím kvalitu povrchu řezu je hodnota drsnosti povrchu. Určuje nám zda

budou potřebné další finalizující úpravy, zlepšující kvalitu povrchu řezu.

Měření bylo provedeno na povrchu řezu jader vzorku, na přístroji HOMEL TESTER s použitím těchto veličin - měřená dráha byla 6.3 mm, cut off 2.5, použitý měřící hrot T 100.

Měřeny byly vždy hrany ležící naproti místu vpalu LP do materiálu, protože hrany, do kterých zasahoval vpal, by následně mohly býti ovlivněné. Z obrázku 3 - 3 je patrné, že se jednalo vždy o hrany označené b, c. Zároveň byla z měřících přístrojů odečítana i hodnotu maximální naměřené drsnosti.

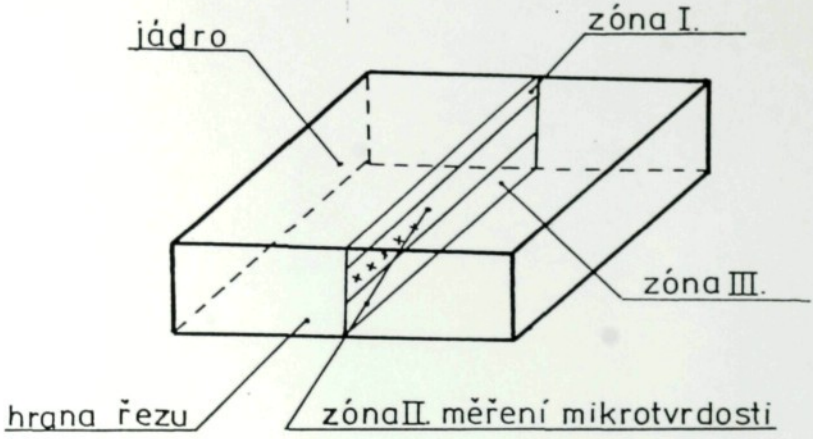
U menších vzorků byla drsnost stabilní po celé délce povrchu (2 mm). U větších tlouštěk (4, 6, 8 mm) byla měřena drsnost zóny II. Poněvadž drsnost zóny I. je velmi malá a drsnost zóny III. je zase naopak v některých případech neměřitelná vzhledem k tomu, že v této zóně je velké množství "brázd", které mají velmi ostré hrany a mohly by způsobit poškození hrotu měřící aparatury.

3.3.4 Hodnocení mikrotvrdosti vzorků

Průběh mikrotvrdosti byl měřen na jádrech ozářených vzorků (v místě cca uprostřed zóny II), jak je patrno ze schéma na obr. 3 - 4.

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno pouze u vybraných vzorků s tloušťkou plechu 2, 4, 6 a 8 mm, kde proměnným parametrem byla rychlost posuvu a také u vybraných vzorků s proměnným výkonem LZ.

Měření tvrdosti metodou VICKERSE bylo prováděno na mikrotvrdoměru ZWICK při zatížení $HV_{0.2}$. U všech vzorků bylo



Obr. 3 - 4 Schéma vzorku s vyznačeným místem pro měření mikrotvrdosti

patrné, že směrem do hloubky hodnota mikrotvrdosti poměrně rovnoměrně klesá až k hodnotám základního materiálu. Hodnoty mikrotvrdosti jsou uvedeny v tabulkách - příloha č. 4 a jsou také graficky zpracovány. Uvedené grafy jsou v části práce " Grafické záznamy experimentů " .

Též byla měřena mikrotvrdost základního materiálu (tj. materiálu před ozářením laserem) a bylo zjištěno, že tato hodnota činí 135 $HV_{0.2}$.

3.3.5 Měření tepelně ovlivněné oblasti

Měření velikosti tepelně ovlivněné oblasti bylo provedeno na stejných vzorcích, jež byly již předtím použity pro měření mikrotvrdosti. Prováděno bylo při mikroskopickém pozorování na optickém mikroskopu NEOPHOT-32, výrobce CARL ZEISS JENA

(NDR). Získané výsledky TOO byli naměřeny zhruba uprostřed tloušťky vzorku (zóna I.).

Vzorky pro mikroskopické pozorování byly připraveny běžným metalografickým způsobem. Pro zvýraznění struktury bylo použito leptadlo Nital 3 %. Vzorky byly na mikroskopu pozorovány při zvětšení 100 a 250 násobném.

Na následujících obrázcích 3 - 5 až 3 - 19 jsou uvedeny struktury ovlivněných oblastí vybraných vzorků v místě, kde laserový paprsek vstupoval do materiálu (zóna I) a kde je tedy TOO nejmenší. Tyto snímky mají 250 násobné zvětšení.

3.3.6 Pozorování otřepů

Hodnocení ozářených vzorků z hlediska problematiky vzniku otřepu, který vzniká po laserovém ozáření na spodním okraji řezné hrany vzorku bylo provedeno pouze orientačně, především pro posouzení kvality řezu z hlediska určení optimálního režimu řezání a možnosti využití pro kvalitativní řezání.

3.4 HODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Při hodnocení uvedených parametrů, provázejících proces řezání materiálu bylo získáno široké spektrum výsledků měřených veličin. Poměrně velké množství proměnných parametrů laserového záření umožňuje kvalitní srovnání všech naměřených hodnot a získaných výsledků. Následující charakteristiky řezaného materiálu byly tedy hodnoceny z hlediska nalezení důležitých parametrů, ovlivňujících významně proces řezání.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 1 až 6.

3.4.1 Šířka řezu

Šířka řezné spáry byla stanovena u všech ozářených vzorků s proměnnou rychlostí posuvu a proměnným výkonem LZ.

Skupina vzorků, u které byla při řezání proměnná rychlost posuvu, je charakteristická tím, že ve většině případů se šířka řezu zmenšuje s rostoucí rychlostí posuvu.

Pro vzorky tloušťky 4 mm, u kterých byla proměnná veličina výkon laserového záření, je charakteristický fakt, že s rostoucím výkonem LZ roste i šířka řezu. S přírůstkem výkonu o 1000 W se šířka řezu zvětšila o 0.0478 mm, což odpovídá téměř 10 % původní hodnoty šířky řezu. Tento fakt je pro nás nepříznivý, neboť se snažíme minimalizovat hodnotu šířky řezu. Proto je výhodnější řezat tento materiál při nižším výkonu 1500 W.

Při hodnocení vzorků ozářených srovnatelnými parametry laserového záření (P=2.5 kW, p=1 bar, F=1200 mm/min) je možno konstatovat zvýšení šířky řezu u vzorků tloušťky 8 mm o 0.048 mm (8 %) oproti vzorku tloušťky 6 mm. Naopak vzorek tl. 4 mm má o 0.0128 mm (3%) menší šířku řezu než vzorek tl. plechu 2 mm.

3.4.2 Vyhodnocení úhlu rozevření řezné spáry

Výsledky z naměřených hodnot nepoukazují jednoznačně na vliv parametrů LZ na velikost a typ úhlu rozevření.

Mimo skupiny plechů tl. 2 mm, nepřesáhla u většiny vzorků velikost tohoto úhlu hodnotu 1.5 stupně. To lze vysvětlit příliš vysokým použitým výkonem 1500W pro řezání vz. tl 2 mm.

Při určování typu rozevření řezné spáry (P - pozitivní,

N - negativní), lze konstatovat, že u tl. plechu 2 mm, při proměnné rychlosti posuvu je tento parametr u všech sledovaných vzorků pozitivní. Naopak všechny vzorky tl. 8 mm s proměnnou rychlostí posuvu vykazovaly negativní rozevření řezné spáry. U vzorků tl. 4 a 6 mm není druh rozevření řezné spáry jednoznačný. U nižších rychlostí posuvu se projevuje více pozitivní typ, při vyšších rychlostech posuvu negativní.

Minimální hodnota úhlu rozevření byla naměřena u vz. č. 33 tl. 4 mm (P = 2000 W; p = 1 bar; F = 2000 mm/min) a má hodnotu 0.01719 stupně. Maximální hodnota činí 3.98046 stupně u vz.č. 12 tl. 2 mm (P=1500 kW, p=1 bar, F=2000 mm/min).

Minimální úhel rozevření odpovídá optimálnímu řezu, kolmo na řezaný materiál. Vzorky s minimálním úhlem by tedy měly být řezány optimálními parametry laserového řezání.

Ze vzorků s proměnným posuvem to jsou:

1. tl. 2 mm - vzorek č.16 (P=1500 W;p=1 bar; F=4000 mm/min)
   úhel rozevření 0.61879 stupně
2. tl. 4 mm - vzorek č.4 (P=2000 W,p=1 bar, F=1800 mm/min)
   úhel rozevření 0.25497 stupně
3. tl. 6 mm - vzorek č.11 (P=2500 W;p=1 bar; F=1200 mm/min)
   úhel rozevření 0.11555 stupně
4. tl. 8 mm - vzorek č.11 (P=2500 W;p=1 bar; F=1000 mm/min)
   úhel rozevření 0.3979 stupně.

Ze vzorků s proměnným výkonem LP :

tl. 4 mm - vzorek č. 33 (P=2000W, p=1 bar, F=2000mm/min)
úhel rozevření 0.01719 stupně.

Shrneme - li všechny zjištěné poznatky můžeme konstatovat, že s klesající tloušťkou plechu se negativní druh rozevření mění v pozitivní.

3.4.3 Hodnocení drsnosti povrchu řezu

Kvalitu povrchu řezu nám charakterizuje jeho drsnost, kterou vyhodnocujeme pomocí hodnoty střední aritmetické úchylky drsnosti povrchu řezu R_a. Z naměřených hodnot můžeme vyvodit závěr, že se drsnost povrchu snižuje s rostoucí rychlostí posuvu.

Maximální hodnota drsnosti povrchu řezu R_a byla naměřena na vzorku č. 12 tloušťky 8 mm (P=2.5 kW, F=1100 mm/min, p=1 bar) a činí 11.1 µm. U tloušťky 8 mm byla při maximální rychlosti posuvu 1400 mm/min (P=2.5 kW, p=1 bar) naměřena hodnota R_a=6.4 µm. U vzorků tl. plechu 6 mm (P=2.5 kW, p=1 bar) byly při rychlostech 1200 až 2000 mm/min naměřeny hodnoty drsnosti R_a v rozmezí od 3.2 do 7.35 µm, přičemž minimální hodnota drsnosti odpovídá maximální rychlosti posuvu. Tyto naměřené hodnoty drsnosti povrchu řezu odpovídají svými parametry hodnotám, které dosahujeme běžným obráběním (jemné hoblování, čelní frézování).

Hodnoty drsností u vzorků tl. 4 mm (P=2.0 kW, p=1 bar) kolísají mezi 1.5 a 3.5 µm při rychlostech posuvu od 1200 do 2400 mm/min. Z naměřených hodnot však nelze vyvodit jednoznačný závěr a popis závislosti drsnosti povrchu na měnící se rychlosti posuvu. Minimální drsnost byla naměřena na vzorku s rychlostí posuvu 2000 mm/min. Hodnota R_a se však dále zvyšuje s rostoucí rychlostí posuvu. U vzorků tl. 2 mm

(P=1.5 kW, p=1 bar) platí, že s rostoucí rychlostí posuvu se hodnota drsnosti snižuje. Při posuvu 1500 až 4000 mm/min klesají hodnoty R_a od 3.15 do hodnoty 2.20 µm, na které se ustálila od rychlosti posuvu 3000 mm/min.

Vzorky tl. 4 mm s proměnným výkonem laserového záření (posuv 2000 mm/min, p=1 bar) nevykazují po vyhodnocení jednoznačnou rostoucí či klesající závislost drsnosti na změně výkonu LZ. Naměřené hodnoty se pohybují v rozmezí 2.15 až 2.85 µm. Maximální hodnota drsnosti byla naměřena při výkonu 2 kW, minimální při 2.25 kW.

3.4.4 Hodnoty mikrotvrdosti

Měření hodnot mikrotvrdosti bylo provedeno na vybraných vzorcích tloušťky 2, 4, 6 a 8 mm s proměnnou rychlostí posuvu a na vybraných vzorcích tloušťky 4 mm s proměnným výkonem LZ.

Je zde třeba uvést, že nebylo možné provést kvalitní vtisk ve vzdálenosti menší než 0.01 mm od pozorované řezné hrany vzorku, aby bylo možno odečíst skutečnou, nezkreslenou mikrotvrdost materiálu v daném místě. Ve většině měření však byla tato vzdálenost větší.

Z hodnot naměřených mikrotvrdostí můžeme zobecnit fakt, že hodnoty mikrotvrdosti materiálu se zvyšují se snižováním vzdálenosti měření od řezné hrany. Uvedené tvrzení je možné podpořit naměřenými hodnotami uvedenými v příloze.

Maximální naměřená hodnota mikrotvrdosti ze všech měřených vzorků byla stanovena u vzorku 11 - tl. 8 mm ve vzdálenosti 0.045 mm od hrany řezu a činí 571,3 $HV_{0,2}$ (při parametrech P = 2,5 kW; p = 1 bar; rychlost posuvu 1000 mm/min).

U vzorků tl. 8 mm, je ve srovnatelné vzdálenosti od hrany řezu charakteristické snižování hodnot mikrotvrdosti s rostoucí rychlostí posuvu.

Při hodnocení hodnot mikrotvrdostí u vzorků tloušťky 6 mm zjišťujeme opět závislost mikrotvrdosti na rychlosti posuvu. Maximální hodnota činí 569.1 $HV_{0.2}$ (při P = 2.5 kW, p = 1bar, posuv 1200 mm/min).

Podobně můžeme vyhodnotit i naměřené hodnoty mikrotvrdosti u vzorků tl. 4 mm. Nejnižší hodnota $HV_{0,2}$ u této tloušťky materiálu, v odpovídající vzdálenosti od řezné hrany byla stanovena u vzorku 17 (při parametrech P = 2,0 kW; p = 1 bar; F = 2400 mm/min). Tato hodnota činí 530.8 $HV_{0,2}$. U vzorků 14 a 11, kdy byla použita menší rychlost posuvu (1800 a 1200 mm/min) byla zjištěna zvýšená hodnota $HV_{0,2}$ v nejbližších místech hrany řezu. Tato hodnota činí 536.7 a 480.3 $HV_{0,2}$(tato hodnota je nižší v důsledku větší vzdálenosti od řezné hrany).

Hodnoty mikrotvrdosti u vzorků tloušťky 2 mm nedosahují již tak vysokých hodnot jako u vzorků s větší tloušťkou, což je patrně způsobeno nejnižším použitým výkonem LZ, jež měl zde hodnotu 1500 W. Maximální naměřená hodnota byla u vzorku 11 a činí 258.1 $HV_{0.2}$ (pro posuv 1500 mm/min, p = 1.0 bar).

U vzorků s proměnným výkonem LZ bylo zaznamenáno snižování hodnot mikrotvrdosti (i když nepříliš výrazné) s rostoucím výkonem LZ v odpovídajících vzdálenostech od hrany řezu. Nejvyšší hodnota byla naměřena u vzorku 33 a to 496.1 $HV_{0.2}$ (při posuvu 2000 mm/min, výkonu P = 2000W a tlaku p = 1.0 bar.

3.4.5 Tepelně ovlivněná oblast

Šířka tepelně ovlivněné oblasti a struktura v této oblasti je jednou z nejdůležitějších charakteristik zpracovaných vzorků. Šířka zpevněné a tepelně ovlivněné oblasti byla sledována u vzorků, které byly též použity pro měření mikrotvrdosti.

S rostoucí vzdáleností od hrany vzorku, do které paprsek laseru při řezání vstupoval (zóna I.), se šířka TOO, ve výřezu jádra vzorku, postupně zvětšovala. Na obr 3 - 5 je schematicky znázorněn výřez vzorku se znázorněním tepelně ovlivněné oblasti.

Při pozorování TOO u vzorků tl. 8 mm s proměnnou rychlostí posuvu (P=2500 W, p=1.0 bar) bylo zjištěno, že velikost zpevněné oblasti klesá s rostoucí rychlostí posuvu. Tento fakt byl zjištěn i u ostatních tlouštěk a můžeme jej tedy zobecnit. Přechodem mezi zpevněnou povrchovou vrstvou a základním materiálem tvoří přechodová ovlivněná vrstva, která dosahuje větších rozměrů než zpevněná a její struktura postupně přechází do základního materiálu tvořeného feritickou strukturou. Její velikost se také zmenšuje s rostoucí rychlostí posuvu. Při minimální rychlosti posuvu 1000 mm/min byla velikost TOO rovna 0,393 mm, při při maximální rychlosti posuvu 1400 mm/min již jen 0.228 mm. Šířka zpevněné oblasti se však s rostoucí rychlostí snižovala nerovnoměrně. Velikost ovlivněné oblasti snížila z 0.308 mm na 0.146 mm

Vyhodnocení velikosti TOO u vzorků tl. 6 mm (P=2.5 kW,

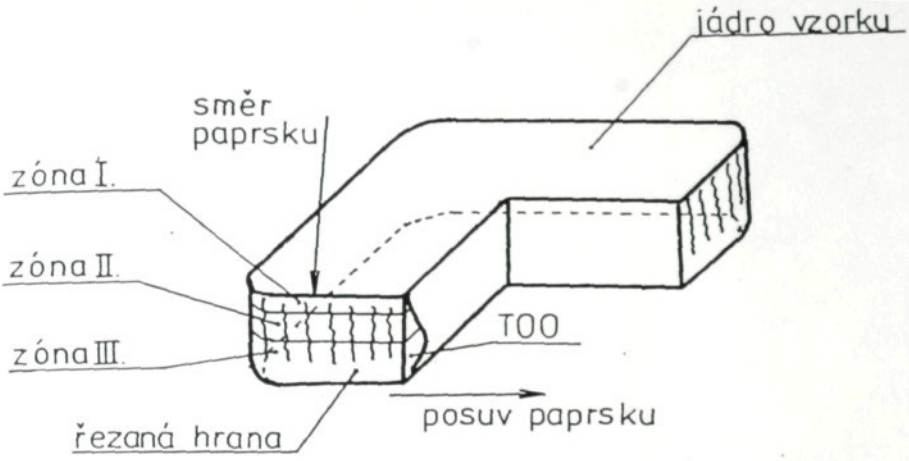
p=1.0 bar) nám poukazuje na stejnou závislost šířky T00 na rychlosti posuvu.Při nejmenší rychlosti 1200 mm/min je velikost zpevněné oblasti 0.023 mm, při nejvyšší rychlosti 2000 mm/min jen 0.012mm. I zde se však šířka zpevněné oblasti snižovala nerovnoměrně. Velikost ovlivněné oblasti se z hodnoty 0.158 mm snížila na 0.132 mm.

U vzorků tl. 4 mm (P=2.0 kW, p=1.0 bar) se šířka zpevněné oblasti snížila z hodnoty 0.098 mm při rychlosti posuvu 2400 mm/min na hodnotu 0.02 mm při posuvu 1200mm/min. Šířka ovlivněné oblasti se nerovnoměrně snižovala z hodnoty 0.153mm na hodnotu 0.091 mm.

Hodnocení vzorků tl. 2 mm (P=1500 kW, p=1.0 bar) opět potvrdilo fakt snižování velikosti T00 s rostoucí rychlostí posuvu. Velikost zpevněné oblasti se snížila z hodnoty 0.01 mm při rychlosti posuvu 1500 mm/min na hodnotu 0.006 mm při posuvu 4000 mm/min. Velikost ovlivněné oblasti se snížila z hodnoty 0.126 mm na hodnotu 0.96 mm.

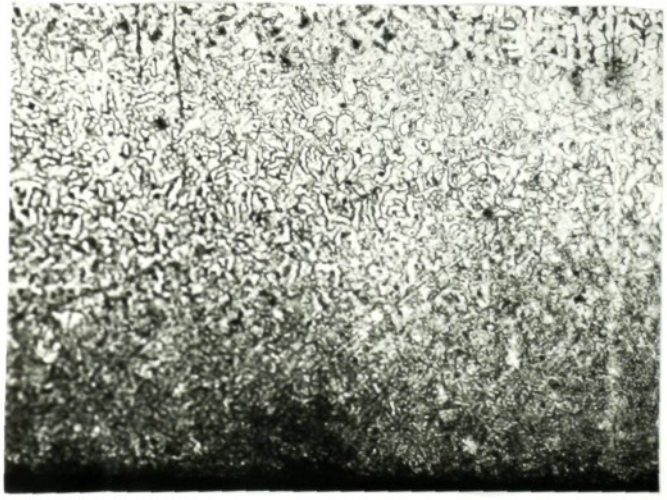
Při pozorování T00 vzorků tl. 4 s proměnným výkonem laserového záření (F=2000 mm/min, p=1.0 bar) bylo zjištěna také závislost velikosti T00 na výkonu LZ. Hodnota velikosti T00 se zvyšuje s rostoucím výkonem LZ. Při minimálním výkonu 1500 W má zpevněná oblast velikost 0.025 mm. Se vzrůstem výkonu na 2500 W vzrostla i velikost zpevněné vrstvy na 0.05 mm. Šířka ovlivněné oblasti se snižovala nerovnoměrně z 0.108 mm na 0.107 mm.

Všechny naměřené hodnoty jsou obsaženy v tabulkách v přílohách č. 1 - 6.



Obr. 3 - 5 Schéma výřezu jádra vzorku

Na obr 3 - 6 až 3 - 20 je uvedena struktura zpevněné oblasti jak byla zjištěna u příslušných vzorků ocelového plechu ČSN 11 373.1 po jejich ozáření laserem.

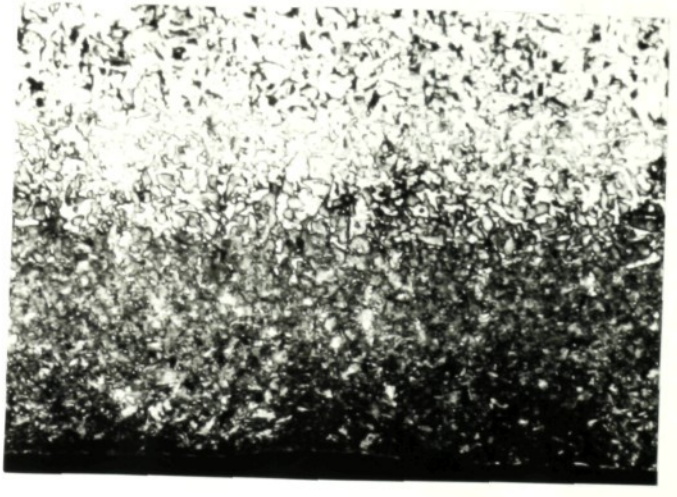


Obr. 3 - 6 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 11 - tl. 8 mm)

Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital

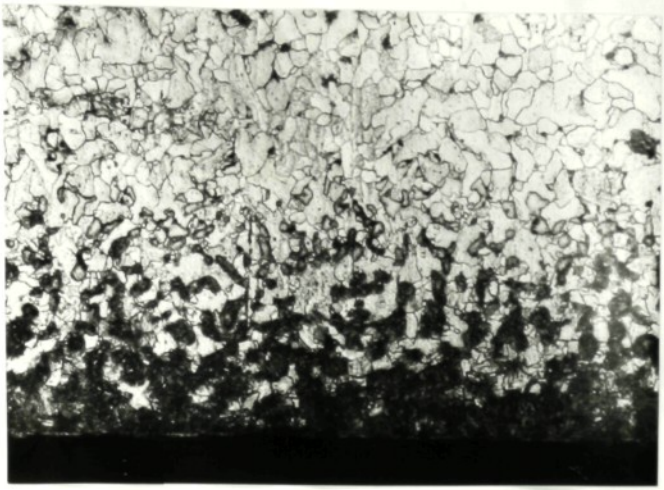
Obr. 3 - 7 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 13 - tl. 8mm)

Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



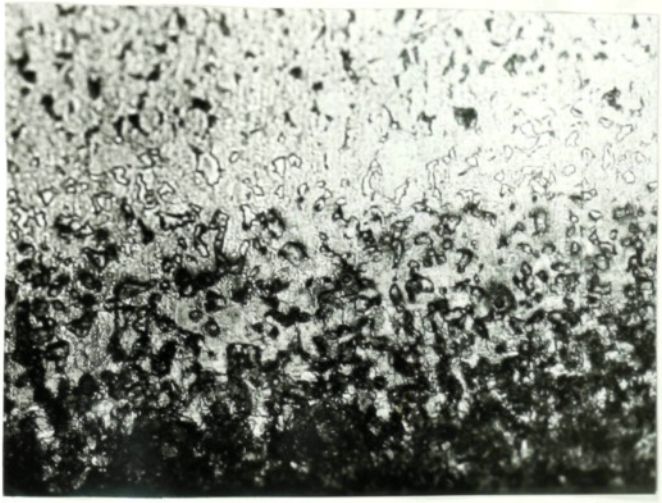
Obr. 3 - 8 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 15 - tl.8mm)

Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



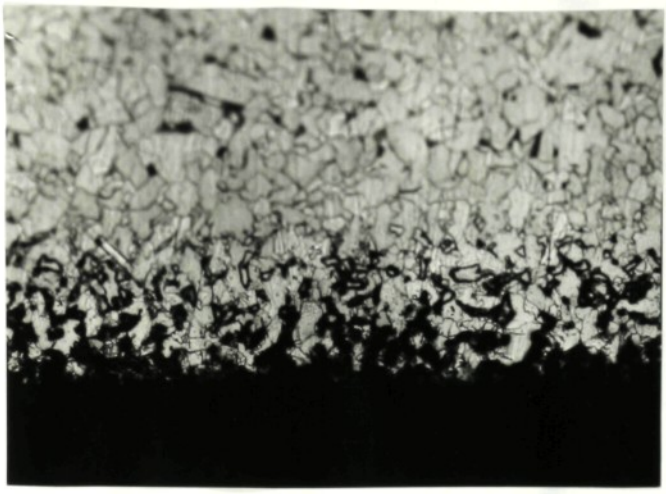
Obr. 3 - 9 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 11 - tl.6mm)

Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



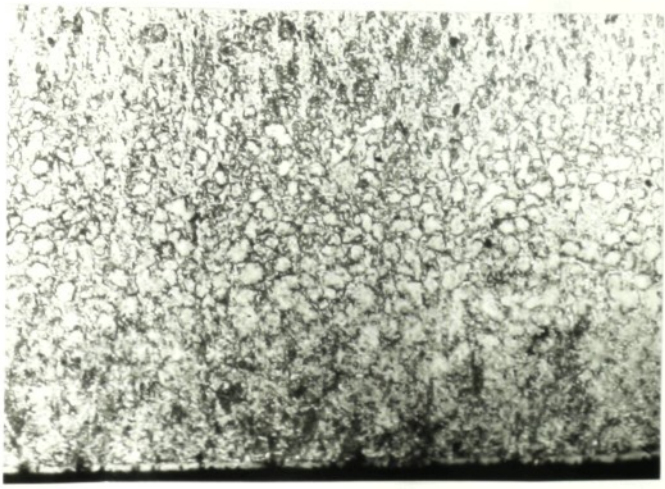
Obr. 3 - 10 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 13 - tl 6mm)

Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



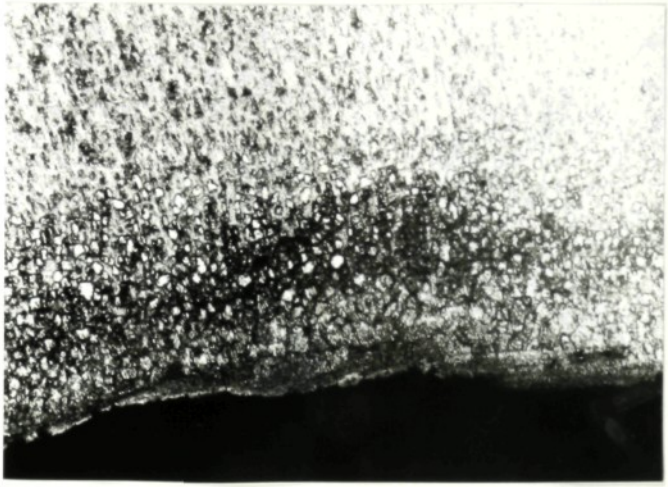
Obr. 3 - 11 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 15-tl.6mm)

Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



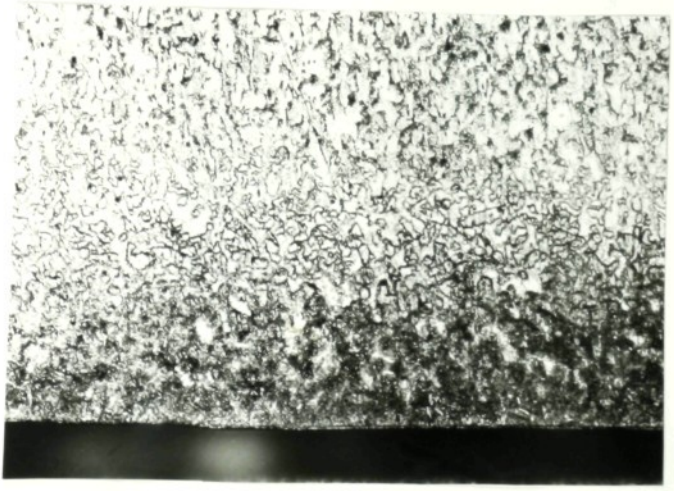
Obr. 3 - 12 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 11-tl.4mm)

Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



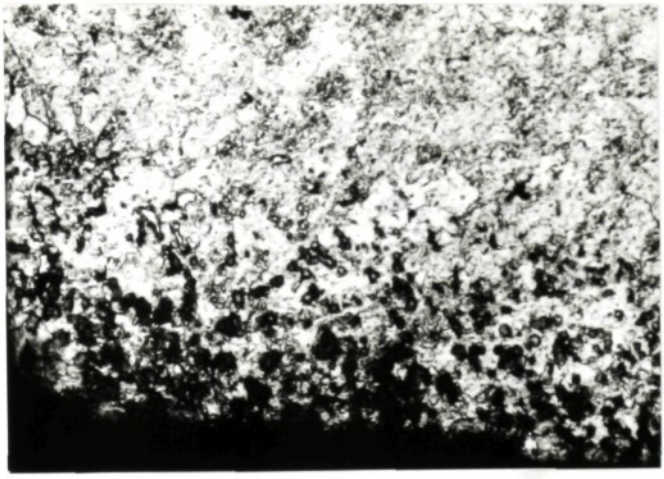
Obr. 3 - 13 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 14-tl.4mm)

Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



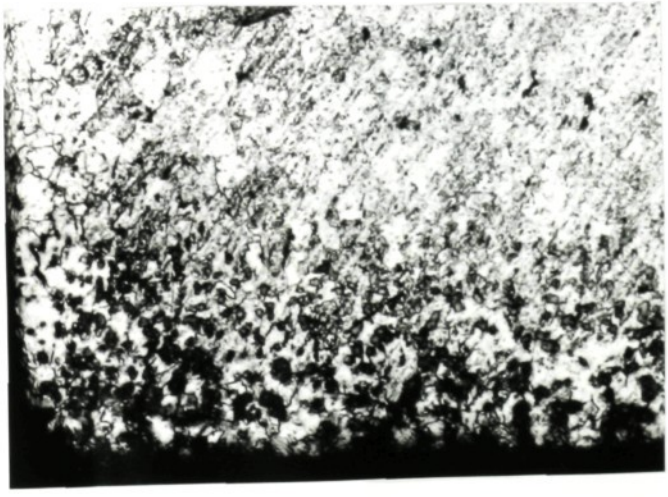
Obr. 3 - 14 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 17-tl.4mm)

Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



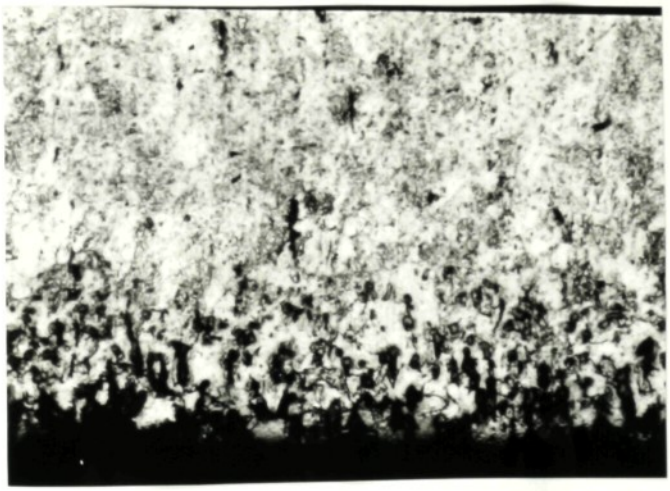
Obr. 3 - 15 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 11-tl.2mm)

Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital

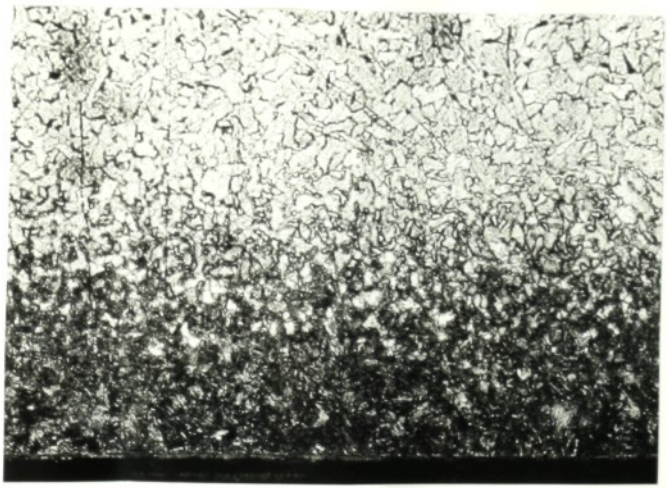


Obr. 3 - 16 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 13-tl.2mm)

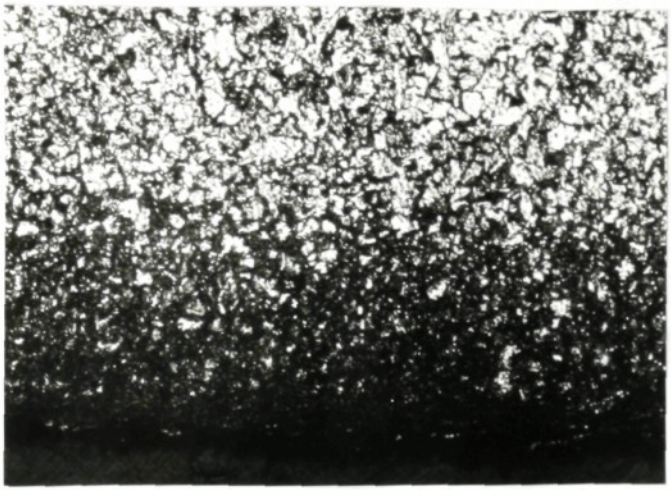
Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



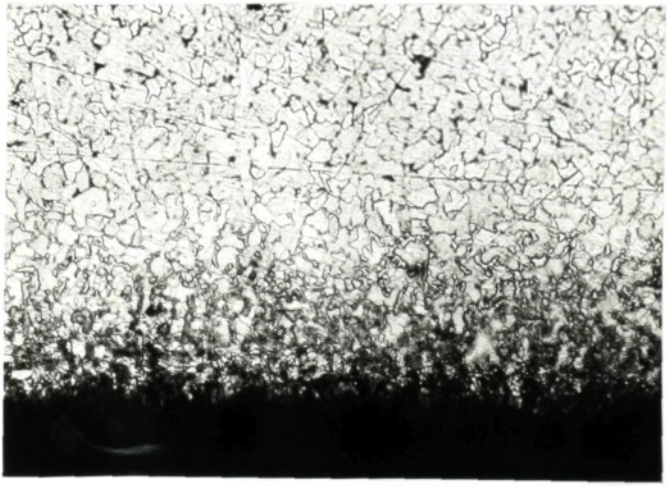
Obr. 3 - 17 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 16-tl.2mm)
Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



Obr. 3 - 18 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 31-tl.4mm)
Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



Obr. 3 - 19 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 33-tl.4mm)
Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital



Obr. 3 - 20 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 35-tl.4mm)
Zvětšení: 250 x Leptadlo: Nital

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Záměrem této práce bylo vytvořit základní přehled o vlivu laserového záření na řezání ocelových plechů ČSN 11 373.1 různých tloušťek.

Výsledky, získané při studiu této problematiky, umožňují získat přehled o sledované problematice a vytvoření metodiky pro posuzování parametrů obrábění laserovým paprskem a vyhodnocování vlastností a kvality řezu. Získané výsledky experimentů jsou potřebné pro rozhodování a aplikaci těchto výsledků v praktickém řízení tohoto procesu

Při porovnávání poznatků získaných z použité literatury, zabývající se touto problematikou s výsledky vlastních experimentů narážíme na fakt, že literárně publikované poznatky často neobsahují informace, umožňující kvalitativní porovnání těchto údajů s dosaženými výsledky. Tyto publikace často neobsahují charakteristiky materiálu, použitého při laserovém řezání, neboť autoři byli zaměřeni především na popis základních parametrů, které tuto problematiku hodnotily z hlediska obrábění.

Z autorů, zabývajících se problematikou laserového řezání bych jmenoval především V. S. Kovalenka, V. V. Romaňenka a L. M. Olešuka [8], kteří zanou problematiku studovali z hlediska produktivity řezání a kvality povrchu řezu. Z této publikace však nevyplívá kvalitní srovnání s provedenými experimenty pro absenci potřebných údajů popisujících druh uhlíkové oceli, na které výzkum prováděli. Laserové řezání různých druhů materiálu jako nerezavějící oceli, hliníku či

titanu popisuje další Kovalenkova publikace [7], která však také neobsahuje ucelené údaje o sledované problematice. Z domácích autorů, zabývajících se touto problematikou, bych vzpomenul J. Urbánka a J. Kubátovou [9], I. Šimana [3] a J. Vejrostku [10].

Po vyhodnocení všech výsledků provedených měření můžeme konstatovat zjištění, že dosažené výsledky odpovídají teoretickým předpokladům. Drsnost povrchu řezu je závislá na rychlosti posuvu, naopak téměř nezávisí na výkonu laserového záření. U vzorků malých tlouštěk je drsnost řezu téměř stejná v kterémkoli místě řezu. U tlouštěk větších než 2 mm se na povrchu řezu objevují zóny s rozdílnou drsností povrchu. Z hlediska optimalizace řezného procesu je možné určit rychlosti, při kterých je drsnost povrchu řezu minimální. Rychlost řezání má u uhlíkové oceli významný vliv na změnu šířky řezu. S rostoucí rychlostí posuvu laserového záření hodnota šířky řezu klesá. Téměř analogicky se chová drsnost povrchu řezu.

Rozměry tepelně ovlivněné oblasti jsou přímo závislé na rychlosti posuvu. S rostoucí rychlostí posuvu se šířka tepelně ovlivněné oblasti zmenšuje. Velikost TOO se zmenší také se snížením výkonu LZ. U vzorků větších tlouštěk (8 mm) se projevují změny barvy povrchu vzorku při vysoké rychlosti řezání.

Pro měření mikrotvrdosti byla použita zóna II. (viz 2.3.1), nacházející se přibližně uprostřed vzorku. Ze získaných výsledků měření lze vyvodit, že šířka TOO se výrazně sníží se vzrůstem rychlosti řezání a poklesem výkonu

LZ. Ovlivněná oblast se vyznačuje zvýšenou hodnotou mikrotvrdosti (nad 400 $HV_{0,2}$). Snížené hodnoty mikrotvrdosti a velikosti tepelně ovlivněné oblasti u vzorků tloušťky 2 mm lze vysvětlit nízkým použitým výkonem 1500 W při procesu řezání.

Při analýze struktury tepelně ovlivněné oblasti jsem došel k závěru, že se jedná o strukturu tvořenou nízkouhlíkovým martenzitem. K tomuto závěru jsem došel po prostudování této tematiky s ohledem na výchozí typ nízkouhlíkové oceli a zvýšené hodnoty mikrotvrdosti v blízkosti řezné hrany, které dosahují hodnot cca 550 $HV_{0,2}$. Je tedy možné konstatovat zpevňování vrstev přilehlých k řezným plochám, které je způsobeno vznikem nízkouhlíkového martenzitu, ale také zpevňujících procesů, které souvisejí se vznikem a hromaděním dislokací v těchto místech.

Chceme - li hodnotit proces řezání z hlediska kvality řezu, nesmíme opomenout problematiku vzniku otřepů, které závisejí na tlaku pomocného plynu, popř výkonu LZ. Otřepy jsou vytvářeny roztaveným materiálem, který je vyfukován přetlakem z místa obrábění a vznikají tak na spodním okraji řezu. Některé ze vzorků se tak stávají nevyhovujícími pro kvalitativní proces řezání. Vzorky s proměnnou rychlostí posuvu, které takto nevyhovují jsou vz. č. 16 u tl. 2 mm (vyhovující jsou vz. 11,12,13), vz. 17 u tl. 4 mm (vyhovují vz. 11,12,13), vz. 15 u tl. 6 mm (vyhovují vz. 11,12,13) a vz. 15 u tl. 8 mm (vyhovující jsou vz. 13,14). Ze vzorků s proměnným výkonem LZ tl. 4 mm je nevyhovující vz. č. 31, naopak vyhovují vz. 34,35.

Studium přesnosti šířky řezu při využití kontinuálního záření CO_2 - laseru z literárních pramenů ukázalo, že stejně jako při obrábění impulzivním zářením, je odchylka skutečných hodnot 8 - 10 % nominálního rozměru řezu.

Optimalizace procesu obrábění souvisí s tím, zda řezání provádíme z hlediska kvalitativního, tedy při maximální kvalitě řezu a nízké produktivitě, nebo z hlediska kvantitativního, s maximální produktivitou řezání a nízkou kvalitou řezu.

5. ZÁVĚR

Stanovené experimenty byly provedeny za účelem stanovení kvality řezu ocelového plechu 11 373.1 tloušťky 2, 4, 6, 8 mm pomocí kontinuálního CO_2 laseru.

Úkolem bylo určení vlivů řezných podmínek na kvalitu řezu. Tzn. zjištění šířky řezu, drsnosti povrchu řezu, průběh mikrotvrdosti, velikosti TOO, úhlu rozevření, velikosti a množství otřepů atd.

Na základě výše uvedených výsledků vlastních experimentů je možno vyslovit následující závěry.

Jakost a kvalita řezu je na změně rychlosti posuvu i na výkonu laserového paprsku přímo závislá. Na povrchu řezu vznikají tři oddělené oblasti, které se od sebe navzájem odlišují hodnotou drsnosti povrchu. U materiálů malých tlouštěk, kolem 2 mm, se však již tyto oblasti od sebe výrazně neodlišují. Hodnota drsnosti povrchu řezu se s rostoucí rychlostí posuvu snižuje. Významný vliv změny výkonu LZ na kvalitu řezu nebyl zjištěn.

Také šířka řezu závisí na parametrech řezání. Tato hodnota se ve většině případů s rostoucí rychlostí posuvu zmenšovala. Také s rostoucím výkonem se šířka řezu zvětšuje. U vzorku s menší tloušťkou bylo zjištěno, že řez neprobíhal kolmo k hraně řezaného materiálu, ale vybočuje o určitý úhel.

Při řezání ocelového plechu 11 373.1 CO_2 laserem dochází ke zvyšování tvrdosti a zpevňování materiálu v blízkosti řezné hrany. Maximální naměřená mikrotvrdost dosáhla hodnoty 571.3 $HV_{0.2}$. S rostoucí vzdáleností od řezané hrany hodnota

mikrotvrdosti klesá až k hodnotám základního materiálu, jež má hodnotu cca 135 $HV_{0.2}$. Hodnoty zpevnění a velikost zpevněné vrstvy je přímo závislá na rychlosti posuvu laserového paprsku resp. obráběného materiálu i na použitém výkonu laserového záření. S rostoucí rychlostí posuvu klesá velikost zpevněné oblasti i tvrdost řezaného materiálu v tepelně ovlivněné oblasti. Tyto hodnoty naopak vzrostou při použití vyššího výkonu laserového záření.

Z těchto závěrů můžeme předpokládat, že při některých parametrech řezání bude toto zpevnění tak významné, že musí být zohledněno při obrábění.

Při řezání plechů větších tlouštěk stéká roztavený materiál a pokud není z místa obrábění odstraňován dostatečně efektivně dochází k tvorbě otřepů, které se roztékají na spodních okrajích řezu, což vyvolává přehřívání a hoření materiálu v této části řezu. To také potvrzuje zvětšování tepelně ovlivněné oblasti v této části řezu.

Na základě analýzy praktických měření a vyhodnocení naměřených hodnot je možné optimalizovat proces řezání z hlediska kvalitativního i kvantitativního. Přitom musíme vycházet z požadavků vlastností budoucího obrobku. Požadujeme - li maximální produktivitu práce a tedy i maximální rychlost řezání nebude kvalita a jakost řezu vysoká. Velikost tepelně ovlivněné oblasti a šířka řezu budou sice minimální, ale drsnost povrchu řezu a množství otřepů budou vysoké. Požadujeme - li však vysokou kvalitu řezu s minimální drsností povrchu řezu a minimálním množstvím otřepů budeme používat nižší rychlost řezání. V tomto případě však bude

větší hodnota velikosti tepelně ovlivněné oblasti i velikost šířky řezu a také náklady porostou.

Pro komplexní hodnocení problematiky z hlediska kvalitativního řezání plechů jednotlivých tlouštěk je podstatné určení priority parametrů, hodnotících kvalitu řezu.

Z hlediska kvalitativního řezání navrhuji posuzovat proces řezání podle zkoumaných parametrů v pořadí drsnost povrchu řezu, šířka řezu a tvorba otřepů. Na základě vyhodnocení naměřených hodnot lze tedy provést optimalizaci řezného procesu pro každou tloušťku materiálu při proměnné rychlosti posuvu:

Pro plech tloušťky 8 mm - P = 2500 W
p = 1 bar
F = 1300 mm/min

Pro plech tloušťky 6 mm - P = 2500 W
p = 1 bar
F = 1400 mm/min

Pro plech tloušťky 4 mm - P = 2000 W
p = 1 bar
F = 1600 mm/min

Pro plech tloušťky 2 mm - P = 1500 W
p = 1 bar
F = 2000 mm/min

Ze vzorků s proměnným výkonem laserového záření volím:

Pro plech tloušťky 4 mm - P = 2250 W
p = 1 bar
F = 2000 mm/min

Chceme - li posoudit proces řezání z hlediska kvantitativního, navrhuji posuzovat parametry řezu v pořadí minimalizace použitého výkonu z hlediska nízkých provozních

nákladů, rychlost posuvu, šířka řezu. Ze vzorků s proměnnou rychlostí posuvu navrhuji následující parametry:

Pro plech tloušťky 8 mm - P = 2500 W
p = 1 bar
F = 1400 mm/min

Pro plech tloušťky 6 mm - P = 2500 W
p = 1 bar
F = 1800 mm/min

Pro plech tloušťky 4 mm - P = 2000 W
p = 1 bar
F = 2200 mm/min

Pro plech tloušťky 2 mm - P = 1500 W
P = 1 bar
F = 3500 mm/min

Ze vzorků s proměnným výkonem laserového paprsku volím:

Pro plech tloušťky 4 mm - P = 1750 W
p = 1 bar
F = 2000 mm/min

Přínos této diplomové práce lze spatřovat ve vytvoření ucelené představy o zkoumané problematice řezání laserem a ovlivnění jakosti řezu parametry řezání. Naměřené hodnoty umožňují vytvoření představy o optimalizaci parametrů řezného procesu z hlediska kvalitativního i kvantitativního.

Na závěr je třeba uvést, že řešení této diplomové práce navazuje na poznatky pracovníků katedry materiálů VŠST, kteří se v minulosti již zabývali problematikou ozařování materiálů CO_2 laserem.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

[1] In: Sborník přednášek Celostátní konference sváření, řezání a povrchové tepelné zpracování elektronovým paprskem a laserem .Praha, květen 1986

[2] ELZA, D.: Zpracování laserovým paprskem principy a praxe, In: Sborník přednášek " Celostátní konference Speciální technologie 90 ". konané 9. - 11. října 1990 v Plzni

[3] ŠIMAN, I.: Technologie laserového řezání materiálu, In: Sborník přednášek " Celostátní konference Speciální technologie 90 ". konané 9. - 11. října 1990 v Plzni

[4] GRÉZL, J.: Dílčí výzkumná zprava s.r.o. Laser - Tech Olomouc, Laserové tvarové řezání a povrchové zpracování kovových materiálů. Olomouc, březen 1990

[5] FORBES, N.: The Role of Gas Nozzle in Metal Cutting with CO_2 laser . LASER 75 Opto - Elektronic Conference, München, 1975

[6] KAMALU, J.N. - STEEN, W.M.: Laser Cutting. Laser Materials Processing . North - Holland Publishing Company 1983

[7] KOVALENKO, V. S.: Progressivnye metody lasernoj obrabotky materialov . Učenie Ukrainy , první vydání

[8] KOVALENKO, V. S., ROMAŇENKO, V. V., OLEŠUK, L. M.: Malootchodnye procesy rezki lučom lasera . Kyjev Technika 1987

[9] URBÁNEK, J., KUBÁTOVÁ, J.: Vyhodnocení příčin a významnosti vad a ovlivnění povrchu obrobeného CO_2 laserem. In : Sborník přednášek " Celostátní konference Speciální technologie 90 ", konané 9. - 11. října 1990 v Plzni

[10] URBÁNEK, J., KUBÁTOVÁ, J., VEJROSTKA, J., Použití laseru ve strojírenství. Strojírenská výroba . 36, 1988 č. 9

NORMY :

ČSN 42 0113

ČSN 42 0469

ČSN 42 0462

ČSN 42 0401

ČSN 11 373.1

ČSN 42 0074

PŘÍLOHA

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 - Měření drsnosti povrchu řezu

Příloha č. 2 - Měření šířky řezu

Příloha č. 3 - Měření úhlu rozevření řezné spáry

Příloha č. 4 - Měření mikrotvrdosti

Příloha č. 5 - Měření velikosti tepelně ovlivněné oblasti

Měření drsnosti povrchu

Příloha č. 1

Materiál tloušťky 8 mm P = 2500 W, p = 1 bar

č.vz.	F[mm/min]	Ra_1[μm]	Ra_2[μm]	$Rmax_1$[μm]	$Rmax_2$[μm]	ϕRa[μm]
11	1000	6.8	14	25	70	10.4
12	1100	14	8.2	75	30	11.1
13	1200	12	5.5	52	25	8.75
14	1300	10	4.6	40	22	7.3
15	1400	8.8	4	45	15	6.4

Materiál tloušťky 6 mm P = 2500 W, p = 1 bar

č.vz.	F[mm/min]	Ra_1[μm]	Ra_2[μm]	$Rmax_1$[μm]	$Rmax_2$[μm]	ϕRa[μm]
11	1200	9.5	5.2	>30	>30	7.35
12	1400	7.1	5.6	>30	>30	6.35
13	1600	6.1	4.8	28	30	5.45
14	1800	5.8	5.0	30	>30	5.4
15	2000	2.6	3.8	15	20	3.2

Materiál tloušťky 4 mm F = 2000 mm/min, p = 1 bar

č.vz.	P [W]	Ra_1[μm]	Ra_2[μm]	$Rmax_1$[μm]	$Rmax_2$[μm]	ϕRa[μm]
31	1500	1.6	3.2	8	18	2.4
32	1750	2.8	2.0	18	10	2.4
33	2000	2.9	2.8	18	21	2.85
34	2250	2.5	1.8	15	8	2.15
35	2500	2.2	2.4	12	10	2.3

Materiál tloušťky 4 mm P = 2000 W, p = 1 bar

č.vz.	F[mm/min]	Ra_1[μm]	Ra_2[μm]	$Rmax_1$[μm]	$Rmax_2$[μm]	ϕRa[μm]
11	1200	3.8	3.2	17	15	3.5
12	1400	3.6	2.6	20	17	3.1
13	1600	1.8	3.4	10	18	2.6
14	1800	2.5	1.8	15	9	2.15
15	2000	1.6	1.4	8	6	1.5
16	2200	3.4	1.8	17	10	1.6
17	2400	1.6	1.8	10	7	1.7

Materiál tloušťky 2 mm P = 1500 W, p = 1 bar

č.vz.	F[mm/min]	Ra_1[μm]	Ra_2[μm]	$Rmax_1$[μm]	$Rmax_2$[μm]	ϕRa[μm]
11	1500	3.2	3.1	14	18	3.15
12	2000	2.7	2.8	15	17	2.75
13	2500	2.6	2.4	15	18	2.5
14	3000	2.3	2.3	14	15	2.3
15	3500	2.4	2.0	14	13	2.2
16	4000	2.2	2.2	12	10	2.2

Měření šířky řezu

Horní strana vzorku

Tloušťka materiálu 8 mm P = 2500 W, p = 1 bar

		Šířka řezu s [mm]				
č. vz.	F[mm/min]	s_1	s_2	s_3	s_4	ϕ s [mm]
11	1000	0.6476	0.8688	0.6388	0.874	0.7598
12	1100	0.7088	0.7188	0.8663	0.4999	0.6967
13	1200	0.9191	0.4219	0.3632	0.8416	0.6365
14	1300	0.5661	0.6327	0.7196	0.5212	0.6099
15	1400	0.7284	0.4266	0.5374	0.6782	0.5932

Tloušťka materiálu 6 mm P = 2500 W, p = 1 bar

		Šířka řezu s [mm]				
č. vz.	F[mm/min]	s_1	s_2	s_3	s_4	ϕ s [mm]
11	1200	0.3984	0.8552	0.5568	0.6448	0.6138
12	1400	0.4232	0.7754	0.6596	0.4504	0.5772
13	1600	0.5157	0.6611	0.4885	0.6683	0.5834
14	1800	0.5852	0.4838	0.5483	0.5635	0.5452
15	2000	0.3731	0.7126	0.6504	0.5072	0.5608

Tloušťka materiálu 4 mm P = 2000 W, p = 1 bar

		šířka řezu s [mm]				
č. vz.	F[mm/min]	s_1	s_2	s_3	s_4	ϕ s [mm]
11	1200	0.7653	0.3196	0.5423	0.5797	0.5517
12	1400	0.6802	0.4012	0.6156	0.5436	0.5377
13	1600	0.5453	0.4977	0.4075	0.6871	0.5344
14	1800	0.5502	0.5018	0.6077	0.4333	0.5233
15	2000	0.5618	0.4544	0.4244	0.5964	0.5093
16	2200	0.3782	0.602	0.5578	0.4512	0.4986
17	2400	0.4484	0.5317	0.4838	0.4796	0.4859

Tloušťka materiálu 2 mm P = 1500 W, p = 1 bar

		šířka řezu s [mm]				
č. vz.	F[mm/min]	s_1	s_2	s_3	s_4	ϕ s [mm]
11	1500	0.4883	0.5071	0.4141	0.6581	0.5169
12	2000	0.3725	0.6207	0.6342	0.3904	0.5045
13	2500	0.6753	0.3039	0.6766	0.3456	0.5004
14	3000	0.3492	0.6196	0.5563	0.4554	0.4946
15	3500	0.5218	0.4796	0.6296	0.3448	0.4865
16	4000	0.3956	0.5596	0.4776	0.4754	0.4771

Tloušťka materiálu 4 mm F = 2000 mm/min, p = 1 bar

		šířka řezu s [mm]				
č. vz.	P [W]	s_1	s_2	s_3	s_4	ϕ s [mm]
31	1500	0.6146	0.3313	0.5757	0.4449	0.4917
32	1750	0.2334	0.7630	0.3116	0.7662	0.5181
33	2000	0.4358	0.5698	0.7392	0.3380	0.5207
34	2250	0.5374	0.5368	0.4294	0.6236	0.5318
35	2500	0.5833	0.4825	0.6638	0.4282	0.5395

Spodní strana vzorku

Tloušťka materiálu 8 mm

		šířka řezu s [mm]				
č. vz.	F[mm/min]	s_1	s_2	s_3	s_4	ϕ s [mm]
11	1000	0.6234	0.8954	0.8276	0.9148	0.8153
12	1100	0.7448	0.8472	0.8613	0.6830	0.7841
13	1200	0.6117	0.7367	0.8728	0.7816	0.7507
14	1300	0.7487	0.6369	0.8178	0.7028	0.7266
15	1400	0.7205	0.7353	0.692	0.667	0.7037

Tloušťka materiálu 6 mm

		šířka řezu s [mm]				
č. vz.	F[mm/min]	s_1	s_2	s_3	s_4	ϕ s [mm]
11	1200	0.5873	0.5285	0.6451	0.6458	0.6017
12	1400	0.7221	0.6113	0.4358	0.7450	0.6286
13	1600	0.4572	0.648	0.9156	0.6214	0.666
14	1800	0.8331	0.8801	0.4344	0.758	0.7104
15	2000	0.6256	0.7118	0.8414	0.7123	0.7228

Tloušťka materiálu 4 mm

		Šířka řezu s [mm]				
č. vz.	F[mm/min]	s_1	s_2	s_3	s_4	ϕ s [mm]
11	1200	0.6772	0.3216	0.4226	0.4864	0.4770
12	1400	0.5572	0.3622	0.5543	0.4951	0.4922
13	1600	0.3671	0.5285	0.2956	0.7366	0.4820
14	1800	0.5812	0.4872	0.4167	0.4279	0.4782
15	2000	0.6294	0.2588	0.6581	0.4757	0.5055
16	2200	0.4222	0.5078	0.5674	0.7356	0.5583
17	2400	0.5678	0.6582	0.2324	0.6468	0.5263

Tloušťka materiálu 2 mm

		Šířka řezu s [mm]				
č. vz.	F[mm/min]	s_1	s_2	s_3	s_4	ϕ s [mm]
11	1500	0.6811	0.1303	0.5698	0.2948	0.4144
12	2000	0.3811	0.3421	0.6256	0.1132	0.3655
13	2500	0.3517	0.4113	0.1182	0.5730	0.3635
14	3000	0.2864	0.4978	0.1158	0.6176	0.3795
15	3500	0.5712	0.3448	0.3492	0.3854	0.4127
16	4000	0.4438	0.3866	0.6238	0.3678	0.4555

Tloušťka materiálu 4 mm

		Šířka řezu s [mm]				
č. vz.	P [W]	s_1	s_2	s_3	s_4	ϕ s [mm]
31	1500	0.4982	0.6226	0.3172	0.3275	0.4482
32	1750	0.3631	0.4217	0.6982	0.4498	0.4832
33	2000	0.6442	0.5492	0.4758	0.4084	0.5195
34	2250	0.4584	0.9706	0.5061	0.4617	0.5991
35	2500	0.6236	0.6734	0.3754	0.7308	0.6008

Měření úhlu rozevření řezné spáry

Materiál tloušťky 8 mm
výkon P = 2500 W
tlak p = 1 bar

č. vz.	F [mm/min]	úhel rozevření	typ rozevření
11	1000	0.3979	N
12	1100	0.62595	N
13	1200	0.81788	N
14	1300	0.83579	N
15	1400	0.79139	N

Materiál tloušťky 6 mm
Výkon P = 2500 W
tlak p = 1 bar

č. vz.	F [mm/min]	úhel rozevření	typ rozevření
11	1200	0.11555	P
12	1400	0.58632	N
13	1600	0.78876	N
14	1800	1.57744	N
15	2000	1.54689	N

Materiál tloušťky 4 mm
výkon P = 2000 W
tlak p = 1 bar

č. vz.	F [mm/min]	úhel rozevření	typ rozevření
11	1200	1.06997	P
12	1400	0.65173	P
13	1600	0.75056	P
14	1800	0.25497	P
15	2000	0.44547	P
16	2200	0.85512	N
17	2400	0.57868	N

Materiál tloušťky 2 mm
výkon P = 1500 W
tlak p = 1 bar

č. vz.	F [mm/min]	úhel rozevření	typ rozevření
11	1500	2.93577	P
12	2000	3.98046	P
13	2500	3.92037	P
14	3000	3.29646	P
15	3500	2.11397	P
16	4000	0.61879	P

Materiál tloušťky 4 mm
posuv F = 2000 mm/min
tlak p = 1 bar

č. vz.	P [W]	úhel rozevření	typ rozevření
31	1500	0.62309	P
32	1750	0.4999	P
33	2000	0.01719	P
34	2250	0.96398	N
35	2500	0.87804	N

Měření mikrotvrdosti

Příloha č. 4

Měřící aparatura : mikrotvrdoměr ZWICK

Měřící parametry : HV0.2

l [mm] ..... vzdálenost od řezné hrany

materiál tloušťky 8 mm :

vz. č. 11	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.045	0.120	0.150	0.200	0.268	0.332	0.432
HV0.2	571.3	559.7	527.5	479.7	383.3	341.5	212.3

8	9
0.772	1.125
190.2	172.8

vz. č. 13	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.040	0.058	0.155	0.209	0.259	0.345	0.49
HV0.2	455.7	390.2	328.1	266.8	210.5	204.4	188.8

8	9
0.65	1.208
174.1	159.2

vz. č. 15	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.026	0.063	0.085	0.114	0.194	0.315	0.513
HV0.2	545.3	539.6	492.9	456.9	318.6	222.8	203.9

8	9
0.681	1.248
199.0	173.5

materiál tloušťky 6 mm :

vz. č. 11	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.028	0.043	0.052	0.075	0.115	0.215	0.275
HV0.2	569.1	510.2	363.7	220.8	182.0	141.1	133.4

vz. č. 13	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.032	0.055	0.078	0.126	0.185	0.231	0.268
HV0.2	522.2	360.3	212.8	167.2	172.5	142.7	131.3

vz. č. 15	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.025	0.053	0.082	0.119	0.194	0.248	0.276
HV0.2	395,5	288.4	201.8	166.2	148.0	135.6	130.7

materiál tloušťky 4 mm :

vz. č. 11	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.028	0.048	0.092	0.141	0.190	0.250	0.375
HV0.2	480.3	372.5	315.9	277.8	230.9	212.8	137.2

vz. č. 14	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.015	0.033	0.048	0.078	0.116	0.137	0.174
HV0.2	536.7	412.9	380.2	353.9	304.1	227.9	202.4

8	9
0.260	0.455
156.2	136.6

vz. č. 17	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.018	0.023	0.038	0.065	0.125	0.168	0.285
HV0.2	530.8	412.7	397.8	306.1	278.3	210.8	177.5

8	9
0.553	0.63
142.6	136.1

materiál tloušťky 2 mm :

vz. č. 11	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.027	0.032	0.062	0.081	0.145	0.395	0.640
HV0.2	258.1	252.4	216.2	202.3	161.9	130.0	125.9

vz. č. 13	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.030	0.035	0.043	0.082	0.129	0.189	0.327
HV0.2	203.0	187.6	183.2	167.6	151.1	139.9	134.8

vz. č. 16	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.031	0.038	0.054	0.098	0.120	0.221	0.494
HV0.2	222.6	200.0	189.5	170.0	146.4	139.6	134.1

materiál tloušťky 4 mm :

vz. č. 31	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.020	0.035	0.085	0.121	0.215	0.295	0.465
HV0.2	472.1	455.7	392.4	331.6	261.4	184.7	149.2

vz. č. 33	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.023	0.036	0.085	0.125	0.194	0.40	1.125
HV0.2	496.1	465.4	350.7	269.0	185.4	154.9	140.1

vz. č. 35	č. měření 1	2	3	4	5	6	7
l [mm]	0.037	0.090	0.15	0.228	0.416	0.671	1.277
HV0.2	447.0	349.9	274.7	195.7	158.9	141.8	129.6

Měření šířky tepelně ovlivněné oblasti

			velikost oblasti [mm]		
Tl. mat.	vz. č.	F [mm/min]	zpevněná	přechodová	ovlivněná
8 mm	11	1000	0.085	0.308	0.393
	13	1200	0.101	0.179	0.280
	15	1400	0.082	0.146	0.228
6 mm	11	1200	0.023	0.158	0.181
	13	1600	0.032	0.136	0.168
	15	2000	0.012	0.132	0.144
4 mm	11	1200	0.098	0.153	0.121
	14	1800	0.052	0.073	0.125
	17	2400	0.023	0.091	0.114
2 mm	11	1500	0.01	0.126	0.136
	13	2500	0.00	0.108	0.108
	16	4000	0.006	0,96	0.102

			velikost oblasti [mm]		
Tl. mat.	vz. č.	P [W]	zpevněná	přechodová	ovlivněná
4 mm	31	1500	0.025	0.108	0.133
	33	2000	0.065	0.086	0.151
	35	2500	0.05	0.107	0.157

Závěrem chci poděkovat všem, kteří mi pomohli při řešení úkolů diplomové práce, především pak vedoucímu diplomové práce p. Ing. J. Horynovi, Doc. Dále děkuji za cenné rady a pomoc i ostatním pracovníkům katedry materiálů.