

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
Fakulta strojní



Michael Karas

**JAKOST ŘEZU PŘI ŘEZÁNÍ LASEREM
- OVLIVNĚNÍ PARAMETRY ŘEZÁNÍ**

Diplomová práce

1994

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci

fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8

Strojírenská technologie

Zaměření

Tepelné zpracování a zkoušení materiálů

Katedra materiálů

JAKOST ŘEZU PŘI ŘEZÁNÍ LASEREM - OVLIVNĚNÍ PARAMETRY

ŘEZÁNÍ

Michael Karas

KMT - 29

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

Rozsah práce :

Počet stran	:	81
Počet tabulek	:	3
Počet obrázků	:	37
Počet grafů	:	24
Počet příloh	:	6

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBerci



3146075402

27. května 1994

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra materiálu

Školní rok: 1993/94

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Michael K A R A S
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 - ovlivnění parametry řezání

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se se zadanou tematikou a zpracujte rešerši.
2. Experimentálně sledujte jakost řezu materiálu ČSN 41 1373 při řezání kontinuálním laserem v závislosti na parametrech řezání (výkon, posuv). Experimenty proveďte ve spolupráci s firmou Laser-Tech Olomouc.
3. Dosažené výsledky vyhodnoťte a formulujte závěry ze zjištěných závislostí.

KTM/12
VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1329, Liberec 1
PSČ 461 17

✓ 71 / 945

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy:

40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

/1/ PLUHAR, J. a kol.: Nauka o materiálech. SNTL Praha, 1989.

Další literatura podle pokynů vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Jiří Horyna, CSc

Konzultant:

Zadání diplomové práce:

30.10.1993

Termín odevzdání diplomové práce:

27. 5.1994

Doc. Ing. Karel DAŘOUREK, CSc

Vedoucí katedry



Prof. Ing. Jaroslav EXNER, CSc

Děkan

V Liberci

dne 25.10. 19 93

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

V Liberci, dne 22. května 1994

Michael Karas
.....

ANOTACE

Karas, M. : Jakost řezu při řezání laserem - ovlivnění parametry řezání.

Předložená diplomová práce řeší otázku volby nejvhodnějších parametrů laserového paprsku pro kvalitativní i vysokoproduktivní 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.

O B S A H

Seznam zkratek a symbolů	7
<u>1. ÚVOD</u>	8
<u>2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE</u>	9
2.1 Stručná charakteristika laseru	9
2.2 Obecné zásady řezání laserovým paprskem	14
2.2.1 Mechanismy laserového dělení materiálu	14
2.2.2 Parametry procesu laserového řezání	18
2.2.2.1 Řezatelnost materiálu	19
2.2.2.2 Tlak pomocného plynu	20
2.2.2.3 Rychlost řezání	21
2.2.2.4 Výstupní výkon laserového svazku	22
2.3 Technologické zákonitosti při laserovém řezání	22
2.3.1 Interakce CO ₂ laseru s řezaným materiálem	23
2.3.2 Technologické hodnocení řezání LP	29
<u>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE</u>	37
3.1 Charakteristika materiálu plechu 11 373.1	37
3.1.1 Příprava vzorků ocelových plechů používaných k ozáření laserem	39
3.3 Parametry použitého laserového záření	40
3.4 Vyhodnocení ozářených vzorků	44
3.4.1 Měření šířky řezu	44
3.4.2 Hodnocení drsnosti povrchu ozářených vzorků	46
3.4.3 Hodnocení mikrotvrdosti vzorků	47
3.4.4 Měření tepelně ovlivněné oblasti	48

3.4.5	Úhel rozevření řezné spáry	49
3.4.6	Pozorování vzniklých otřepů	56
3.5	Zhodnocení dosažených výsledků provedených experimentů	60
3.5.1	Šířka řezu	61
3.5.2	Výsledky drsnosti	62
3.5.3	Hodnoty mikrotvrdosti	63
3.5.4	Charakteristika struktury a šířky T00	64
3.5.5	Vyhodnocení úhlu rozevření řezné spáry	67
<u>4.</u>	<u>DISKUSE VÝSLEDKŮ</u>	69
<u>5.</u>	<u>ZÁVĚR</u>	75
<u>6.</u>	<u>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</u>	80

Seznam zkratek a symbolů :

LZ	laserové záření
LP	laserový paprsek
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 materiálu
Š _v	šířka řezu na vrchní straně vzorku
Š _m	šířka řezu na spodní straně vzorku
tl. mtr.	tloušťka materiálu

1 . ÚVOD

Současný strojírenský průmysl potřebuje stále větší množství nejen běžných , ale i speciálních obráběcích strojů a nástrojů vysoké přesnosti, jakosti a výkonnosti. K těmto velmi produktivním zařízením se řadí i lasery (optické kvantové generátory).

Laserová technika zaznamenala v 80. letech mimořádný vzestup v průmyslově vyspělých státech světa, zejména v USA, Japonsku i RSFR. V současné době se zvýšil zájem o využití laserů pro strojírenské a technologické aplikace v SRN, Anglii, Itálii i Francii.

Je to především také z důvodu zlepšení schopnosti konkurence svých výrobků na světovém trhu.

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

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

Pro technologické účely se nejvíce uplatňují CO₂ 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. V tomto smyslu je zaměřena i moje diplomová práce, jejíž úkolem je určení jakosti řezu při řezání laserem - ovlivnění parametry řezání.

2. REŠERŠNÍ ČÁST

2.1 STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA LASERU

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

Laser z fyzikálního hlediska je 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).

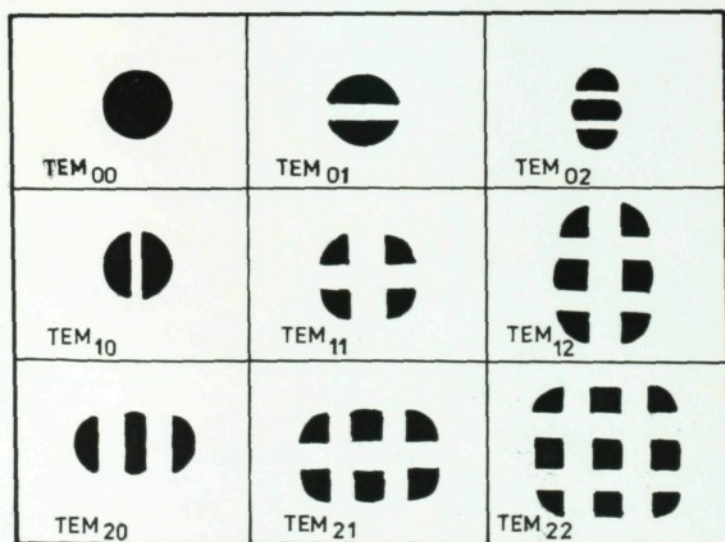
Princip laseru [1] je založen na stimulované emisi fotonů v aktivním prostředí - optickém rezonátoru laseru. Rezonátor představuje buď samostatný, speciálně opracovaný krystal, popřípadě válec naplněný plynem, zakončený protilehlými zrcadly z nichž jedno je částečně propustné druhé nepropustné.

Za normálních podmínek se částice, které tvoří aktivní prostředí laseru nachází v nejnižším energetickém stavu. Jsou-li tyto částice excitovány 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 (zkráceně řečeno 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 CO₂ laserů výbojové trubice). Tvar průřezu svazku neboli mód je označován TEM. Teoreticky může být nekonečné množství módů, ale je některé mají praktické průmyslové uplatnění.

Módová struktura obecně udává rozložení energie na průřezu LP. V teorii elektromagnetického pole jsou módy (příčné elektromagnetické vlny, jejich vektory leží v rovině kolmé na směr šíření) označovány symbolem TEM_{m,n} (transverse Excitation Mode), kde index m udává počet uzlů pole v příčném



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

směru ve směru osy x , index n udává počet uzlů ve směru osy y . Pro LŘ je nejvýhodnější módová struktura TEM_{00} , tj. s rozložením energie podle Gaussovy křivky. Zde také dostáváme úzkou řeznou spáru, rovnou řeznou plochu a úzkou T00 a můžeme pracovat s laserem s nižším výkonem.

Na obr. 2 - 1 jsou uvedeny typy některých módů.

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_{00} 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 charakterizuje jeho zpracovatelské vlastnosti je:

- a) výkon laseru;
- b) hustota výkonu (intenzita) I [W.cm⁻²] měřená na povrchu materiálu;
- c) vlnová délka záření [μ m].

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 excitace) mají největší význam dvě skupiny laserů:

- a) lasery s optickým čerpáním (většina pevnolátkových

laserů);

- b) lasery čerpané elektrickým výbojem (většina plynových laserů).

Laserové záření se vyznačuje:

- a) monochromaticností;
- b) vysokou koherencí;
- c) směrovostí (malá rozbíhavost svazku);
- d) 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) [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$];
- 2.) Výkon svazku (energie svazku vyzářená za 1s) [W];
- 3.) Intenzita - hustota výkonu (výkon připadající na jednotku plochy kolmé na směr šíření) [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$].

Lasery používané pro řezání materiálu se vyznačují těmito vlastnostmi:

- a) širším sortimentem řezatelných materiálů od tlouštěk 0.1 do 20 mm s možností řezání např. vrstvených materiálů;
- b) hustota výkonu se může na základě chromatičnosti laserového světla měnit v širokých mezích až do hodnoty $10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$;
- c) nedochází k opotřebování nástroje (paprsek není ve fyzickém kontaktu s materiálem);
- d) vysokou produktivitou práce a výbornou kvalitou řezných ploch ;

- e) lze provádět řez těžko přístupných míst materiálu;
- f) lze řezat materiály s vysokou teplotou tání (T_a , W , Nb);
- g) řez vykazuje chemickou čistotu materiálu , skoro žádnou deformaci;
- h) tato technologie vykazuje i několikanásobné snížení měrné energie proti jiným metodám řezání (u řezání laserem je to 40 až 70 kJ.m^{-1} ; u řezání kyslíkem 100 až 180 kJ.m^{-1} a při plazmovém řezání 70 až 140 kJ.m^{-1}).

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 $\text{cm}^2.\text{min}^{-1}$
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 abrazi- vní řezání	0.5 ÷ 1.0	14 ÷ 20

Vedle uvedených výhod se CO_2 lasery vyznačují i těmito nedostatky:

- 1) Světlo vyzařované těmito lasery se vyznačuje relativně dlouhou vlnovou délkou, která se od lesknoucích se ploch z 90 % odráží;
- 2) Laser vyžaduje vysoké investiční náklady a pravidelnou údržbu;
- 3) Zpracování povrchových vrstev je závislé na parametrech a charakteru laseru;
- 4) Laser se vyznačuje těžko měnitelnou ohniskovou

vzdáleností;

5) Při práci s laserem se požaduje důsledná bezpečnost práce.

2.2 ZÁSADY ŘEZÁNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM

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

Další část této kapitoly je věnována popisu možností užití laseru při zpracování - resp. řezání plechů.

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 narysování tvaru. Většina řezacích prací laserem je prováděna u tloušťek plechů do 10 mm, neboť tento proces je nejefektivnější. Řezání laserem je ideální pro zpracování v dávkách nebo malých až středně výrobních objemech.

Pro zpracování materiálu dle [2] se používá především CO₂ laseru. To má dva hlavní důvody:

- a) CO₂ lasery dnes umožňují dosáhnout nejvyšších výkonů v trvalém provozu.
- b) Mají relativně vysokou účinnost (10 - 15 %), splňují vysokou rychlost, přesnost a hladkost řezných ploch.

2.2.1 Mechanismy laserového dělení materiálu

Pro dělení materiálu laserem dle [4] se využívá velmi úzkého fokusovaného svazku vysoké hustoty výkonu až $1 \cdot 10^9 \text{ Wcm}^{-2}$ v základním módu (TEM₀₀), 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 %. 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 svazkem.

Dělení materiálu laserem je možné provádět třemi různými způsoby. 1. laserovým protavováním dochází absorpcí 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 patrné stopy po odběru materiálu (striace) a v některých případech i otřep na spodní straně řezu.

2. Laserovým sublimačním řezáním (tj. varianta 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.

3. Laserovým pálením - materiál v místě dopadu laserového svazku je 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 reakčního tepla hoření, které se projevuje podstatným zvýšením rychlosti řezání. Vlastní proces řezání je pak důsledkem exotermické reakce materiálu s kyslíkem. Avšak se stoupajícím podílem legujících prvků se řezací proces stává obtížnější a to se zvyšujícím se obsahem m.j. uhlíku, chromu a křemíku.

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 CO₂ laserů jak ŠÍMAN [3] uvádí je nejvýhodnější do tloušťky 6 až 7 mm.

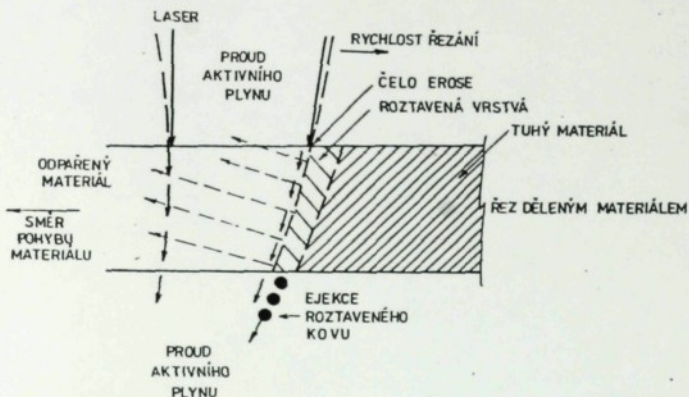
Technicky lze řezat ocele do tloušťky asi 20 mm. Řezat lze

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 nejpříjemnější 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 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 ohřívána teplem z absorbovaného laserového svazku a z reakce mezi



Obr. 2 - 2 Teoretický model mechanismu laserového pálení

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 fokusací čočky a na následujících vlastnostech kontinuálních CO₂ laserů:

- A) výkon LP na výstupu z laseru (tj. výstupní výkon laseru)
- B) módové struktury LP
- C) divergenci LP
- D) nejmenším poloměru LP ve svazku LZ
- E) vlnové délce LZ 10.6 μm (což je vlnová délka emitovaná CO₂ laserem).

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: CO₂ lasery - schopnosti procesu při výkonovém rozsahu, materiál uhlíková ocel

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 Tlak pomocného plynu

Použitím reaktivních pomocných plynů umožňuje minimalizovat šířku řezné spáry, eliminuje taveninu v erozní frontě (minimalizace T₀₀ a tím i minimalizuje výskyt trhlin, stejně jako deformace v důsledku tepelného pnutí). Tyto plyny přispívají k ostrosti průniku obrobeného povrchu se vstupní a výstupní plochou obrobku, což má význam z hlediska přesnosti a využití laserového řezání jako finální

operace.

Plyn může být kyslík, inertní plyn nebo vzduch závisející na druhu materiálu a požadavcích kvality. Při řezání ocelí se ponejvíce užívá kyslík. Podle FORBESE [5] dochází při použití kyslíku k 70 % zastoupení podílu exotermní reakce v energetické bilanci procesu úběru materiálu. KAMALA a STEEN [6] porovnávali řeznou rychlost při použití argonu a kyslíku a dospěli k názoru, 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. Běžné otvory trysek jsou 0.8 až 2.5 mm. Vzdálenost trysek od materiálu se mění od 0.1 do 1.5 mm u CO₂ laserů a až do 5 mm u Nd:YAG laserů. Vzdálenost trysky od materiálu a tlak plynu má podstatný vliv na kvalitu řezu. Při použití CO₂ laseru se dosáhne čistého řezu (bez oxidů a strusky) u tenkých dílů z nerez oceli, hliníku nebo titanu, je-li použit koaxiální inertní plyn o tlaku 0.62 MPa a minimální vzdálenosti trysky od materiálu.

2.2.2.3 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.).

2.2.2.4 Výstupní výkon svazku

Výstupní výkon svazku dle [7] má rozhodující vliv na řezný výkon laserového obráběcího systému, avšak s použitím kritéria maximalizace ekonomické efektivity se pro řezání jeví optimální použití CO₂ 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.

2.3 TECHNOLOGICKÉ ZÁKONITOSTI PŘI LASEROVÉM ŘEZÁNÍ

Technologické zákonitosti při laserovém řezání jsou spojeny s nejrůznějšími parametry, které lze dle [2] rozdělit 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 CO₂ laseru s řezaným materiálem

Jak již bylo uvedeno, pro řezání (dělení) materiálu se používají kontinuální CO₂ 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 TEM₀₀, avšak při použití vyšších módů 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.

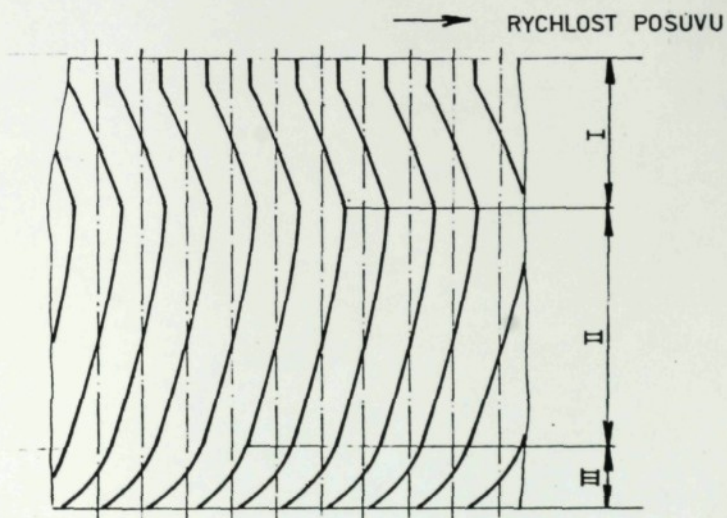
Uvažujeme-li řezání CO₂ laseru, pak při interakci

laserového záření s materiálem dochází k těmto jevům:

- a) vytvoření oblasti ionizace a plazmového obláčku nad materiálem
- b) vytrhování větších částí materiálu
- c) vytvoření tlakových vln, které se šíří materiálem

Po odstranění určité povrchové vrstvy materiálu vzniká úzká řezná štěrbiná. A nutným požadavkem na parametry LP je kruhová polarizace, která zabezpečí rovnoměrnou absorpci laserového záření v řezné štěrbině. Vznikla štěrbiná je důležitým technologickým parametrem pro další postup paprsku řezaným materiálem jak uvádí [7]. Postupující LP vytváří na řezné ploše materiálu řeznou stopu tzv. mikrorelief. Studium mikroreliefu povrchu řezu se zabýval OLEŠUK [8], kdy používal kontinuální laser, který umožňuje detailnější studium tohoto procesu. A umožňuje získání potřebných závislostí režimů obrábění a charakteristik získaných řezů. Toto studium prováděl na materiálu z uhlíkové oceli, avšak z této publikace nejsou patrné další bližší informace. A současně se při tomto výzkumu zabýval zkoumáním drsnosti řezu, kterou však blíže necharakterizoval. Tento autor se též zaměřil na popis rozložení "brázd" na povrchu řezu. Tento výzkum byl prováděn i na uhlíkové oceli při rychlosti řezu v 2.5 m/min, je zobrazen na obr.2 - 3. Je možné rozlišit tři základní zóny na povrchu řezu, lišící se jedna od druhé různým náklonem "brázd" (rýh) ve směru obrábění i drsnosti.

Existence zóny I. na povrchu řezu charakterizuje rozrušení nepravidelně protékající od vrchní hrany dovnitř materiálu. Náklon "brázd" (ke směru obrábění) závisí na rychlosti



Obr. 2 - 3 Schéma rozložení "brázdy"

přemístňování 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 "brázdy" ze zóny II. je opačný ke směru řezání. Zbývá podotknout, že při velmi nízkých rychlostech řezání se sklon "brázdy" zmenšuje jak v zóně I. tak i v zóně II.

Existence zóny III. na povrchu řezu ukazuje na pokračování procesu řezání, ale bez účasti laserové energie, ale pouze za účasti proudu kyslíku vyfukujícího ze zóny obrábění přehřátý tekutý kov a jeho kysličníky. Při čemž rychlost prořezávání se prudce snižuje (o čemž svědčí znatelný náklon "brázdy" k hraně kovu), a patřičně se snižuje kvalita hran řezu.

Při studiu příčných řezů 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.

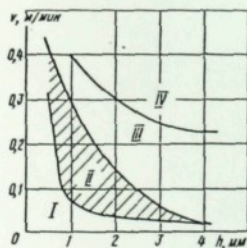
Pokud se týká drsnosti povrchu řezu u uhlíkové oceli - zóna I. má minimální (hodnotu R_a). Šířka I. zóny (měřeno na obrobeném povrchu ve směru kraniálním) je v průměru 1 až 3 mm a je tvořena pravidelnými rýhami. Následující zóna II. je charakterizována tím, že některé rýhy jsou nezřetelné, nebo chybí, 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. Ve II. zóně dochází též k výrazné deformaci erozní fronty v důsledku selektivní polarizace laserového svazku.

Dále je charakterizována některými zvýšenými hodnotami mikrotvrdosti. Při nízkých rychlostech u desek menších tloušťek (v našem případě $h = 3.3$ mm) je charakteristická jen přítomnost zón I. a II. Se zvýšením rychlosti řezání se i na povrchu řezu objevuje zóna III. s nejvyšší rychlostí.

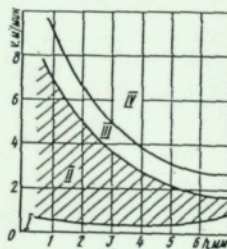
A proto je nutné pro získání kvalitních řezu, kdy drsnost povrchu nepřevyšuje hodnoty $R_a = 40 - 50 \mu\text{m}$, ohraničit rychlost, aby se zabránilo na povrchu řezu vytvoření zóny III.

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 režimy vysokoproduktivního obrábění (všechny tři zóny) odlišují od režimu, zabezpečujících zvýšenou kvalitu řezu (bez zóny 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



Obr. 2 - 4

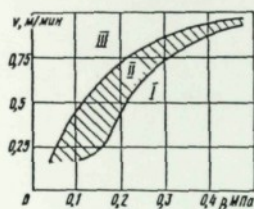


Obr. 2 - 5

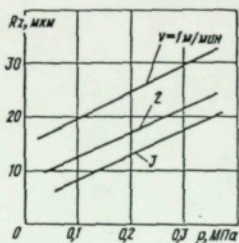
Obr. 2 - 4 Změna dosažených rychlostí řezání uhlíkové oceli s různou kvalitou v závislosti na tloušťce přípravku při $P = 0.2 \text{ kW}$.

Obr. 2 - 5 Závislost dosažených rychlostí řezání na tloušťce přípravku při $P = 1.0 \text{ kW}$.

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. Režimy obrábění, odpovídající I. a IV. zóně jsou technologicky neúčinné. Při snížení měrného výkonu LP začíná autogenní hoření při značně nižších rychlostech řezání. Současně je třeba dodat, že kvalita řezání uhlíkových



Obr. 2 - 6



Obr. 2 - 7

Obr. 2 - 6 Vliv tlaku kyslíku na rozměry oblasti kvalitního řezání uhlíkové oceli při $P = 0.45 \text{ kW}$; $h = 3 \text{ mm}$.

Obr. 2 - 7 Závislost drsnosti řezu uhlíkové oceli na tlaku O_2 při různých rychlostech.

ocelí souvisí s tlakem vstříknutého kyslíku. Jak je patrné z obr. 2 - 6, se vzrůstem tlaku O_2 se zužuje oblast stálého rozrušení (stopy) a zhoršuje se i drsnost řezu. Závislost drsnosti povrchu na tlaku ofukujícího plynu je na obr. 2 - 7. Zlepšení kvality dosáhneme tlakem pomocného plynu od 0.05 až 0.15 MPa. Závěrem této kapitoly je nutno konstatovat i některé poznatky o řezání nerezavějících ocelí pomocí kontinuálního laseru.

Na rozdíl od uhlíkových ocelí jsou "brázdy" méně výrazné.

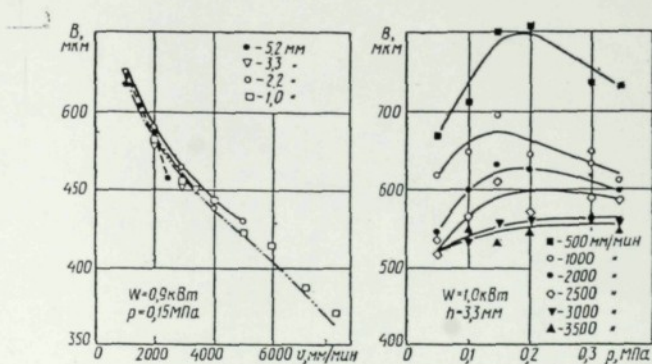
Často povrch řezu je definován dvěma zónami, které charakterizují existenci neperiodického a nepřetržitého rozrušení. S klesající rychlostí řezání se snižuje i kvalita povrchu řezu druhé zóny. Tento jev je podobný autogennímu procesu řezání charakteristického pro uhlíkové ocele. Vysvětluje se snížením 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 vytvoří špatně tavitelný kysličník.

2.3.2 Technologické hodnocení řezání LP

Řezání CO₂ laserem dle KOVALENKA [9] je nízkoodpadový technologický proces. Z hlediska efektivnosti tohoto procesu, je důležité stanovit optimální podmínky jeho průběhu a zhodnotit jeho kvalitu dle následujících ukazatelů:

a) šířka řezu, b) velikost tepelně ovlivněné oblasti (dále jen T00), c) drsnost povrchu řezu a další charakteristiky.

a) Šířka řezu představuje nejzávažnější kritérium stejně jako u klasických metod obrábění. Čím je větší, tím větší je množství odpadu. Šířku řezu zkoumal [9] na uhlíkové oceli a sestrojil závislost šířky řezu na rychlosti řezání jak je uvedeno na obr. 2 - 8 a. Též byl sledován vliv tlaku plynu (O₂) na šířku řezu. Tato závislost je na obr. 2 - 8 b.

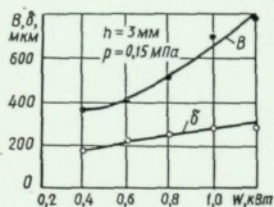


Obr. 2 - 8 a,b Závislost šířky řezu uhlíkové oceli na :

a) rychlosti řezu

b) tlaku O_2

Šířka řezu závisí také na výkonu laserového záření (obr. 2 - 9). Se zvětšováním výkonu roste i šířka řezu.

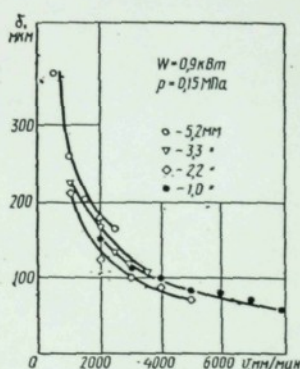


Obr. 2 - 9 Závislost šířky řezu (B) a T00 (označené jako δ) na výkonu LP u uhlíkové oceli

b) Tepelně ovlivněná oblast zahrnuje část materiálu se změnou barvy na povrchu vzorku, změnou struktury, tvrdosti, s vytvoření trhlin a drobnými defekty. Při provedení předběžných experimentů na nařezaných vzorcích z uhlíkové oceli bylo stanoveno, že v podstatě hranice změny

tvrdosti odpovídají hraničním 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 T00. Takovýto postup však již není možný při vysokokvalitativním řezání, kde již změna barvy může být nežádoucí efekt.

U uhlíkové oceli se rozměry T00 zmenšují s vzrůstem rychlosti řezání (obr. 2 - 10a), prakticky nezávisí na tloušťce oceli. Tím není na více tenkých vzorcích velikost T00 menší, jak na vzorcích větších tloušťek. Velikost T00 je závislá i na tlaku kyslíku (obr. 2 - 10 b). S vzrůstem tlaku se projevuje tendence ke zmenšování rozměru T00 při jakékoli

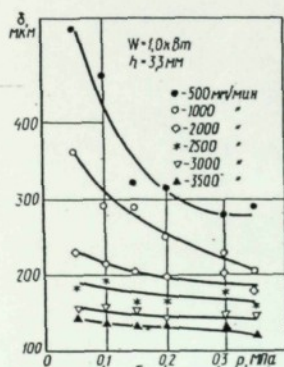


Obr. 2 - 10a Závislost rozměrů T00 na rychlosti řezání u uhlíkové oceli

rychlosti. Ale obvykle se při malých rychlostech řezání (např. $v = 500$ mm/min) tato tendence projevuje silněji. Při hodně vysokých rychlostech jsou rozměry T00 daleko stabilnější a skoro nezávisí na tlaku plynu.

Též byla stanovena závislost rozměrů T00 na výkonu záření.

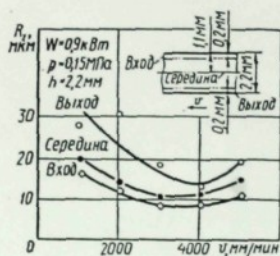
Se vzrůstajícím výkonem záření se několikrát zvětšují i rozměry T00 (obr.2 - 5). U nerezavějící oceli se také mění rozměry T00 v širokých hranicích za nízkého tlaku O_2 . Ale se vzrůstem tlaku na 0.15 až 0.25 MPa a zvláště při vysokých rychlostech řezání žádné změny nepozorujeme. To znamená, že při vysokovýkonostním řezání (s vysokou rychlostí) by měl tlak plynu být nižší jak 0.15 MPa.



Obr. 2 - 10b Závislost rozměrů T00 na tlaku pomocného plynu

c) Drsnost povrchu je velmi důležitá při odhadu kvality řezu. Hodnota drsnosti odráží vliv podmínek při opracování. Drsnost povrchu a rozměry T00 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 plochy materiálu - plechu. Drsnost povrchu - při řezání uhlíkové ocele malé tloušťky (tl. 1 mm) je kvalita povrchu řezu dosti vysoká a hodnota 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 - 11.



Obr. 2 - 11 Závislost drsnosti povrchu řezu na rychlosti řezání pro uhlíkovou ocel tl. = 2.2 mm

V oblasti řezu, v blízkosti vstupu paprsku do materiálu je 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.

Při topografii (profilu) řezu ve vzorku získaného v optimálních režimech z hlediska získání nejvyšší kvality povrchu řezu (minimální drsnost na vstupu paprsku do materiálu) mikrorelief uhlíkové oceli vykazuje stejnorodost (ustálenost) a dosažená kvalita povrchu je nejvyšší ve srovnání s ostatními materiály (nerezavějící ocel, titan,

hliník). Mikronerovnosti jsou skoro stejné a rozdíl je nevelký. Další charakteristiky: při řezání uhlíkové oceli velké tloušťky ($h = 5.2 \text{ mm}$) 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.

To znatelně snižuje kvalitu laserového řezání. Tvoření otřepu probíhá jako následek navlhčování povrchu pevného kovu vyloučeným tekutým kovem a jeho kyslíčníky. A tím získání chemických sloučenin, tvrdých a velmi tekutých roztoků, difúzní cestou v povrchové vrstvě kovu.

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 $p = 0.5 \text{ MPa}$ u uhlíkové oceli.

Jednou z cest boje s otřepem je 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. Na rozdíl od uhlíkové oceli při řezání nerezavějící oceli a Ti se objevuje otřep při libovolných režimech, avšak při řezání s vyšší kvalitou se tvoří znatelně méně. Efektivní se zdají být povrchově aktivní vrstvy, které mění smáčitelnost součástky jejími tekutými kysličníky, které nemění svoje vlastnosti ani za vyšších teplot. Experimentálně bylo zjištěno, že fosfátování, 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

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, ne vždy jsou vhodné. Proto je nejcílevědomější vypracovávat speciální režimy, které odstraňují bezprostředně tvoření otřepu na hranách řezu.

Závěrem této části práce je třeba konstatovat, že uvedené poznatky byly uplatněny při řešení vlastních experimentů.

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 T_{00} , Výskyt ulpělých kapek taveniny "otřepů" na výstupní ploše výrobku, zakřivení erozní fronty v čelní rovině při pulsním režimu

jako důsledek nekruhové polarizace světla - dvou zónová morfologie, a další). Dalším negativním fenoménem v procesu obrábění je odebíraný materiál: v plynném skupenství odpařovaný do kaudálního směru způsobuje obláček laserové plazmy zhoršující 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 asistentního plynu. Z dalších negativních fenoménů vybíráme vliv tepelných a optických vlastností obrobku. Zpracováno dle [10].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

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

Úkolem bylo určení vlivů řezných podmínek na kvalitu řezu. Tzn. zjištění šířky řezu, drsnosti povrchu řezu, průběh mikrotvrdosti, velikosti T00, úhlu rozevření, velikosti a množství otřepů atd.

Vlastní zpracování bylo provedeno na laserovém technologickém centru vyrobeném britskou firmou Control Laser, Ltd., jehož výkonovým zdrojem je kontinuální CO₂ 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 bývalého 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

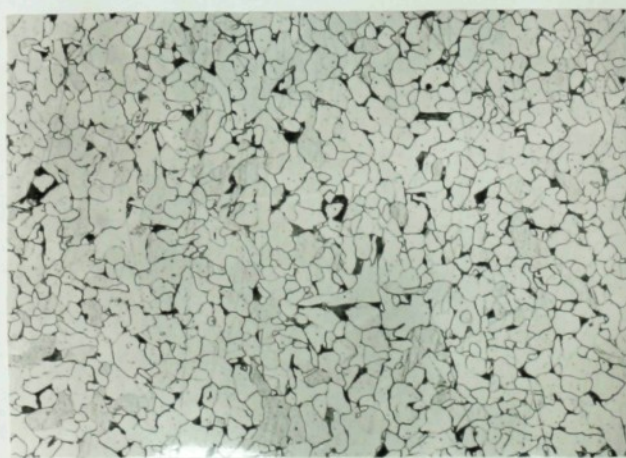
Uvedené plechy se vyrábí v provedení jako tenké (tj. max. 3 mm) a tlusté (tj. nad 3 mm) válcováním, popřípadě válcováním za tepla. ČSN 42 0113 označuje tento materiál ve stavu normalizačně žíhaném. Povrch plechu může být dle ČSN okujený nebo mořený.

Chemické složení dle ČSN

C.....	0.2 % ÷ 0.05 %	
P.....	0.05 % ÷ 0.01 %	
S.....	0.05 % ÷ 0.01 %	pozn.*

* = pro σ nad 16 mm - max 0.22 %

Na obr. 3 - 1 je uvedena struktura základního materiálu použitých plechů používaných k laserovému ozáření. Uvedená struktura feriticko - perlitická. Hodnocení této struktury bylo prováděno běžným metalografickým způsobem. 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).



Nital

250 x

Obr. 3.1 Struktura ocelového plechu 11 373.1

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 $\alpha = 180^\circ$ průměr trnu $D = 0.5 \times a$ ($a = \varnothing$ tyče)

svařitelnost zaručená

Použití plechu dle ČSN 42 0074

- oceli pro stavbu plavidel
- oceli obvyklých jakostí
- oceli na trubky bezešvé pro konstrukce a potrubí
- oceli na láhve pro stlačený a zkapalněný vzduch
- oceli na ventily
- oceli na valivá ložiska
- oceli pro součásti kolejových vozidel
- oceli na nýty

Mimo to lze použít materiál 11 373.1 i pro

- součásti strojů namáhané staticky a dynamicky
- pruhy na ráfky kol

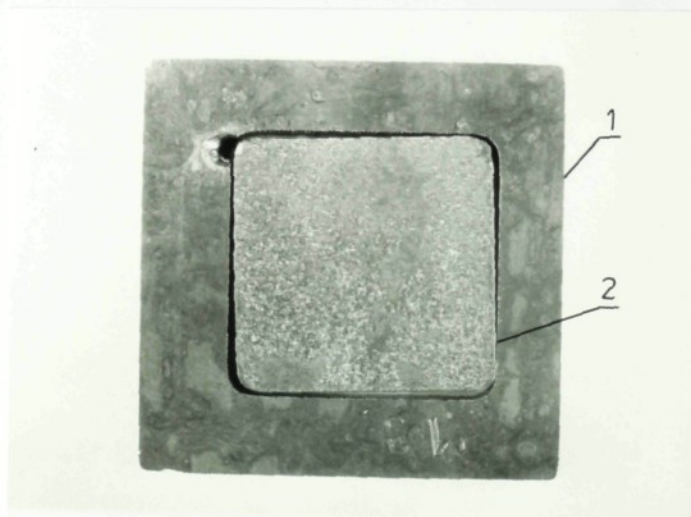
3.1.1 Příprava vzorků ocelových plechů používaných k ozáření laserem

Z daného materiálu uvedeného plechu byly zhotoveny vzorky o rozměrech 55 × 55 mm a příslušné tloušťky materiálu. Tyto rozměry vzorku byly též získány laserovým řezáním, avšak vyhodnocení kvality těchto řezů nebylo předmětem řešení DP, proto nejsou uvedeny ani parametry tohoto řezání.

Celkem bylo takto zhotoveno 35 vzorků, které pro

jednotlivé tloušťky plechu (2, 4, 6, 8 mm) byly rozděleny do 6 skupin. Identifikace jednotlivých skupin je uvedena v kapitole 3.3 .

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



1 - obvodový řez (obrys vzorku před vlastním laserovým ozářením)

2 - vnitřní řez - experimentálně hodnocený

Obr. 3-2 Pohled na použitý vzorek

3.3 PARAMETRY POUŽITÉHO LASEROVÉHO ZÁŘENÍ

Tloušťka plechů materiálu 11 373.1 byla volena 2, 4, 6,

3 mm. Větší tloušťky nebyly voleny, protože jsou již válcovány za tepla. Toto má vliv na velikost 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.

Laserové záření uvedených vzorků je definováno těmito parametry:

- 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.

V následující části práce je uveden přehled jakým způsobem byly vzorky různých tloušťek plechů 11 373.1 zpracovány.

Dále je třeba uvést, že při ozařování všech tloušťek plechu byla proměnná rychlost posuvu laserového záření, resp. rychlost posuvu materiálu. A konstantními parametry byly výkon LZ, tlak pomocného plynu.

Další skupinu vzorků byly plechy o tloušťce 3 mm, kde proměnnou byl tlak pomocného plynu, avšak za použití konstantního výkonu i rychlosti posuvu materiálu. Tloušťka 3 mm byla volena proto, že se u ní nejvíce projevuje vliv tlaku plynu na drsnost řezu.

Poslední skupinu 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 %

V následující části je uveden přehled označení vzorků spolu s použitými parametry laserového záření.

Přehled vzorků a parametrů laserového záření

1) Vzorky s proměnnou rychlostí posuvu

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	$F = 1800 \text{ mm/min}$
15	$F = 2000 \text{ mm/min.}$

c) tl. 4 mm, $P = 2000 \text{ W}$, $p = 1.0 \text{ bar}$

vzorek č. 11	$F = 1200 \text{ mm/min}$
12	$F = 1400 \text{ mm/min}$
13	$F = 1600 \text{ mm/min}$
14	$F = 1800 \text{ mm/min}$
15	$F = 2000 \text{ mm/min.}$
16	$F = 2200 \text{ mm/min}$
17	$F = 2400 \text{ mm/min}$

d) tl. 2 mm, $P = 1500 \text{ W}$, $p = 1.0 \text{ bar}$

vzorek č. 11	$F = 1500 \text{ mm/min}$
12	$F = 2000 \text{ mm/min}$
13	$F = 2500 \text{ mm/min}$
14	$F = 3000 \text{ mm/min}$
15	$F = 3500 \text{ mm/min}$
16	$F = 4000 \text{ mm/min}$

2) Vzorok s proměnným tlakem pomocného plynu

tl. 8 mm, $F = 1200 \text{ mm/min}$, $P = 2500 \text{ W}$

vzorek č. 21	$p = 0.6 \text{ bar}$
22	$p = 0.7 \text{ bar}$
23	$p = 0.8 \text{ bar}$
24	$p = 1.0 \text{ bar}$
25	$p = 1.2 \text{ bar}$
26	$p = 1.4 \text{ bar}$

3) Vzorky s proměnným výkonem LZ

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

3.4 VYHODNOCENÍ OZÁŘENÝCH VZORKŮ

Na základě poznatků uvedených v rešeršní části této práce bylo přistoupeno k určení důležitých parametrů, které charakterizují sledovaný řez použitých vzorků.

Mezi tyto parametry se řadí:

- 1) šířky řezu (z vrchní i spodní strany)
- 2) drsnosti řezu
- 3) průběhu mikrotvrdosti
- 4) měření šířky T00
- 5) stanovení úhlu rozevření řezné spáry (odvozeno z šířky řezu)

V některých případech pro doplnění zjišťované problematiky byl sledován i otřep na hranách vzorků.

3.4.1 Měření šířky řezu

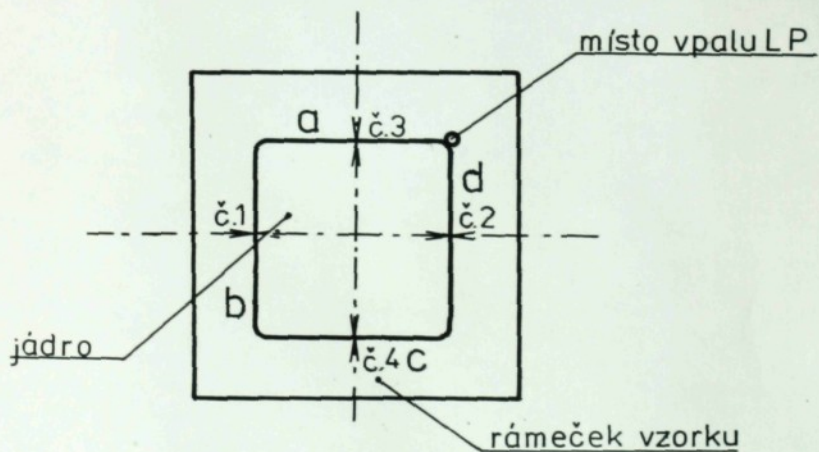
V prvním případě byla sledována šířka řezu a to u všech vzorků, které byly k dispozici. Mezi nejdůležitější kritéria patří právě šířka řezu, určující rozměrovou přesnost budoucího výrobku, množství odpadu, kvalita řezu atd.

Vyhodnocení tohoto parametru bylo provedeno tak, že příslušný vzorek byl ustaven v pomocném přípravku, kde byla současně přesně centrována vyříznutá střední část (jádro) vzorku (jak lze usoudit z obrázku 3 - 2).

Na obr. 3 - 3 je uvedeno schéma míst vzorku, kde se měřila sledovaná veličina.

Měření bylo u každého vzorku provedl 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.

Každé měření bylo tabelárně zpracováno a je uvedeno v příloze č. 1 této práce. Zde je též uveden výsledný průměr



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

čtyř naměřených hodnot sledované veličiny, který představuje specifickou hodnotu daného měření. Současně příslušné tabulky obsahují identifikaci vzorků.

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 hodnoty se neliší více jak o 15 %. Což je vzhledem k velké členitosti obrobeného povrchu velmi dobrý výsledek.

3.4.2 Hodnocení drsnosti povrchu ozářených vzorků

Dalším technologickým parametrem důležitým pro posouzení toho zda bude daný řez vyhovovat nebo zda bude zapotřebí dalších finalizujících úprav je právě drsnost povrchu řezu.

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

U menších vzorků byla drsnost stabilní po celé délce povrchu (2 mm). U větších tloušťek (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 měřicí aparatury.

Drsnost byla vždy měřena na povrchu hran vyřezaných jader.

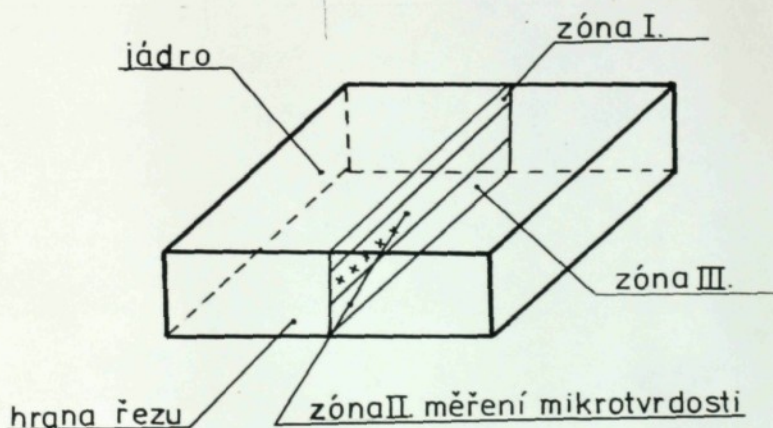
Z obr. 3 - 3 je patrné označení hran řezu (a, b, c, d), kde se měřila vždy hrana b, c. Jednalo se o hrany ležící naproti místu vpalu LP do materiálu, protože hrany, do kterých zasahoval vpál, by následně mohly být ovlivněné.

Zároveň byla z měřících přístrojů odečítána i hodnota maximální naměřené drsnosti.

3.4.3 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 některých vzorků s tloušťkou plechu 4 až 6 mm, kde proměnným parametrem byla rychlost posuvu.



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

Důvod tohoto záměru lze vysvětlit tím, že tloušťky plech 4 až 6 mm jsou v technické praxi často používány.

Měření tvrdosti metodou VICKERSE bylo prováděno na mikrotvrdoměru ZWICK při zatížení $HV_{0.2}$. U všech vzorků bylo 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 ozáření laseru) a bylo zjištěno, že tato hodnota činí 135 HV_{0.2}.

3.4.4 Měření tepelně ovlivněné oblasti

Bylo provedeno při mikroskopickém pozorování na optickém mikroskopu NEOPHOT-32, výrobce CARL ZEISS JENA (NDR). Získané výsledky T00 byli naměřeny zhruba uprostřed tloušťky vzorku.

Měření T00 bylo provedeno na vzorcích, které byly již použity při měření mikrotvrdosti (tl. 4 až 6 mm).

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.

Při sledování struktury bylo provedeno pozorování vzorků na dvou význačných místech. A to na hraně, kde laserový paprsek vstupoval při řezu do materiálu. Tyto snímky mají zvětšení 250 násobné. Při 100 násobném zvětšení byla pozorována oblast ozářeného vzorku v blízkosti spodní hrany řezu, kde je T00 největší.

Na následujících obrázcích 3 - 5 až 3 - 16 jsou uvedeny struktury ovlivněných oblastí vybraných vzorků.

3.4.5 Úhel rozevření řezné spáry

Při hodnocení spáry se vycházelo z úvahy, že úhly úkosu řezné spáry by měli, při optimálních řezech malých tloušťek materiálu, být téměř nulové. U větších tloušťek, u nichž se již rozlišují tři oblasti na povrchu řezné plochy, by se měl začít projevovat určitý úhel úkosu. Hodnotu úhlu lze vypočítat ze vztahu :

$$\boxed{\operatorname{tg} (\alpha / 2) = \frac{\check{S}_v - \check{S}_m}{\text{tl. mtr.} \times 2}} \quad (3.1)$$

kde značí: $\check{S}_v$ - šířku řezu na vrchní straně vzorku,

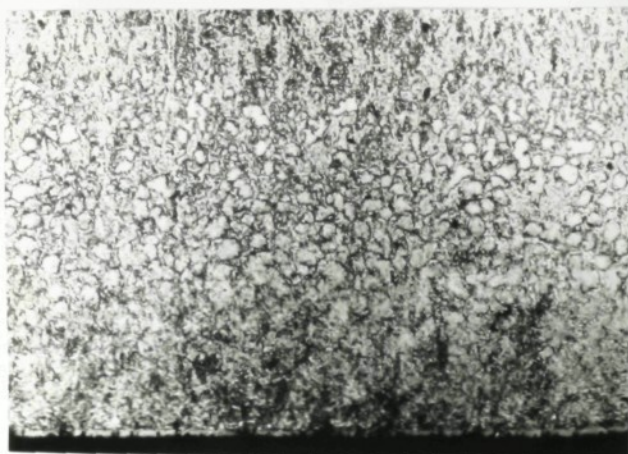
$\check{S}_m$ - šířka řezu na spodní straně vzorku.

tl. mtr. - tloušťka materiálu

Dále se určovalo, zda se jednalo o klasický případ rozevření řezné spáry (tzn., že šířka řezu na vrchní straně je menší než na spodní), označované pak v tabulkách jako P (pozitivní).

Nebo zda šlo o případ opačný, označovaný pak jako N (negativní).

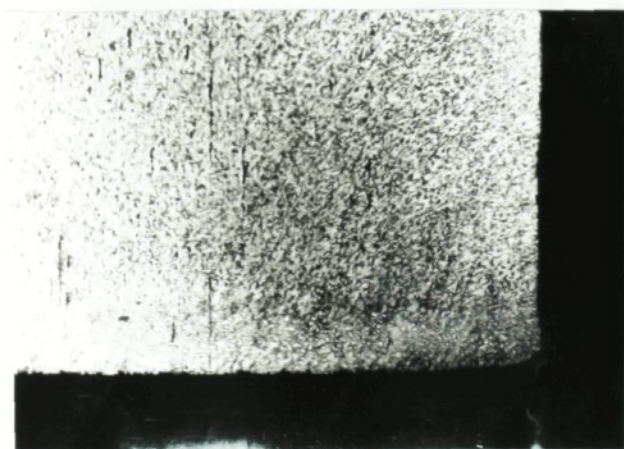
Získané hodnoty úhlu α , charakterizujícího též kvalitu řezu jsou uvedeny v tabulce - viz. příloha č. 6.



Nital

250 x

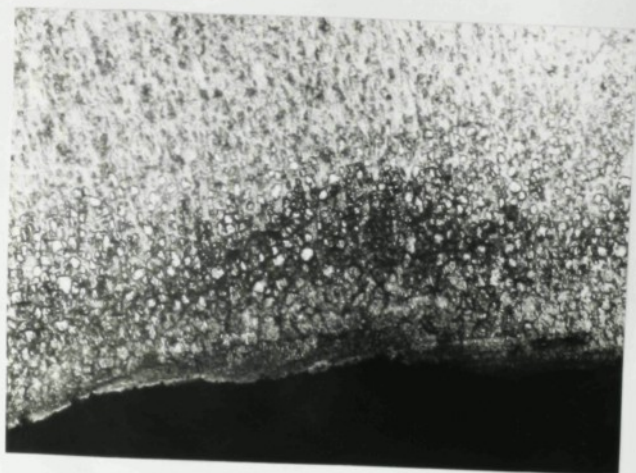
Obr. 3 - 5 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 11 - tl. 4 mm)



Nital

100 x

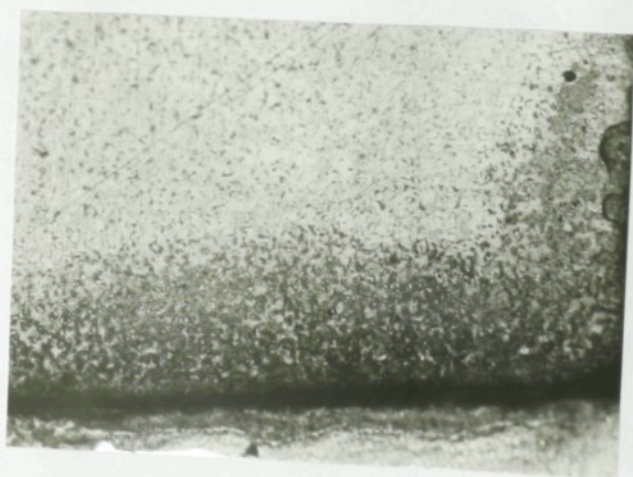
Obr. 3 - 6 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 11 - tl. 4mm)



Nital

250 x

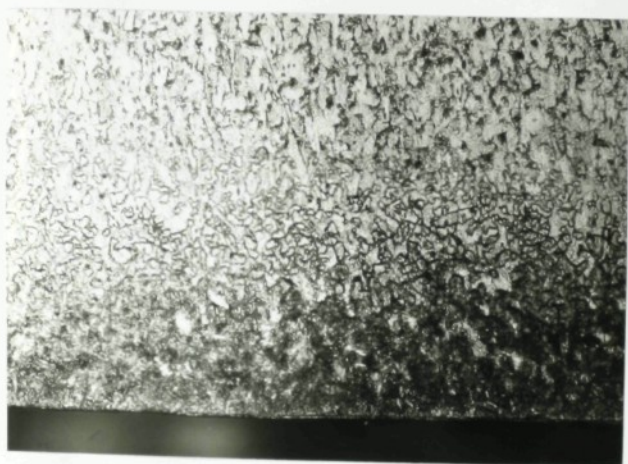
Obr. 3 - 7 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 14 - tl.4mm)



Nital

100 x

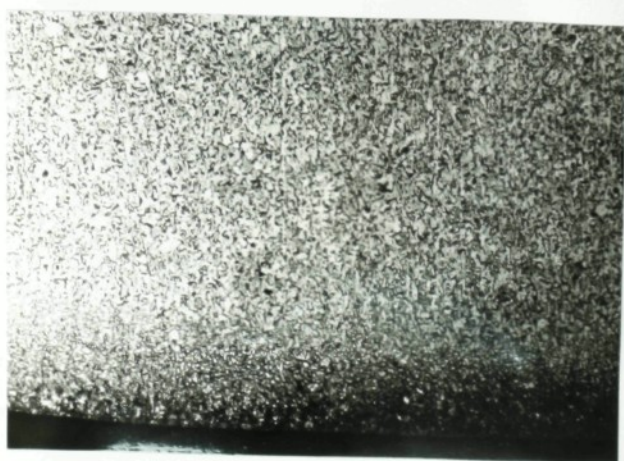
Obr. 3 - 8 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 14 - tl.4mm)



Nital

250 x

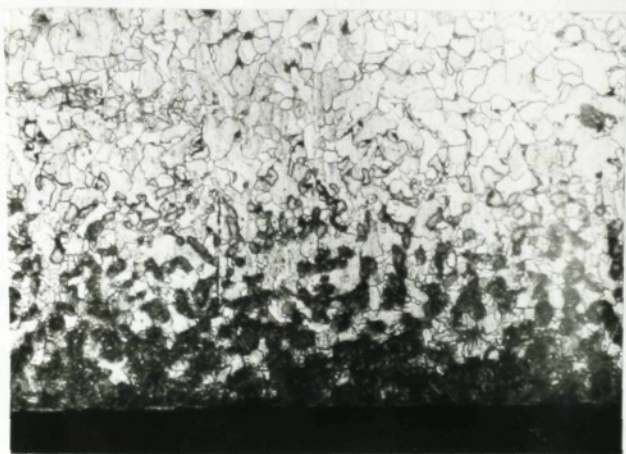
Obr. 3 - 9 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 17 - t1.4mm)



Nital

100 x

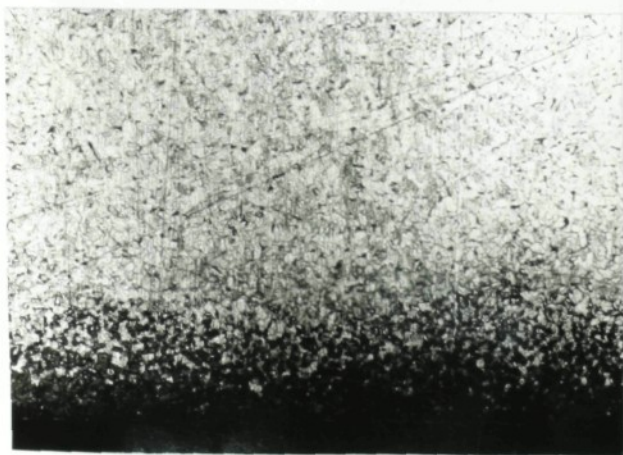
Obr. 3 - 10 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 17-t1.4mm)



Nital

250 x

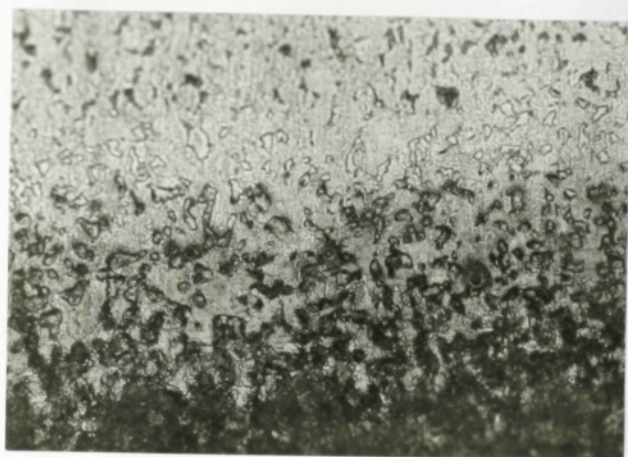
Obr. 3 - 11 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 11-tl.6mm)



Nital

100 x

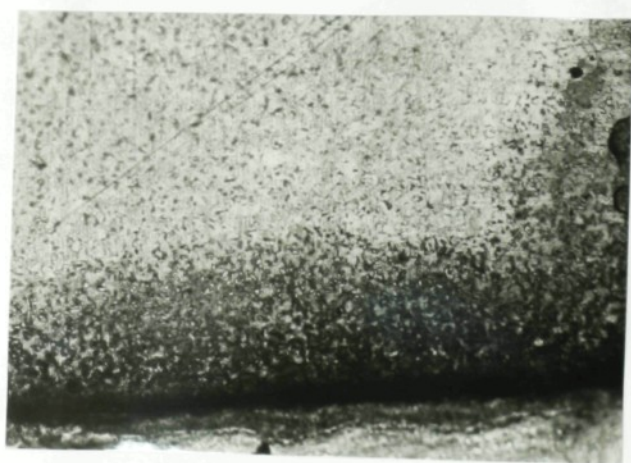
Obr. 3 - 12 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 11-tl.6mm)



Nital

250 x

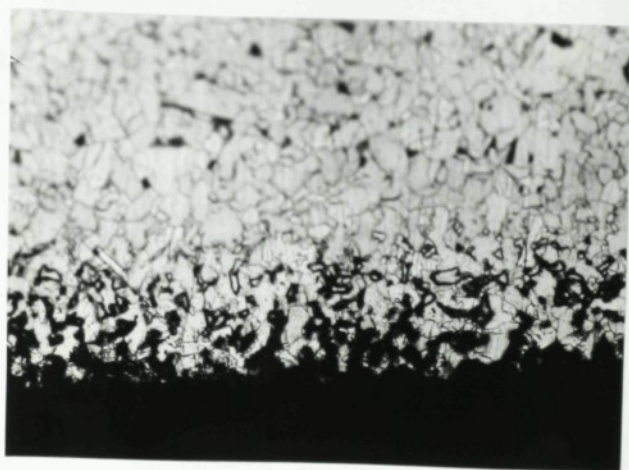
Obr. 3 - 13 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 13-tl.6mm)



Nital

100 x

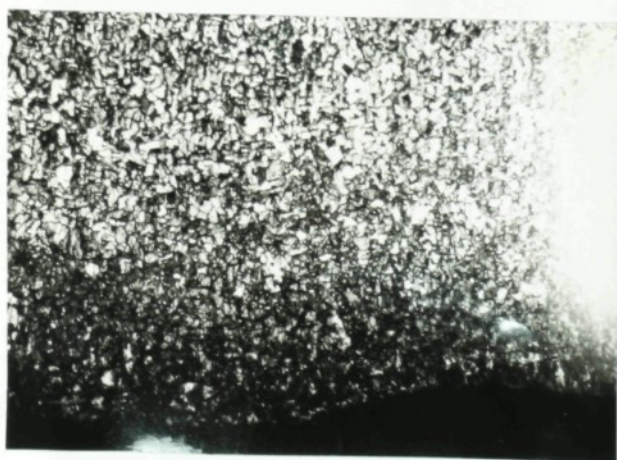
Obr. 3 - 14 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 13-tl.6mm)



Nital

250 x

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



Nital

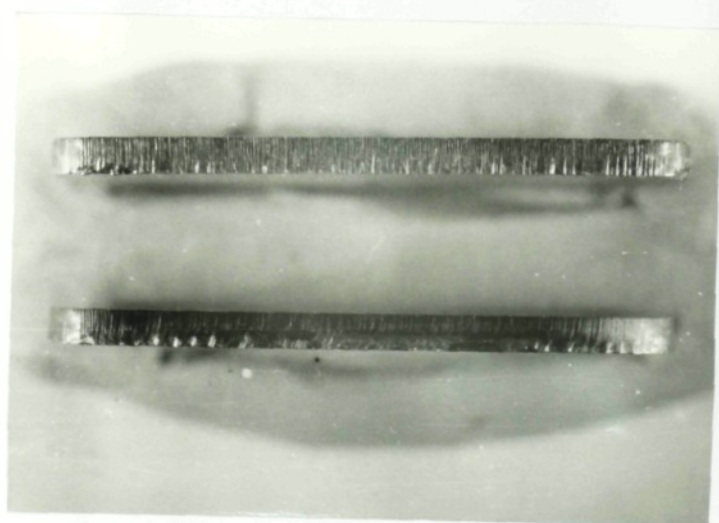
100 x

Obr. 3 - 16 Struktura ovlivněné oblasti (vzorek 15-tl.6mm)

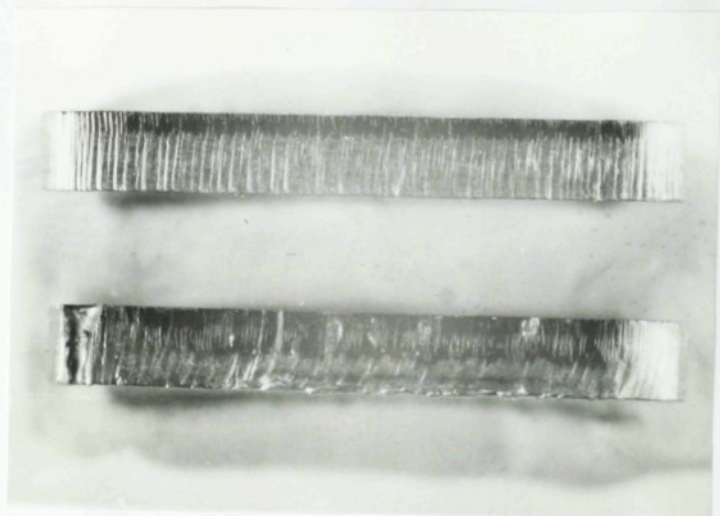
3.4.6 Pozorování vzniklých otřepů

Pro komplexní posouzení sledované problematiky bylo provedeno pouze orientační pozorování vzorků, které po laserovém ozáření vykazovaly otřep na spodní části řezné hrany vzorku.

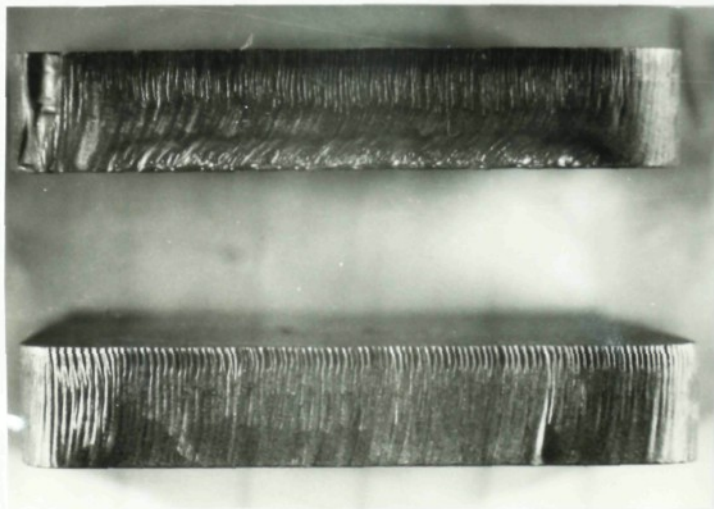
Na obr. 3 - 17 až 3 - 23 jsou uvedeny pohledy na sledované vzorky s otřepy. Na každém obrázku je vedle vzorku s otřepem uveden vzorek s nejkvalitnějším povrchem řezu příslušné skupiny vzorků. Popis obrázků je proveden tak, že označení v závorce odpovídá popisu od zhora dolů. Dále na obr. 3 - 23 jsou zachyceny vzorky všech řad s nejkvalitnějším povrchem řezu.



Obr. 3 - 17 Pohled na hrany řezu (vzorky 11,16-tl.2mm)



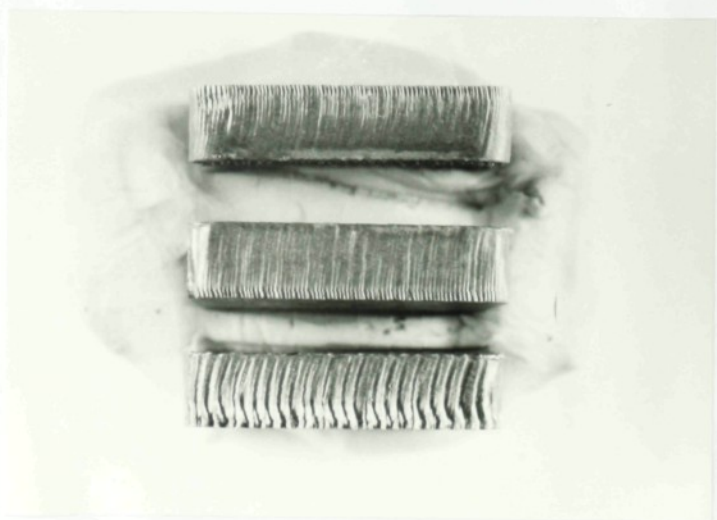
Obr. 3 - 18 Pohled na hrany žezu (vzorky 13,17-tl.4mm)



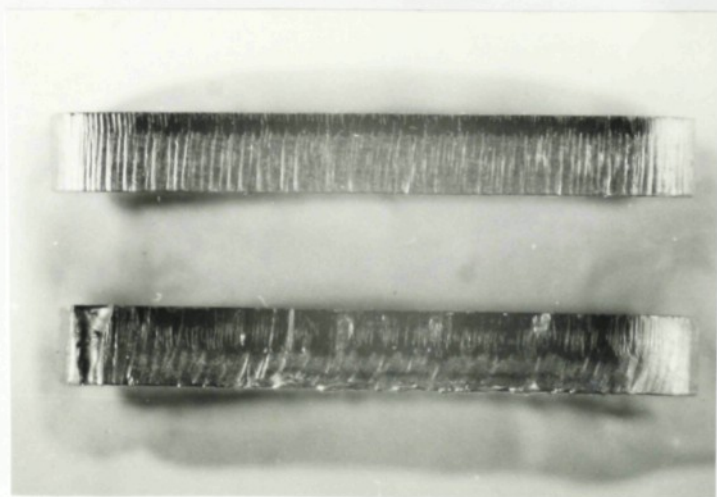
Obr. 3 - 19 Pohled na hrany žezu (vzorky 15,12-tl.6mm)



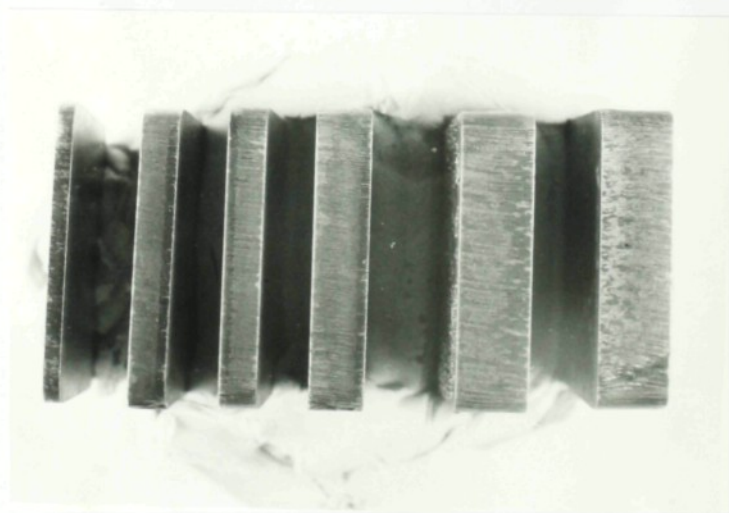
Obr. 3 - 20 Pohled na hrany řezu (vzorky 13,15-tl.8mm)



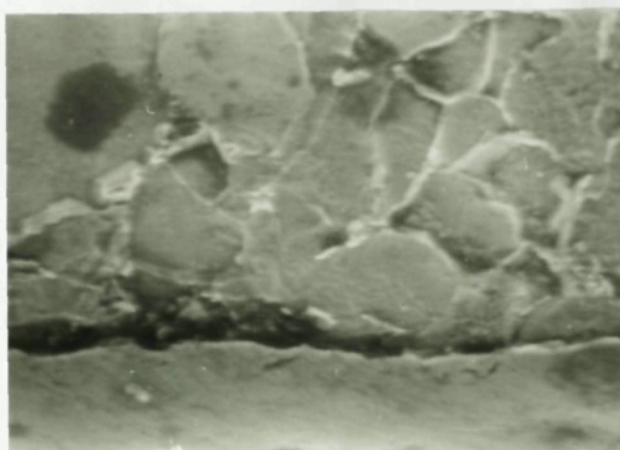
Obr. 3 - 21 Pohled na hrany řezu (vzorky 21,22,26-tl.8mm)



Obr. 3 - 22 Pohled na hrany žezu (vzorky 34,31-tl.4mm)



Obr. 3 - 23 Pohled na vzorky s nejkvalitnějšími hranami žezu
(zleva do prava tloušťka tl. 2mm - vz. 13; tl. 4 mm - vz. 11,
34; tl. 6 mm - vz. 12; tl. 8 mm - vz. 22,13)



REM

680 x

Obr. 3 - 24 Pohled na vzorek 14 - tl. 4 mm (rozhraní mezi zpevněnou a přechodovou oblastí)

3.5 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ

Vyhodnocením výše uvedených materiálových charakteristik vzorků plechů ČSN 11 373 ozářených laserem bylo získáno široké spektrum výsledků sledovaných veličin.

Příslušné veličiny však nebyly statisticky vyhodnoceny, neboť pro ozáření vzorků bylo použito poměrně velké množství různých proměnných parametrů laserového záření. Tím získané výsledky nedovolují možnost jejich kvalitního srovnání. Proto byla snaha o stanovení důležitého základního materiálového parametru sledovaných plechů. S touto úvahou byly hodnoceny následující charakteristiky ozářeného materiálu.

Uvedené výsledky jsou v příloze č. 1 až 6.

3.5.1 Šířka řezu

Šířka řezu resp. řezné spáry byla stanovena u všech 35 ozářených vzorků.

U vzorků, kdy proměnnou byla rychlost posuvu (tj. vzorky, jejichž označení začíná číslem 1) se ve většině případů s rostoucí rychlostí posuvu šířka řezu zmenšovala.

Pokud sledujeme vzorky tl. 6 a 8, 2 a 4 mm, které byly ozářeny srovnatelnými parametry LZ, je možno konstatovat, že u vzorků tl. 6 a 8 mm (kde $P = 2,5 \text{ kW}$; $p = 1 \text{ bar}$; $F = 1200 \text{ mm/min}$) je šířka řezu při tl. plechu 8 mm větší o 0,048 mm; tj. o 8 % více než při tloušťce 6 mm. Naopak ve druhém případě, u vzorku tl. plechů 2 a 4 mm je při tl. 4 mm menší šířka řezu o 0,013 mm; tj 3 %.

U vzorků tloušťky 4 mm, kde proměnnou byl výkon LP, se zvyšujícím se výkonem se šířka řezu zvětšovala. S přírůstkem výkonu o 1000 W se šířka řezu zvětšila o 0.048 mm, což je téměř o 10 % původní hodnoty. Vzhledem k tomu, že se snažíme přesně o pravý opak tj. o zmenšování šířky řezu, postačuje pro řezání plechů tl. 4 mm výkon 1500 W. Obdobná situace nastala také u vzorků tl. 8 mm, kde proměnnou byl tlak pomocného plynu. Se zvyšujícím se tlakem šířka řezu rostla. S přírůstkem tlaku o 0.8 baru se šířka řezu zvětšila o 0.296 mm, což je zhruba o 50 % původní hodnoty.

V této souvislosti je třeba uvést, že tyto výsledky je třeba brát jako velmi informativní, neboť pro dostatečné zhodnocení dané procesu je třeba provést větší množství stejných experimentů.

Dále k výše uvedeným hodnotám je nutno poznamenat, že

jsou výsledkem měření sice velmi přesným přístrojem , avšak z technického hlediska , z hlediska reprodukovatelnosti výsledku jejich kontroly , je možné počítat s hodnotami na tisícinu milimetru, spíše pouze setiny.

3.5.2 Výsledky drsnosti

Pokud zhodnotíme střední aritmetickou úchylku drsnosti povrchu řezu R_a je možno konstatovat, že s rostoucí rychlostí posuvu LZ a konstantním výkonu i pracovním tlaku plynu se drsnost povrchu řezu snižuje.

Pokud se týká tl. 8 mm při parametrech LZ ($P = 2,5$ kW; $p = 1$ bar), pak např. při rychlosti posuvu 1100 mm/min byla získána nejvyšší hodnota R_a , která činí 11 μm . Tato hodnota je ze všech měření nejvyšší. Při tl. 8 mm a rychlosti 1400 mm/min ($P = 2,5$ kW; $p = 1$ bar) byla zjištěna hodnota R_a 6 μm . U vzorků tl. 6 mm při parametrech LZ ($P = 2,5$ kW; $p = 1$ bar) byly zjištěny při rychlosti 1200 až 2000 mm/min hodnoty R_a drsnosti 3,1 do 7,0 μm . Nejnižší hodnota odpovídá nejvyšší rychlosti posuvu laserového záření.

Uvedené hodnoty R_a jsou srovnatelné s drsnostmi R_a dosažitelnými při běžném obrábění (jemné hoblování, popř. čelní frézování).

U tl. 4 mm při parametrech LZ ($P = 2,0$ kW; $p = 1$ bar), kde rychlost posuvu je od 1200 do 2400 mm/min se hodnoty drsností R_a pohybují od 1,45 do 3,20 μm . Z výsledků však není patrná jednoznačná rostoucí, či klesající posloupnost naměřených hodnot drsnosti s měnící se rychlostí posuvu LZ. Tak např. při rychlosti posuvu 2000 mm/min byla dosažena

nejmenší drsnost $R_a = 1,45 \text{ } \mu\text{m}$, avšak při vyšších rychlostech nad tuto hranici se hodnota R_a mírně zvyšuje.

Při tl. 2 mm, kde byly použity parametry LZ ($P = 1,5 \text{ kW}$; $p = 1 \text{ bar}$) při rychlosti posuvu 1500 až 4000 mm/min hodnoty R_a činí 3,05 až 2,20 μm . Při nižší rychlosti posuvu je drsnost vyšší. Od rychlosti 3000 mm/min se hodnota R_a ustálila na 2,20 μm .

Pokud sledujeme hodnoty R_a v závislosti na změně tlaku pomocného plynu při parametrech LZ ($P = 2,5 \text{ kW}$; $F = 1200 \text{ mm/min}$) a tl. 8 mm, pak je z výsledků patrné, že s vyšším tlakem pomocného plynu se drsnost pohybuje od 2,40 do 13,75 μm . Avšak hodnota R_a 2,40 μm byla stanovena při tlaku pomocného plynu 0,7 baru, což není dolní mezní hodnota tlaku. Hodnota $R_a = 13,75 \text{ } \mu\text{m}$ byla zjištěna při tlaku 1,4 baru.

Z uvedených výsledků R_a , které byly stanoveny u vzorku tl. 4 mm se změnou výkonu LP při konstantní rychlosti posuvu 2000 mm/min a $p = 1 \text{ bar}$, je zřejmé, že hodnoty R_a jsou od 1,85 do 2,90 μm . Uvedené hodnoty nevykazují jednoznačnou rostoucí, či klesající tendenci. Nejmenší hodnota R_a byla stanovena při výkonu $P = 2,25 \text{ kW}$ a nejvyšší při $P = 2 \text{ kW}$.

3.5.3 Hodnoty mikrotvrdomosti

Jak bylo uvedeno, hodnoty mikrotvrdomosti byly sledovány jen u některých vzorků (tl. 4 až 6 mm).

V této souvislosti je třeba uvést, že nejbližší možný vtisk mikrotvrdomosti byl proveden ve vzdálenosti 0,01 mm od hrany sledovaného řezu vzorku. Ve většině případů však vzdálenost byla větší.

Z dosažených výsledků naměřených hodnot mikrotvrdosti je patrné, že povrchová vrstva vykazuje zvýšení tvrdosti. Průběh hodnot mikrotvrdostí výše uvedených vzorků je patrný z grafických závislostí (mikrotvrdost - vzdálenost), které jsou uvedeny v kapitole " Grafické záznamy experimentů ". Ze zjištěných hodnot je možno konstatovat, že hodnoty mikrotvrdosti se s rostoucí hodnotou posuvu LZ, resp. materiálu se snižují.

Nejvyšší hodnota mikrotvrdosti ze všech měřených vzorků byla stanovena u vzorku 11 - tl. 6 mm ve vzdálenosti od hrany řezu 0,03 mm a činí 567,3 $HV_{0,2}$ (při parametrech LZ $P = 2,5$ kW; $p = 1$ bar; rychlost posuvu 1200 mm/min). U vzorků tl. 6 mm, kdy se zvyšovala rychlost posuvu byl zaznamenán i pokles mikrotvrdosti ve srovnatelné vzdálenosti od hrany řezu.

S určitou analogií je možno přijímat i hodnoty mikrotvrdosti ve větších vzdálenostech od hrany řezu.

S podobnými poznatky lze hodnotit i mikrotvrdost u vzorků tl. 4 mm. Nejvyšší hodnota $HV_{0,2}$ byla stanovena u vzorku 17 při parametrech LZ ($P = 2,0$ kW; $p = 1$ bar; $F = 2400$ mm/min). Tato hodnota činí 529,6 $HV_{0,2}$. U vzorků 14 a 11, kdy byla použita menší rychlost posuvu (1800 a 1200 mm/min) byla též zjištěna nižší hodnota $HV_{0,2}$ v nejbližších místech hrany řezu. Tato hodnota činí 543,2 a 467,1 $HV_{0,2}$.

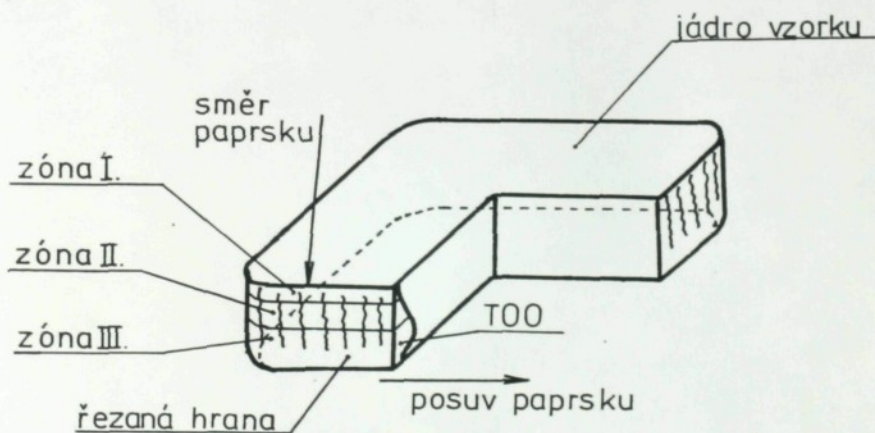
3.5.4 Charakteristika struktury a šířky T₀₀

Mezi velmi důležitý parametr materiálové charakteristiky ozářených vzorků se řadí šířka tepelně ovlivněné oblasti. Tato oblast úzce souvisí i s její strukturou a již uvedenou mikrotvrdostí. Současně je třeba poznamenat, že se

vzrůstající vzdáleností od hrany, kde paprsek laseru začal řezání materiálu se oblast T00 na vnitřní oddělené části (jádro) vzorku zvětšovala jak je schematicky zakreslen na obr. 3 - 25.

U sledovaných vzorků tl. 4 a 6 mm použitých již při měření mikrotvrdosti a následně upravených dle kapitoly 3.4.4, byla sledována tloušťka zpevněné a ovlivněné oblasti.

Pozn. Pod pojmem T00 rozumíme zpevněnou a přechodovou oblast. U vzorků tl. 4 mm bylo zjištěno, že s rostoucí rychlostí velikost zpevněné oblasti klesá. Při nejmenší rychlosti 1200



Obr. 3 - 25 Schéma výřezu ozařovaného vzorku s vyznačeným průběhu a hloubky T00

mm/min ($P = 2,0 \text{ kW}$; $p = 1 \text{ bar}$) byla velikost zpevněné oblasti 0,1 mm. Při nejvyšší rychlosti 2400 mm/min při stejných parametrech LZ byla tloušťka zpevněné oblasti nejmenší 0.02 mm.

U vzorků tl. 6 mm bylo též zjištěno, že s rostoucí

rychlostí tloušťka zpevněné oblasti klesá. Při nejmenší rychlosti 1200 mm/min ($P = 2,5$ kW; $p = 1$ bar) velikost zpevněné oblasti je 0.02 mm.

Při nejvyšší rychlosti LZ 2000 mm/min při ostatních stejných parametrech jako v předchozím případě, velikost zpevněné oblasti byla 0.01 mm.

Ze získaných výsledků je patrné, že nejvyšší hodnota tloušťka zpevněné oblasti tj. 0.03 mm neodpovídá nejvyšší použité rychlosti (2000 mm/min), ale rychlosti 1600 mm/min.

Na obr 3 - 5 až 3 - 16 je uvedena struktura zpevněné oblasti jak byla zjištěna u příslušných vzorků ocelového plechu ČSN 11 373.1 po jejich ozáření laserem.

Přechodem mezi zpevněnou povrchovou vrstvou a základním materiálem tvoří přechodová ovlivněná oblast. Tato oblast dosahuje větších rozměrů než zpevněná. Opět se vzrůstající rychlostí se velikost přechodové oblasti zmenšuje. U vzorků tloušťky 4 mm při sledování všech velikostí oblastí vyplývá, že s rostoucí rychlostí se velikost přechodové oblasti s rostoucí rychlostí snižovala nerovnoměrně. Jak je patrné z přílohy č. 5.

U vzorků tl. 6 mm se také přechodová oblast s rostoucí rychlostí LZ zvětšovala. Zde byly sledovány tři vzorky. Při rychlosti posuvu 1200 mm/min je velikost přechodové oblasti 0.15 mm. Při použité rychlosti posuvu 1600 a 2000 mm/min byla velikost této oblasti stejná a to 0.13 mm.

Struktura přechodové oblasti postupně přechází do základního materiálu tvořeného feritickou strukturou.

3.5.5 Vyhodnocení úhlu rozevření řezné spáry

Hodnoty úhlů rozevření řezné spáry jsou malé pro všechny typy uvedených experimentů a pohybují se od 0,00002 do 3,9827 stupňů. Nejnížší hodnota úhlu rozevření (úkosu hrany řezu) byla stanovena u experimentu tl. plechu 4 mm u vzorku č. 15 ($P = 2000$ W; $p = 1$ bar; $F = 2000$ mm/min). Nejvyšší hodnota byla zjištěna u tl. plechu 2 mm , vzorek č. 12 ($P = 1500$ W; $p = 1$ bar; $F = 2000$ mm/min).

Z výsledků není patrná jednoznačnost působení LZ na velikost sledovaného úhlu. Ve většině případů velikost tohoto úhlu nepřekročila hodnotu 1,5 stupně (výjimku tvořily vzorky plechu tl. 2 mm s proměnnou rychlostí posuvu). Dle mého názoru lze vysvětlit tuto výjimku tím, že výkon 1500 W, který byl použit pro řezání plechu tloušťky 2 mm, byl vysoký.

Pokud se týká rozevření řezné spáry (jak je v tabulkách přílohy č. 6 označeno písmenem P - pozitivní; N - negativní), lze konstatovat, že u tl. plechu 2 mm, při proměnné rychlosti posuvu je tento parametr u všech sledovaných vzorků pozitivní.

Naproti tomu všechny vzorky tl. 3 mm s proměnnou rychlostí LZ vykazovaly negativní rozevření řezné spáry.

U vzorků tl. 4 a 6 mm není druh rozevření řezné spáry jednoznačný. U nižších rychlostí LZ se projevuje více pozitivní druh, naopak při vyšších rychlostech LZ negativní.

Vycházíme-li z toho , že optimální řez je veden kolmo na řezaný materiál, pak z naměřených hodnot pro jednotlivé

tloušťky lze vybrat vzorky s nejmenším úhlem rozevření řezné spáry.

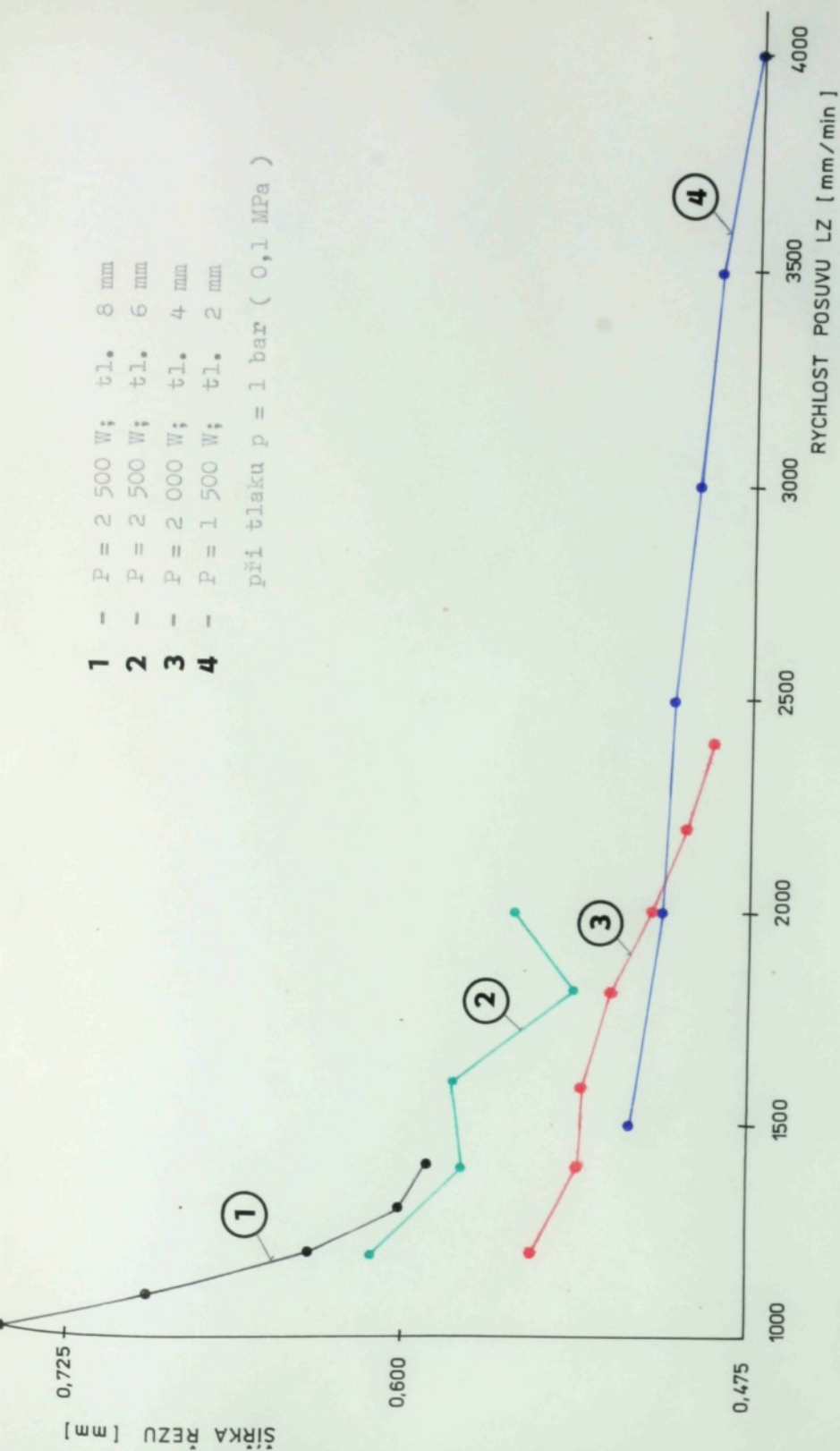
U vzorků s proměnnou rychlostí posuvu : tl. plechu 2 mm vzorek č.16 ($P = 1500 \text{ W}$; $p = 1 \text{ bar}$; $F = 4000 \text{ mm/min}$) kde úhel rozevření byl 0.61012 stupně; u tl. plechu 4 mm již popsany vzorek č.15 ; u tl. 6 mm vzorek č.11 ($P = 2500 \text{ W}$; $p = 1 \text{ bar}$; $F = 1200 \text{ mm/min}$) kde úhel rozevření byl 0.11602 stupně; u tl. 8 mm vzorek č.11 ($P = 2500 \text{ W}$; $p = 1 \text{ bar}$; $F = 1000 \text{ mm/min}$) kde úhel rozevření byl 0.39963 stupně.

U vzorků s proměnným tlakem pomocného plynu : tl. plechu 8 mm vzorek č.21 ($P = 2500 \text{ W}$; $p = 0.6 \text{ bar}$; $F = 1200 \text{ mm/min}$) kde úhel rozevření byl 0.32408 stupně.

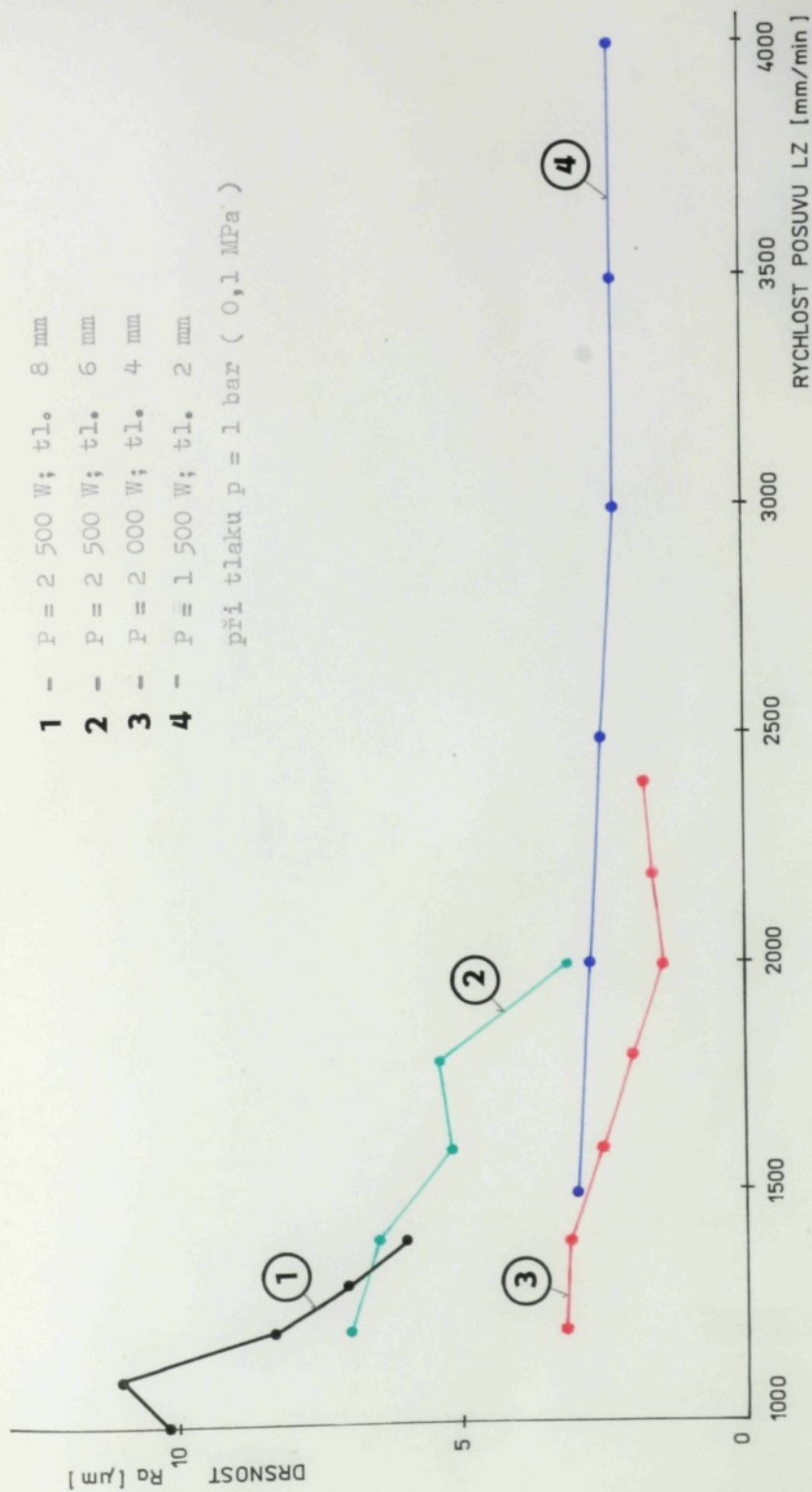
U vzorků s proměnným výkonem LP : tl. plechu 4 mm vzorek č.33 ($P = 2000 \text{ W}$; $p = 1 \text{ bar}$; $F = 2000 \text{ mm/min}$) kde úhel rozevření byl 0.0222 stupně.

Celkově lze konstatovat, že s klesající tloušťkou plechu se negativní druh rozevření mění v pozitivní.

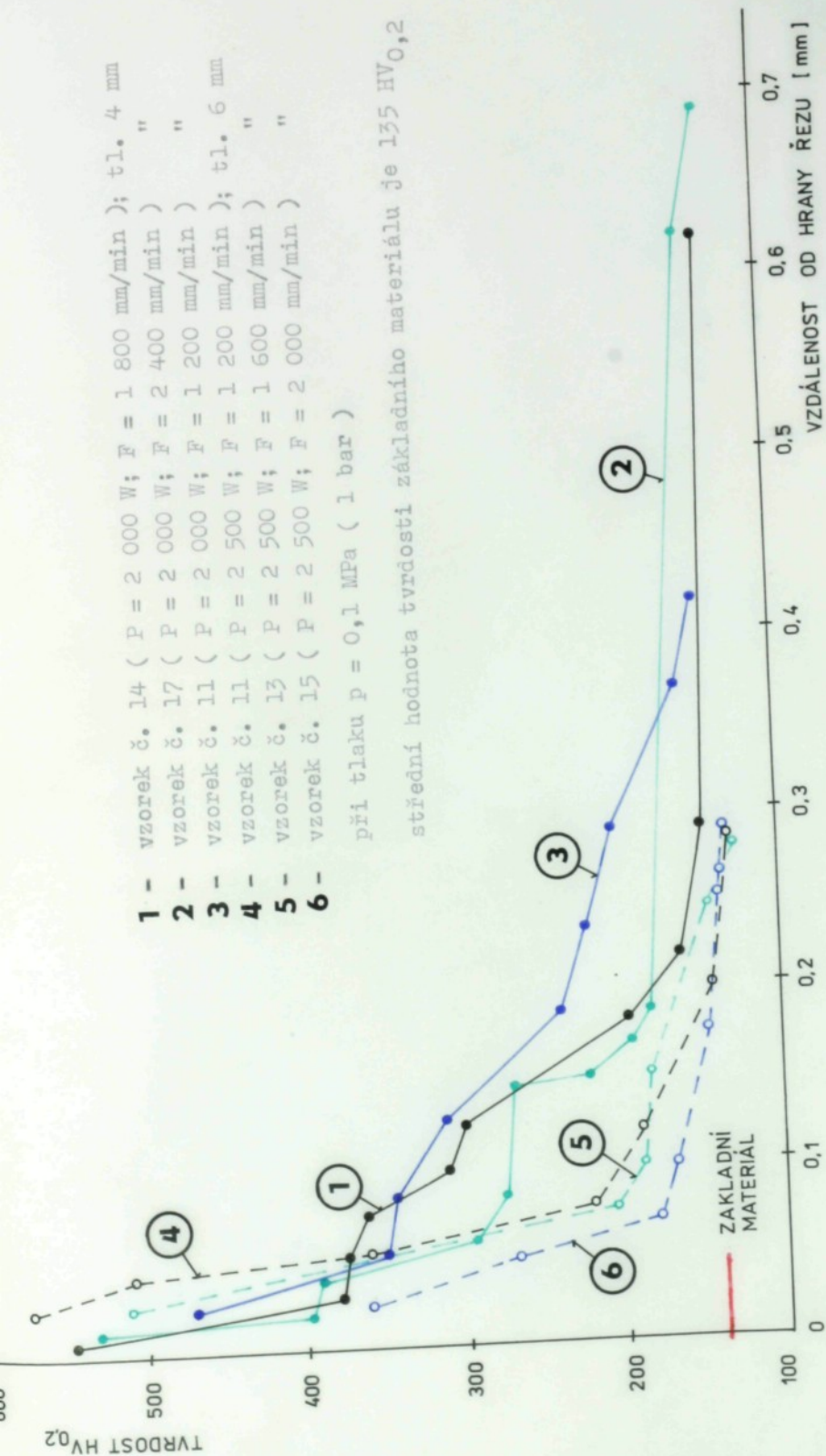
Na obr. 3 - 26 a 3 - 28 jsou uvedeny závislosti nejdůležitějších parametrů hodnotících kvalitu interakce LZ s ocelovými plechy 11 373.1 o různých tloušťkách.



Obr. 3 - 26 Závislost šířky řezu na posuvu laserového záření při řezání ocelového plechu 11 373.1 laserem



Obr. 3 - 27 Závislost drsnosti řezu na posuvu laserového záření při řezání ocelového plechu 11 373.1 laserem



Obr. 3 - 28 Závislost mikrotvrdosti ocelového plechu 11 373.1 na rychlosti posuvu laserového záření při řezání laserem

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky, které byly v této práci získány přinášejí do technologie řezání ocelových plechů ČSN 11 373 další informace pro kvalitativní i kvantitativní rozhodování a uvědomělé řízení při uplatňování tohoto procesu v technické praxi.

Obecně lze řezání ocelových plechů laserovým paprskem charakterizovat jako proces, který (kdyby se to vůbec podařilo) je popsán polyvariantní funkcí, jejíž parametry jsou vzájemně složitě vázány. S takovými úvahami je nutno přijímat i aplikovat poznatky a dosažené výsledky, které je možno rozdělit do těchto oblastí:

1) Výsledky, které jsou obsaženy v této práci je třeba chápat do jisté míry jako informativní. To souvisí s tím, že bylo provedeno na jedné straně poměrně velké množství vzorků (35), avšak každý alespoň trochu odlišným laserovým parametrem. V této souvislosti je třeba připomenout, že určení velikosti parametrů při ozáření laserem ani určení množství vzorků nebylo předmětem řešení této diplomové práce.

Dále je třeba uvést, že zadání této problematiky navazuje na poznatky pracovníků katedry KMT, kteří se v minulosti zabývali fázovými přeměnami ocelí a litin při ozáření CO_2 laserem.

Záměrem této práce bylo vytvořit základní přehled o vlivu laserového záření na řezání ocelových plechů ČSN 11 373.1 různých tloušťek. Lze předpokládat, že řešení této problematiky se na základě poznatků obsažených v této diplomové práci bude dále rozvíjet.

Současně je nutno připomenout, že tento velký rozptýl parametrů záření bez jeho opakování neumožnil statistického vyhodnocení získaných výsledků.

Přes uvedené nedostatky i možnost malé provázanosti získaných výsledků sledovaných materiálových parametrů (šířka řezu, mikrotvrdość, struktura, otřep) při určitých podmínkách laserového záření, lze spatřovat přínos DP v získání přehledu o sledované problematice i vytvořené metodice při vyhodnocování ozářených vzorků.

2) Pokud se týká porovnání dosažených výsledků s výsledky literárně publikovanými je třeba upozornit, že publikovaná problematika často neobsahuje potřebné informace, pouze konstatuje jaký byl použit výkon laseru, rychlost posuvu a často neuvádí materiálové charakteristiky ozářeného materiálu. To lze vysvětlit tím, že autory pravděpodobně více zajímaly parametry, hodnotící materiál z hlediska obrábění. Problematikou řezání kovů laserovým paprskem se nejvíce ze zahraničních autorů zabývali KOVALENKO, ROMANĚNKO, OLEŠUK [8], kteří zkoumali především povrch řezu a produktivitu řezání laserem. Z jejich výsledků však není patrný druh uhlíkové oceli, na které výzkum prováděli ani další potřebné údaje, které by bylo možné srovnat s dosaženými výsledky těchto experimentů.

Též i publikace KOVALENKA [7] rozebírá problematiku řezání různých druhů materiálů (hliníku, titanu, nerezavějící oceli) laserem. Ani z této publikace nevyplývají ucelené údaje o sledované problematice.

Z našich autorů tuto problematiku publikovali např.

URBÁNEK [9], ŠIMAN [3], KUBÁTOVÁ [9] a VEJROSTKA [10].

Provede-li se shrnutí výsledků experimentálního výzkumu procesu řezání materiálu, lze konstatovat, že tento proces charakterizují tyto parametry:

a) Na rozsah změn šířky řezu má největší vliv u uhlíkové oceli rychlost řezání, dále tlak plynu.

b) Rozměry T00 závisí na rychlosti řezání, tloušťce materiálu a tlaku plynu u uhlíkové oceli. U vzorků větších tloušťek (8 mm) se při vysoké rychlosti řezání objevují změny barvy povrchu materiálu.

c) Drsnost povrchu řezu závisí na rychlosti řezání, a v menším měřítku na tlaku plynu. V mezích sledovaných režimů pro vzorky malé tloušťky je drsnost obvykle stejná kdekoli v řezu, ale u tloušťek větších jak 2 mm, můžeme objevit několik zón s různou drsností. U všech zkoumaných vzorků je možné prokázat význam některých rychlostí, při kterých je drsnost povrchu minimální. Drsnost povrchu řezu byla největší u vzorků s proměnným tlakem pomocného plynu, což dle mého názoru souvisí se zvýšením oxidačních účinků při laserovém pálení a vlivem přídavného exotermického reakčního tepla způsobující nepravidelné přehřívání a vytrhávání částic materiálu z povrchu řezu.

d) Při řezání uhlíkové oceli množství otřepů závisí na rychlosti a tlaku pomocného plynu. Při řezání byl otřep asymetricky rozložený na spodní straně řezné hrany. Největší množství vytvořeného otřepu bylo pozorováno při řezání vzorků tloušťky 8 mm s proměnným tlakem pomocného plynu.

e) Optimální podmínky obrábění závisí na tom, co je přednostnější - zda největší produktivita řezání při nízké kvalitě řezu, nebo největší kvalita řezu při nesrovnatelně menší produktivitě.

f) Experimentální 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.

Pokud se týká charakteristiky struktury materiálu literární prameny nedefinují strukturu ovlivněné oblasti v místě řezu. To lze vysvětlit tím, že tento parametr z hlediska obrábění přímo necharakterizuje kvalitu řezné plochy.

Domnívám se, že při komplexním pohledu na sledovanou problematiku je nutné i přesně analyzovat strukturu ovlivněné oblasti.

V této souvislosti bych chtěl vyslovit názor, že její stanovení není jednoduché. Po prostudování celé této problematiky včetně úvahy o možnosti odvodu resp. rozvodu tepla z místa řezu i s ohledem na výchozí typ nízkouhlíkové oceli, jež sledovaný materiál tvoří, se domnívám, že struktura ovlivněného materiálu v blízkosti řezu je tvořena nízkouhlíkovým martenzitem.

Tuto úvahu by mohly podpořit hodnoty naměřené tvrdosti $\text{HV}_{0.2}$ ve vzdálenosti od hrany řezu $0.01 \mu\text{m}$, které jsou $540 \text{ HV}_{0.2}$. Též orientačně změřená tvrdost na povrchu vyříznutého vzorku, která je $550 \text{ HV}_{0.2}$, toto tvrzení potvrzuje.

Pokud by v příštích výzkumech bylo potvrzeno, že tato

vrstva je tvořena nízkouhlíkovým martenzitem, pak je i vhodné zavádět termín zpevněná vrstva. Detailní záběr vrstvy při 680 násobném zvětšení je patrný na obr. 3 - 24.

Hodnotíme-li efekt zpevňování přilehlých vrstev k řezaným plochám, je možné konstatovat velké zpevňování materiálu až do určitých hloubek. Studium tohoto problému se zabývá současně zpracovávaná DP a proto jsem se těchto otázek dotknul jen částečně. Zpevňování je bezpochyby způsobeno vznikem nízkouhlíkového martenzitu a dále zpevňujících procesů souvisejících se vznikem a hromaděním dislokací v těchto místech, kterým se vysvětluje určité zpevňování, které vzniká i u chemicky čistých kovů.

K nejdůležitějším parametrům laserového záření, jak jsou patrné z obr. 3 - 26 až 3 - 28, lze konstatovat, že dosažené výsledky korespondují s teoretickými předpoklady. Tak např. s rostoucí rychlostí posuvu LZ se snižuje hodnota šířky řezu i při klesající tloušťce materiálu. Téměř analogicky se chová drsnost povrchu řezu. Použitý druh grafu (spojnicový) je postačující pro vyhodnocení zjišťovaných závislostí.

Při pozorování mikrotvrdosti ovlivněné oblasti, lze konstatovat, že s rostoucí rychlostí LZ se zmenšuje šířka ovlivněné oblasti. Tato oblast se vyznačuje vyšší hodnotou tvrdosti cca nad 400 HV_{0,2}.

Závěrem bych chtěl připomenout, že pro měření mikrotvrdosti byla použita zóna II, která je popsána v kapitole 2.3.1. To lze vysvětlit tím, že při malých rychlostech řezání jsou charakteristické výrůstky reliéfu obrobeného povrchu většinou na normálách k hraně povrchu. Ale

se vzrůstající rychlostí vzniká náklon těchto výrůstků a i úhel náklonu je postupně vyšší. Výrůstky se naklání na stranu, položenou proti směru pohybu LP. A stupeň odklonění je vyšší v nižší části řezu. To je možné vysvětlit snížením specifické laserové energie a možná nedostatkem kyslíku v této oblasti řezu při vysoké rychlosti řezání, v důsledku čehož se roztavený materiál odstraňuje ze zóny obrábění nedostatečně efektivně. To poslední způsobuje vytváření přetoků (otřepů), které se roztékají na nižších okrajích řezu. A to vyvolává přehřívání otřepů řezu a tím hoření materiálu v této oblasti řezu. To také potvrzuje zvětšování T_{00} v nižší části řezu při vyšší rychlosti řezání. V této oblasti se hodnoty mikrotvrdosti jeví jako optimální.

5. ZÁVĚR

Předložená diplomová práce, zpracovaná na téma: Jakost řezu při řezání laserem - ovlivnění parametry řezání.

Předmětem výzkumu bylo řezání materiálu ČSN 11 373.1 kontinuálním CO₂ laserem, s cílem rozšíření znalostí a vzájemné vazby technologických parametrů a jejich vliv na jakost řezu i produktivitu práce.

Na základě výše uvedených výsledků vlastní experimentální práce je možno vyslovit následující závěry.

a) při řezání uvedeného materiálu se projevuje významně zpevňování přilehlých povrchových vrstev k ploše řezu. Zvýšená tvrdost povrchu byla naměřena až do hodnoty 567 HV_{0.2} a bylo prokázáno, že zpevnění i tloušťka zpevněných vrstev jsou velmi závislé zejména na rychlosti posuvu LP (resp. materiálu) a tloušťce použitého materiálu. S rostoucí rychlostí posuvu LP a tloušťkou materiálu tvrdost povrchu řezu klesá.

Lze očekávat, že při některých parametrech řezání bude toto zpevnění tak významné, že by mělo být zohledněno při obrábění.

U všech vzorků bylo patrné, že směrem do hloubky hodnota mikrotvrdosti poměrně rovnoměrně klesá až k hodnotám základního materiálu (cca 135 HV_{0.2}).

b) Z naměřených hodnot experimentu je patrné, že jakost řezu je na změně rychlosti posuvu LP, tlaku pomocného plynu a výkonu LP závislá.

Bylo též prokázáno, že na řezu vznikají tři oddělené oblasti, které se liší drsností povrchu. U tenkých materiálů asi do dvou milimetrů tyto oblasti již splývají a výrazně se neodlišují. Drsnost v těchto oblastech se snižuje s rostoucí rychlostí a naopak s tlakem pomocného plynu roste. V některých případech hodnoty drsnosti odpovídají hodnotám, které lze získat při klasických metodách obrábění, avšak z hlediska dalších parametrů LZ je kvalita těchto vzorků nevyhovující.

c) Při řezání vzorků zejména větších tloušťek roztavený materiál stéká a vyfukován přetlakem vytváří větší nebo menší výronky (otřepy), jejichž výskyt je velmi závislý na tlaku pomocného plynu popř. výkonu LP.

Ze všech vzorků pro kvalitativní řezání jsou vyhovující:
s proměnnou rychlostí posuvu:

u tloušťky 2mm	vzorek č. 11,12,13
4mm	vzorek č. 11,12,13
6mm	vzorek č. 11,12,13
8mm	vzorek č. 13,14

s proměnným tlakem pomocného plynu:

u tloušťky 8mm	vzorek č. 22,23
----------------	----------------------

s proměnným výkonem LP:

u tloušťky 4mm	vzorek č. 35,34
----------------	----------------------

Nevyhovující :

u tloušťky 2mm	vzorek č. 16
4mm	vzorek č. 17
6mm	vzorek č. 15
8mm	vzorek č. 15

s proměnným tlakem pomocného plynu:

u tloušťky 8mmvzorek č. 21

s proměnným výkonem LP:

u tloušťky 4mmvzorek č. 31

d) Experimenty bylo zjištěno, že šířka řezu také závisí na parametrech opracování, zejména na rychlosti posuvu LP a tlaku pomocného plynu. U materiálů s menší tloušťkou bylo prokázáno, že řez neprobíhá kolmo k hraně řezaného materiálu, ale vybočuje o úhel α , který je závislý na rychlosti posuvu. U materiálu od tloušťky čtyř milimetrů je odchýlení řezu nepatrné.

e) Komplexní vyhodnocení všech parametrů kvality řezu sledovaných tloušťek ocelových plechů 11 373.1 ukazuje, že pro kvalitativní řezání plechů jednotlivých tloušťek (2, 4, 6, 8 mm), je důležité vymezení jejich priority. Tato priorita úzce souvisí s výsledky analýzy experimentu.

Na základě analýzy pozorovaných experimentálních zkoušek je možné zformulovat některá doporučení pro výběr optimálních režimů řezání. Přitom vycházíme ze sledování toho, jaké požadavky se předkládají - nejvyšší možná rychlost řezu a následně nejvyšší produktivita nebo řez s nejvyšší kvalitou řezu (nejmenší drsnost a minimální množství otřepů, ale s vysokými náklady). V prvním případě bude šířka řezu minimální (stejně jako rozměry T00), ale drsnost povrchu řezu a množství otřepů bude vysoké. V druhém případě rychlost řezu bude menší oproti maximálně možné, a šířka řezu i rozměry T00 porostou. Naměřené hodnoty v DP dovolují udělat představu o

optimálních parametrech a to z jednoho i z druhého hlediska.

Z hlediska dosažených výsledků experimentu, o které má zájem i firma Laser - Tech. s.r.o., která též část programu financovala, možno uvést konkrétní optimální parametry řezání.

Pro kvalitativní posouzení procesu lze doporučit prioritu parametrů kvality řezu v tomto pořadí :

- 1) drsnost řezu
- 2) šířka řezu
- 3) tvorba otřepů popř. mikrotvrdost

Na základě analýzy výsledků experimentu lze doporučit následující parametry LP pro kvalitativní řezání ocelových plechů 11 373.1 tloušťek 2, 4, 6, 8 mm :

při změně rychlosti posuvu LP :

- | | |
|----------------------|---------------------------------------|
| tl. 2 mm (vz. č. 12) | - P = 1500W; p = 1bar; F = 2000mm/min |
| tl. 4 mm (vz. č. 13) | - P = 2000W; p = 1bar; F = 1600mm/min |
| tl. 6 mm (vz. č. 12) | - P = 2500W; p = 1bar; F = 1400mm/min |
| tl. 8 mm (vz. č. 14) | - P = 2500W; p = 1bar; F = 1300mm/min |

při změně tlaku pomocného plynu :

- | | |
|----------------------|---|
| tl. 8 mm (vz. č. 22) | - P = 2500W; p = 0.7bar; F = 1200mm/min |
|----------------------|---|

při změně výkonu LP :

- | | |
|----------------------|---------------------------------------|
| tl. 4 mm (vz. č. 34) | - P = 2250W; p = 1bar; F = 2000mm/min |
|----------------------|---------------------------------------|

Pro vysokoproduktivní způsob řezání lze doporučit prioritu parametrů řezu v tomto pořadí :

- 1) rychlost posuvu materiálu, ekonomičnost provozu (tzn.

nejmenší možný výkon a tlak pomocného plynu)

2) šířka řezu

3) tvorba otřepů

Na základě analýzy výsledků experimentu lze doporučit následující parametry LP pro vysokoproduktivní způsob řezání plechů 11 373.1 tloušťek 2, 4, 6, 8 mm :

při změně rychlosti posuvu LP :

tl. 2 mm (vz. č. 15) - P = 1500W; p = 1bar; F = 3500mm/min

tl. 4 mm (vz. č. 16) - P = 2000W; p = 1bar; F = 2200mm/min

tl. 6 mm (vz. č. 14) - P = 2500W; p = 1bar; F = 1800mm/min

tl. 8 mm (vz. č. 15) - P = 2500W; p = 1bar; F = 1400mm/min

při změně tlaku pomocného plynu :

tl. 8 mm (vz. č. 22) - P = 2500W; p = 0.7bar; F = 1200mm/min

při změně výkonu LP :

tl. 4 mm (vz. č. 32) - P = 1750W; p = 1bar; F = 2000mm/min

Z hlediska ekonomického hodnocení bylo prokázáno, že řezání materiálu ČSN 11 373.1 lze provádět buď s požadavkem maximální rychlosti, avšak se sníženou kvalitou řezu (vyšší drsností, větším úhlem rozevření, širší řeznou spárkou), a nebo s cílem maximální dosažitelné jakosti řezu, avšak s nižší produktivitou práce, resp. vyššími náklady.

Naměřené hodnoty v diplomové práci dovolují udělat představu o optimálních parametrech a to z jednoho i druhého hlediska.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] KÖNIG, J.: 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 zpráva 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 CO₂ laser . LASER 75 Opto - Elektronik 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 CO₂ 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

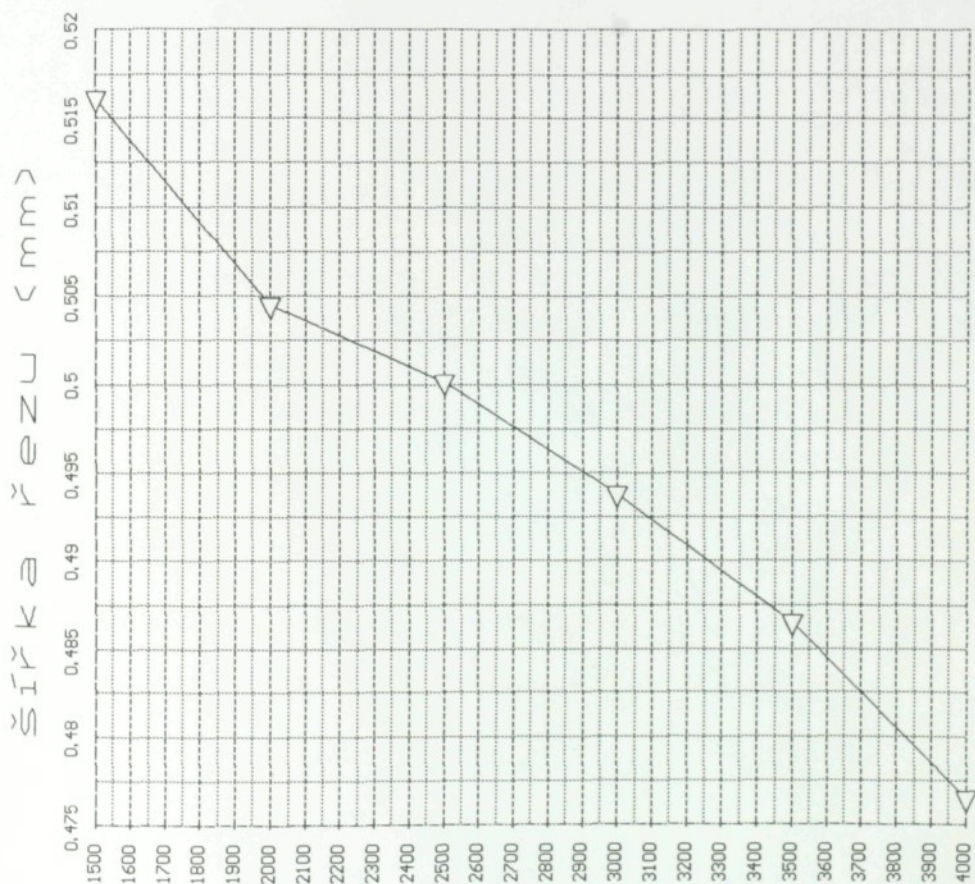
ČSN 11 373.1

ČSN 42 0074

Závěrem chci poděkovat všem, kteří mi poskytli cenné rady i konkrétní pomoc při vypracování diplomové práce, zvláště vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Horynovi, Doc., ing. Karlovi Daňourkovi, Doc., Ing. Ivě Nové, CSc. a také paní Haničce Kerdové.

GRAFICKÁ PŘÍLOHA

Závislost tloušťky řezu na rychlosti posuvu (mtr. 2mm)

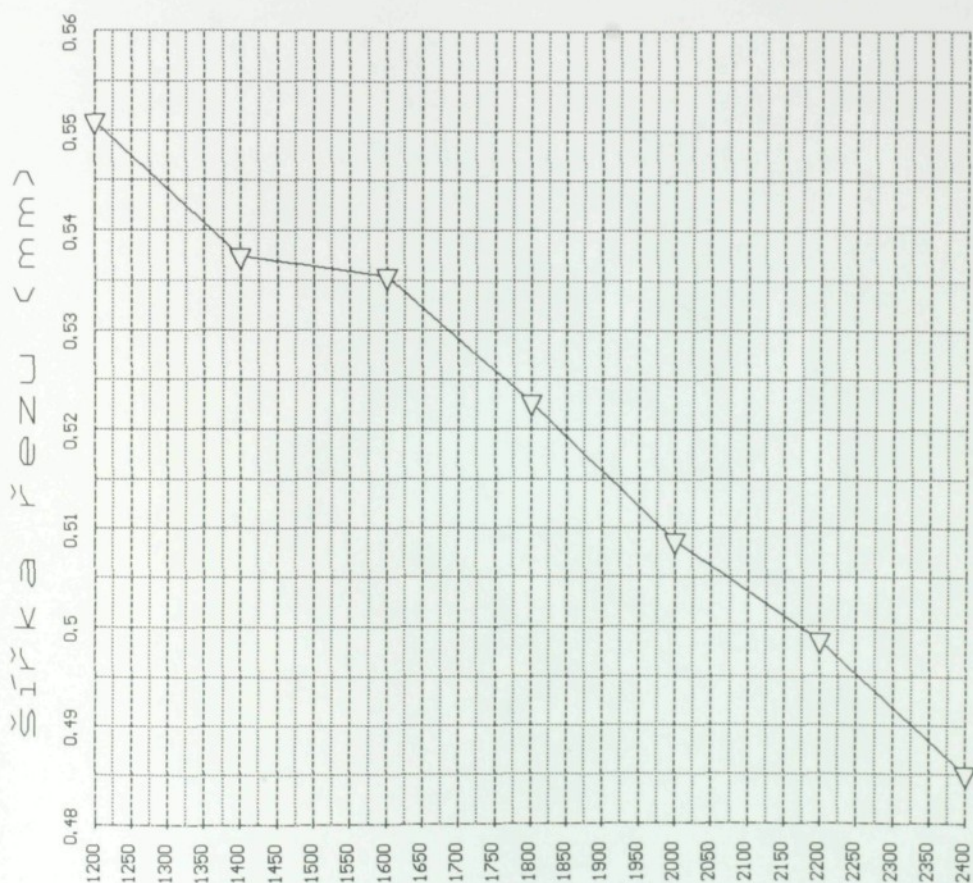


rychlost posuvu (mm/min)

$p=1.0 \text{ bar}, P=1500 \text{ W}$



Závislost tloušťky řezu na rychlosti posuvu (mtr. 4mm)

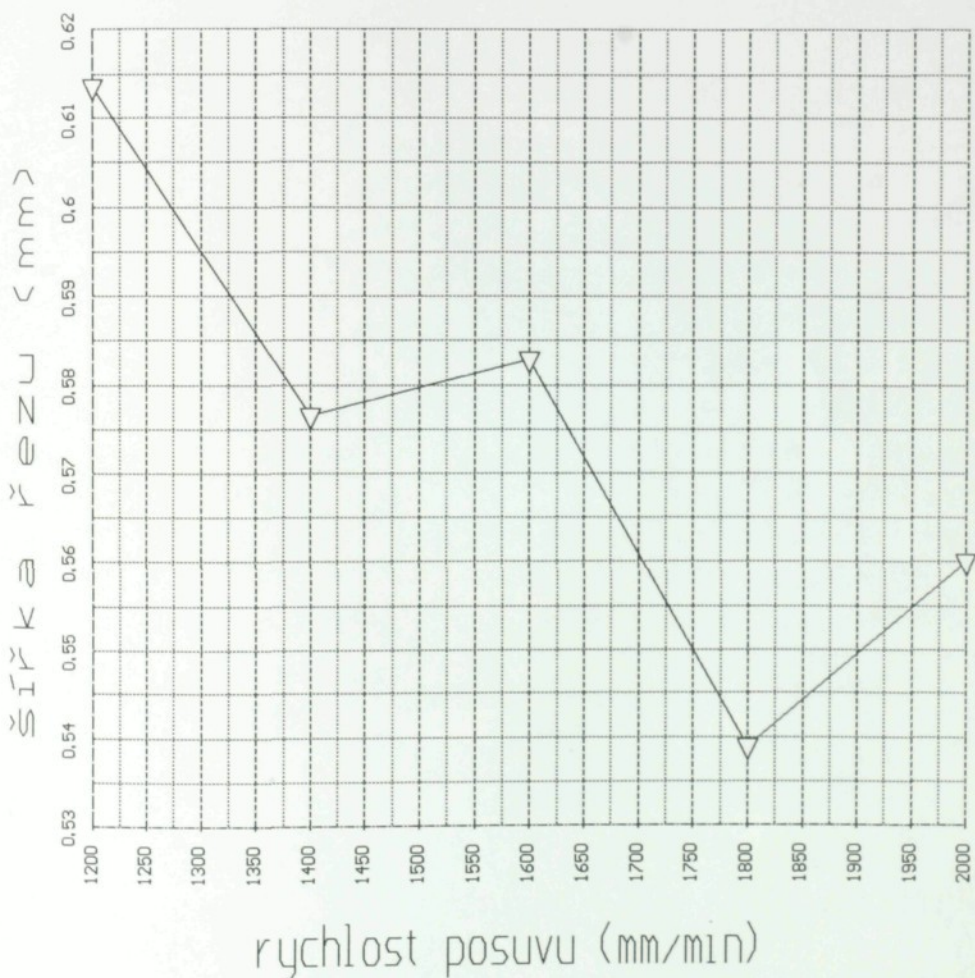


rychlost posuvu (mm/min)

$p=1.0 \text{ bar}, P=2000 \text{ W}$



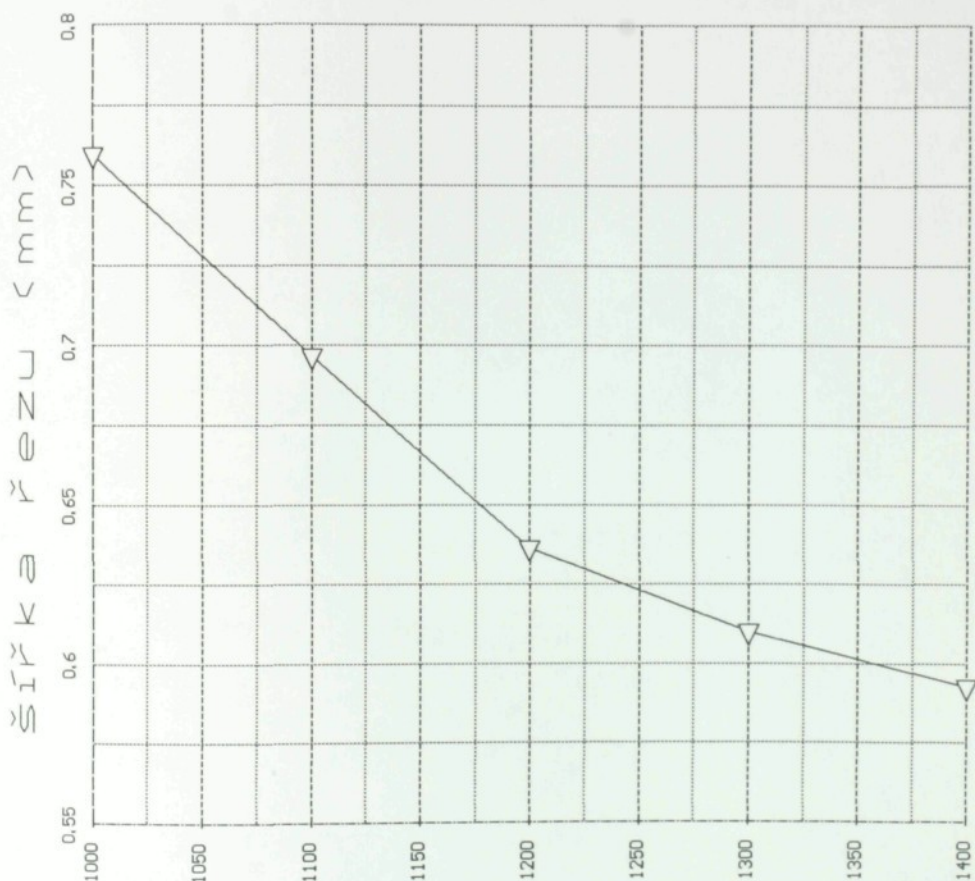
Závislost tloušťky řezu na rychlosti posuvu (mtr. 6mm)



$p=1.0 \text{ bar}, P=2500 \text{ W}$



Závislost tloušťky řezu na rychlosti posuvu (mtr. 8mm)

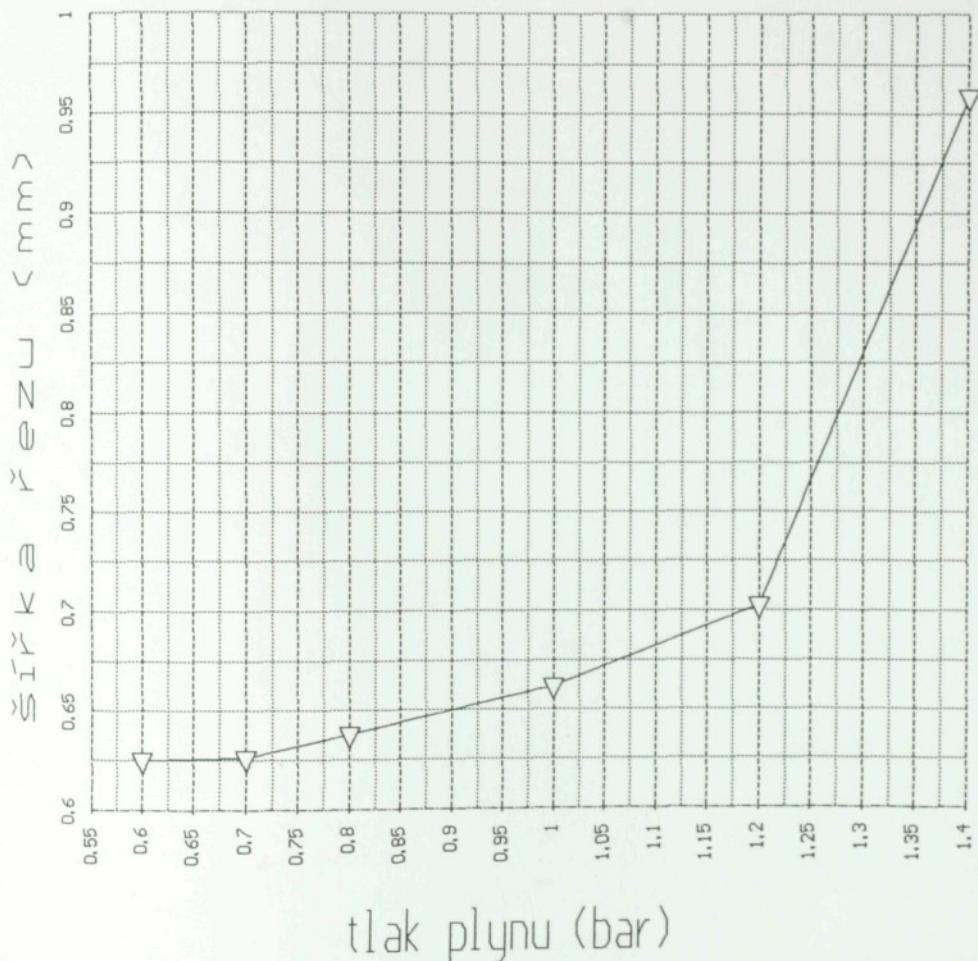


rychlost posuvu (mm/min)

$p=2500 \text{ W}, p = 1.0 \text{ bar}$



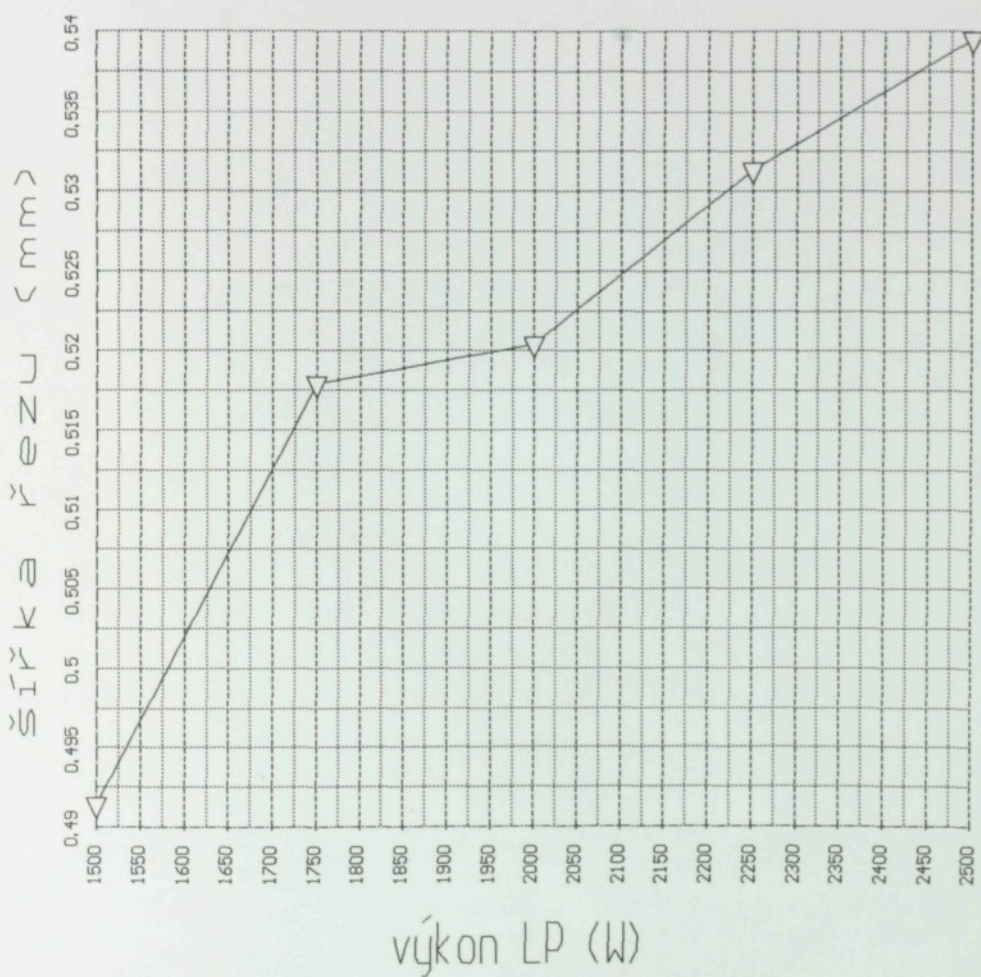
Závislost tloušťky řezu na tlaku pomocného plynu (mtr. 8mm)



$P=2500 \text{ W}, F=1200 \text{ mm/min}$



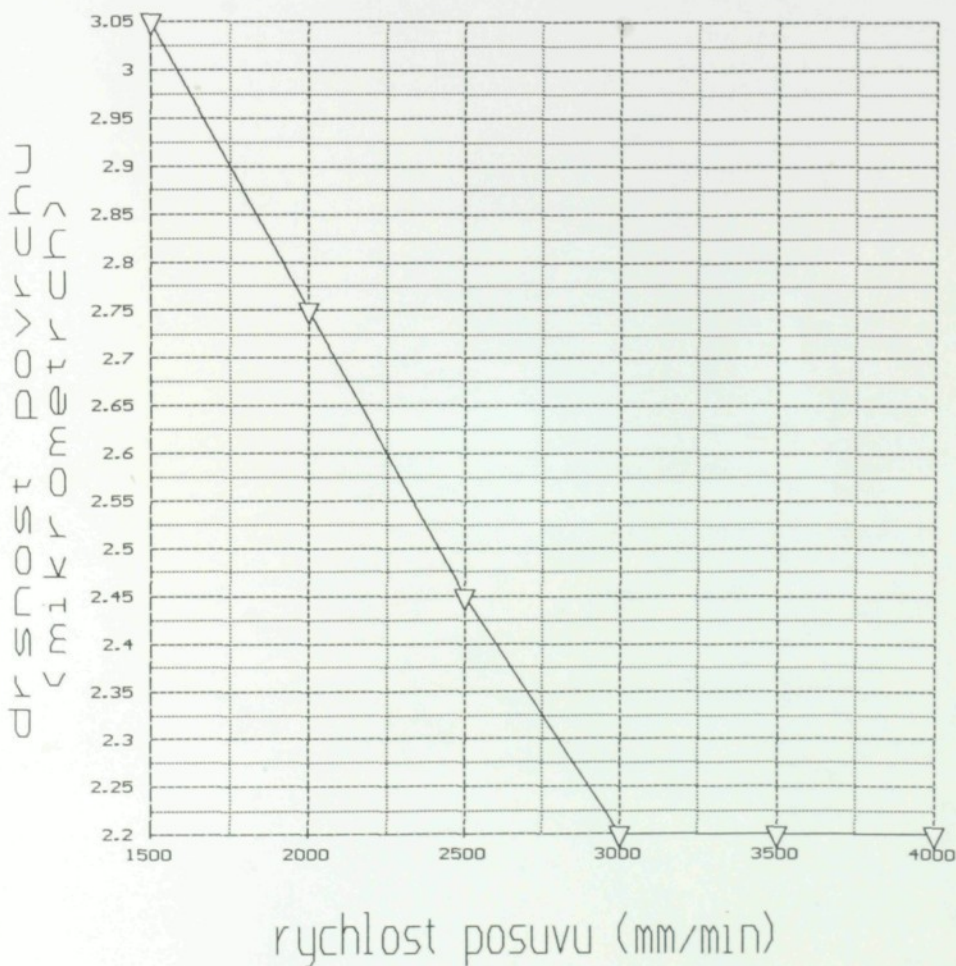
Závislost tloušťky řezu na výkonu LP (mtr. 4mm)



$p=1.0 \text{ bar}, P=2000 \text{ mm/min}$



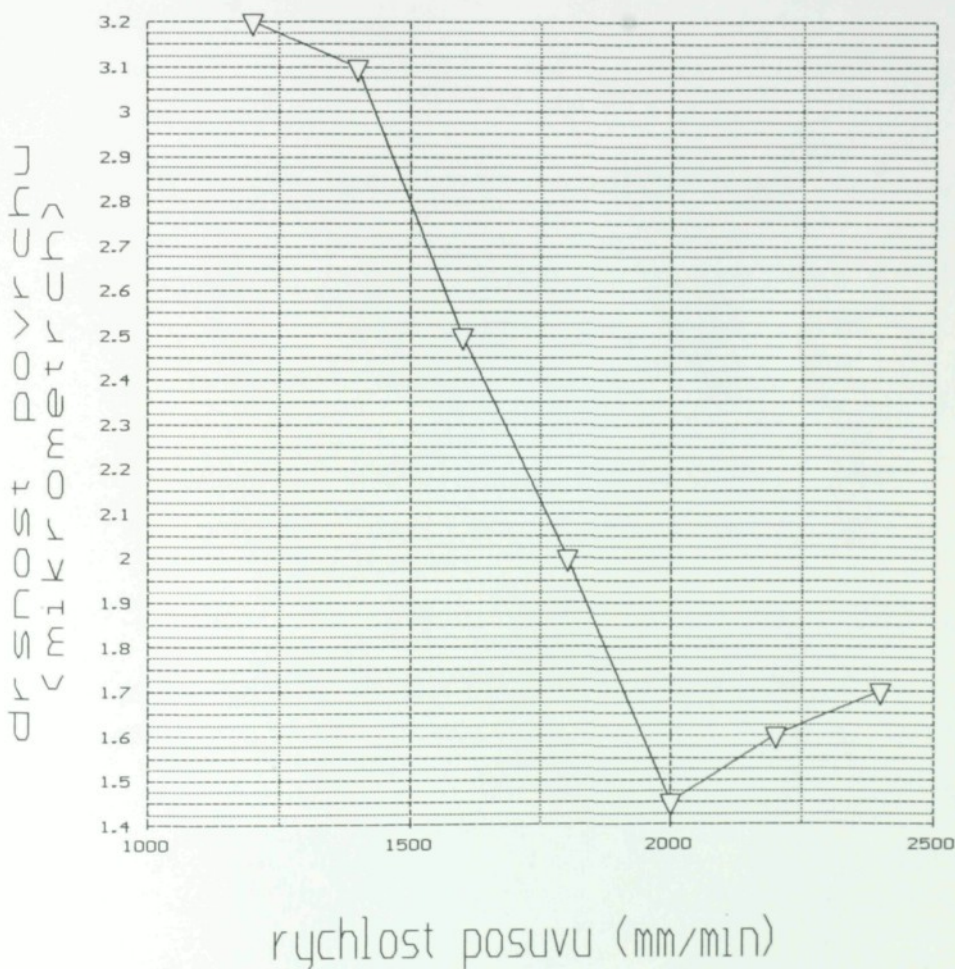
Závislost drsnosti povrchu řezu na rychlosti posuvu



$p = 1,0 \text{ bar}$, $P = 1500 \text{ W}$, $t_l. \text{ mtr.} = 2 \text{ mm}$



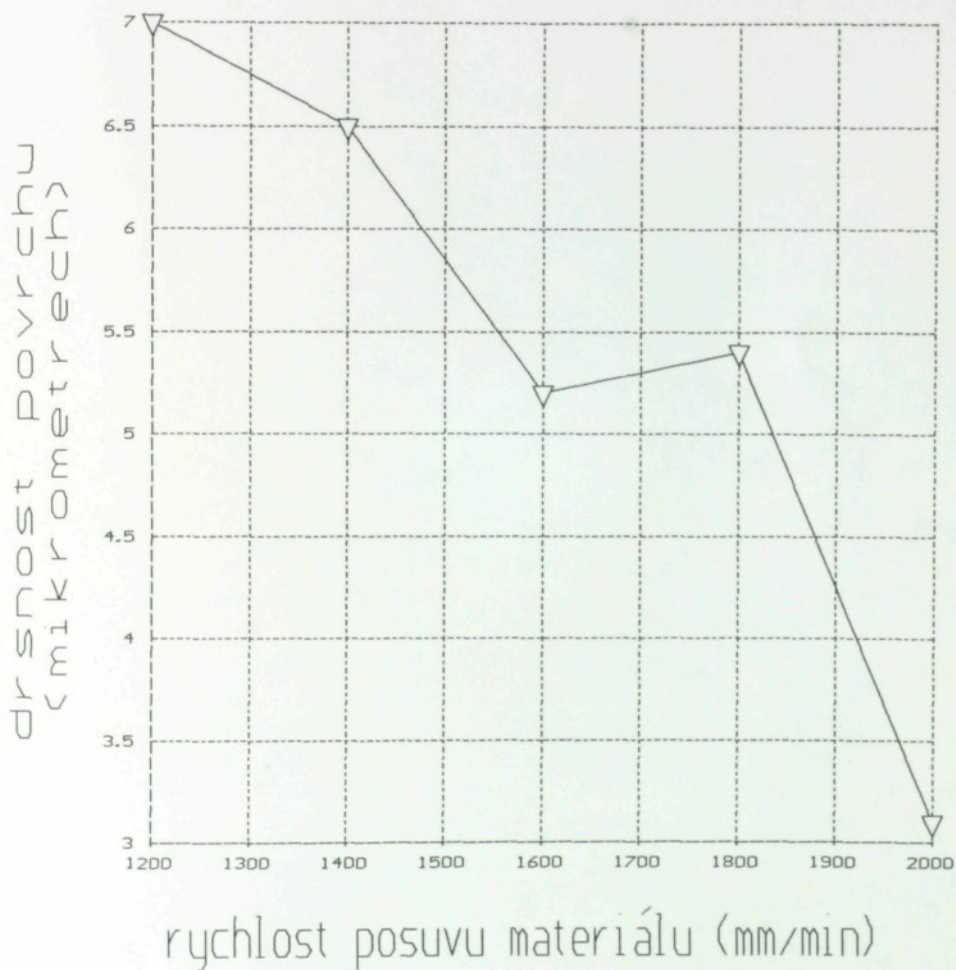
Závislost drsnosti povrchu řezu na rychlosti posuvu mtr.



$p = 2000 \text{ W}, p = 1.0 \text{ bar, tl. mtr.} = 4 \text{ mm}$



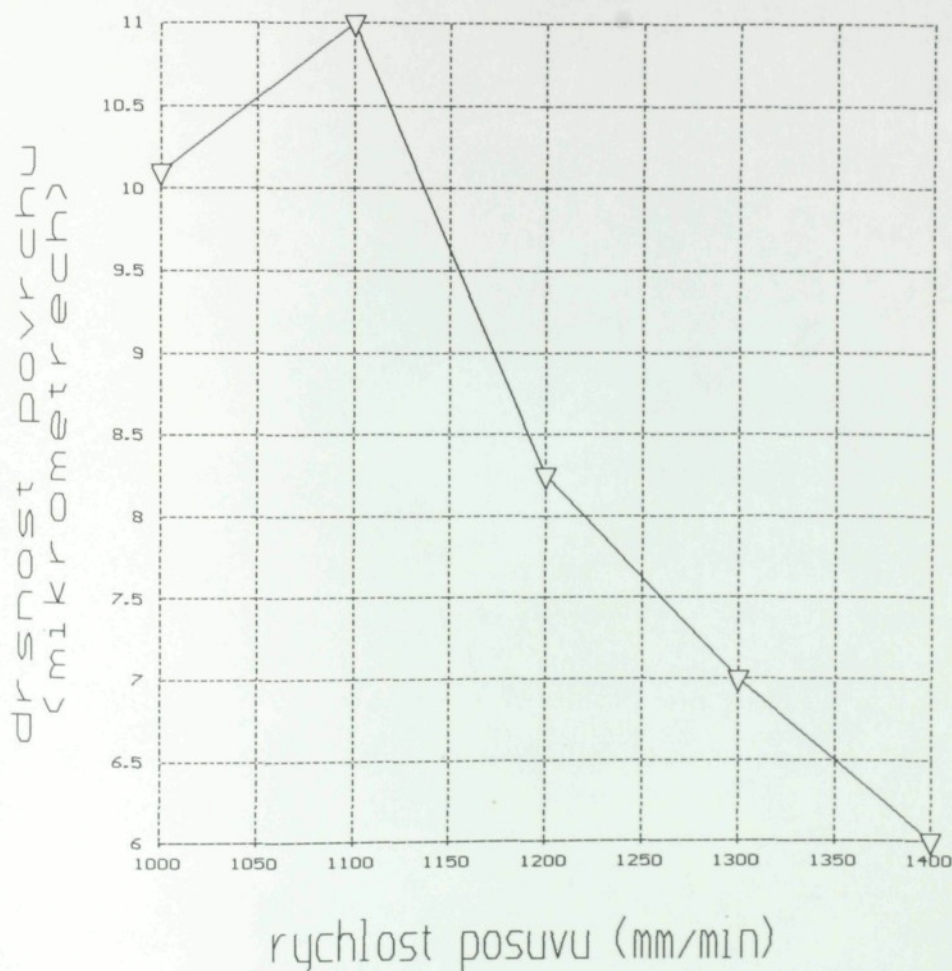
Závislost drsnosti povrchu řezu na rychlosti posuvu mtr.



$P = 2500 \text{ W}, p = 1.0 \text{ bar}, t_l. \text{ mtr.} = 6 \text{ mm}$



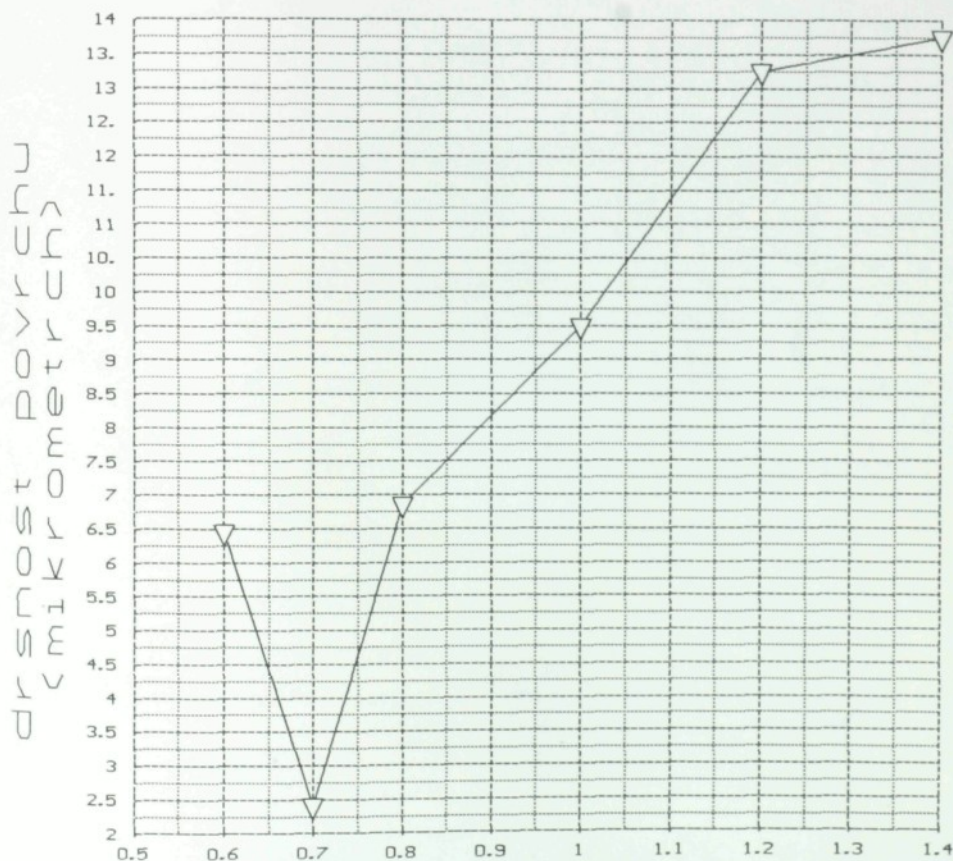
Závislost drsnosti povrchu řezu na rychlosti posuvu mtr.



$p = 2500 \mu, p = 1.0 \text{ bar}, t_l. \text{ mtr.} = 8 \text{ mm}$



Závislost drsnosti povrchu řezu na tlaku pomocného plynu

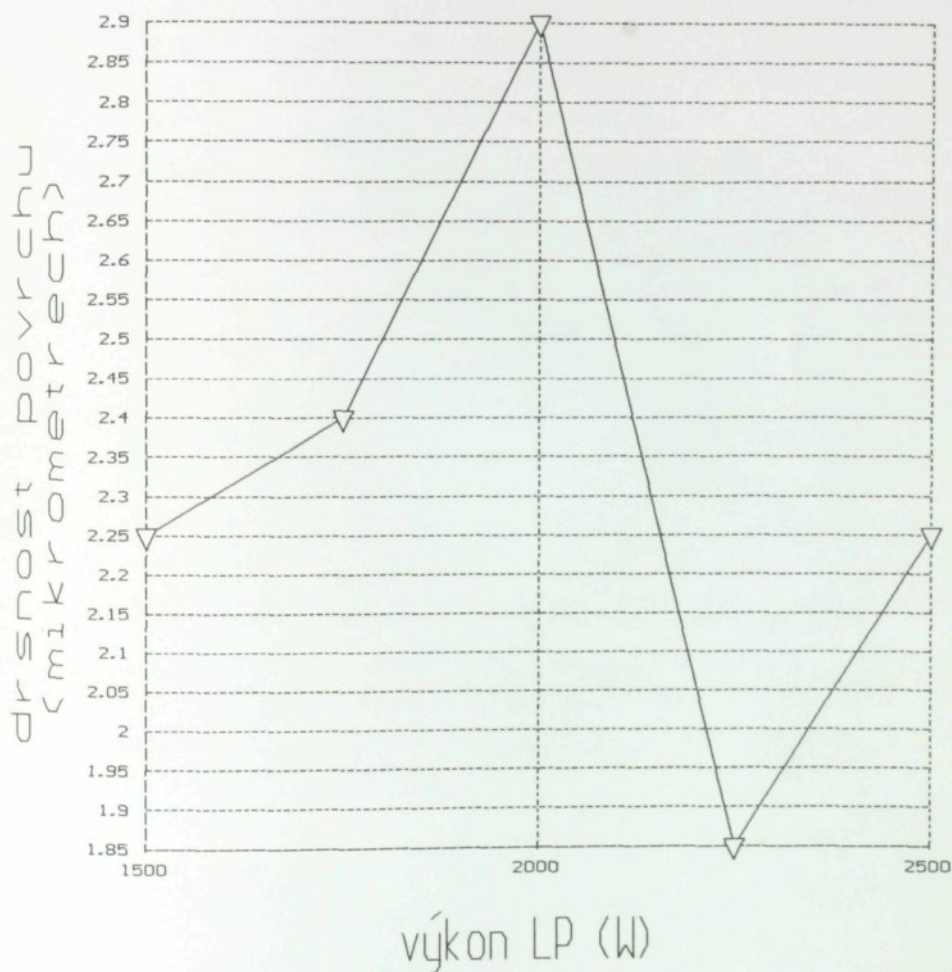


tlak pomocného plynu (bar)

$F=1200 \text{ mm/min}$, $P = 2500 \text{ W}$, tl. mtr. = 8 mm



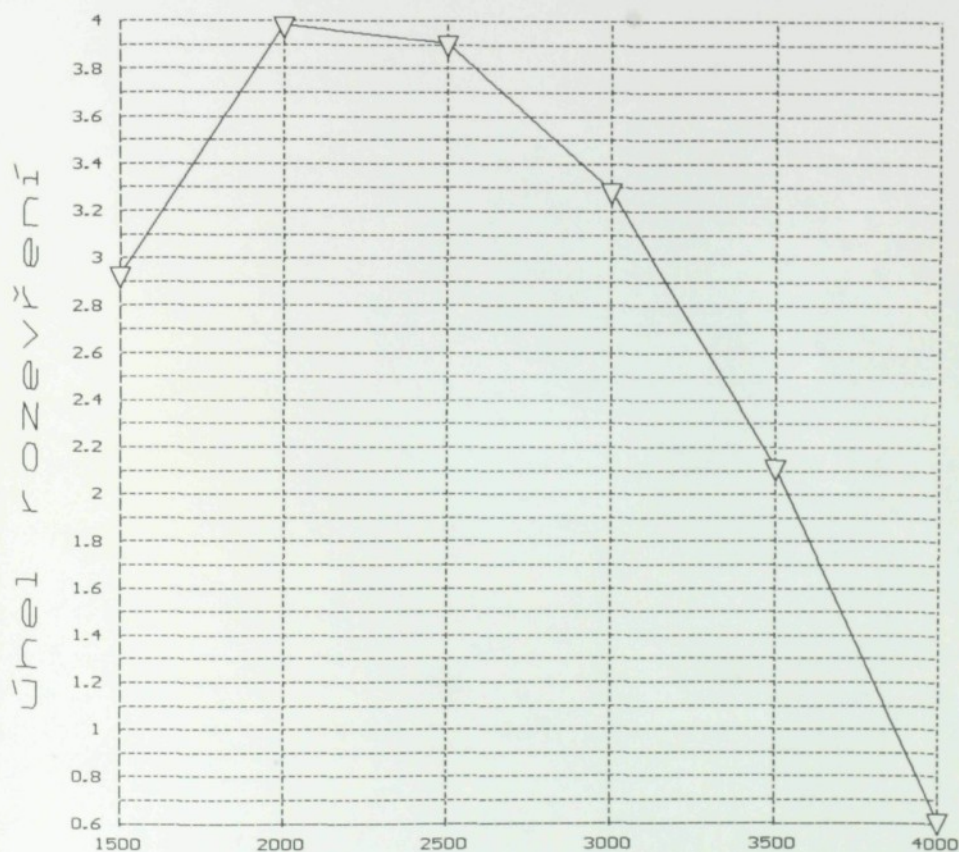
Závislost drsnosti povrchu řezu na výkonu LP



$F = 2000 \text{ mm/min}$, $p = 1.0 \text{ bar}$, $t_l \text{ mtr.} = 4 \text{ mm}$



Závislost úhlu rozevření na rychlosti posuvu mtr.

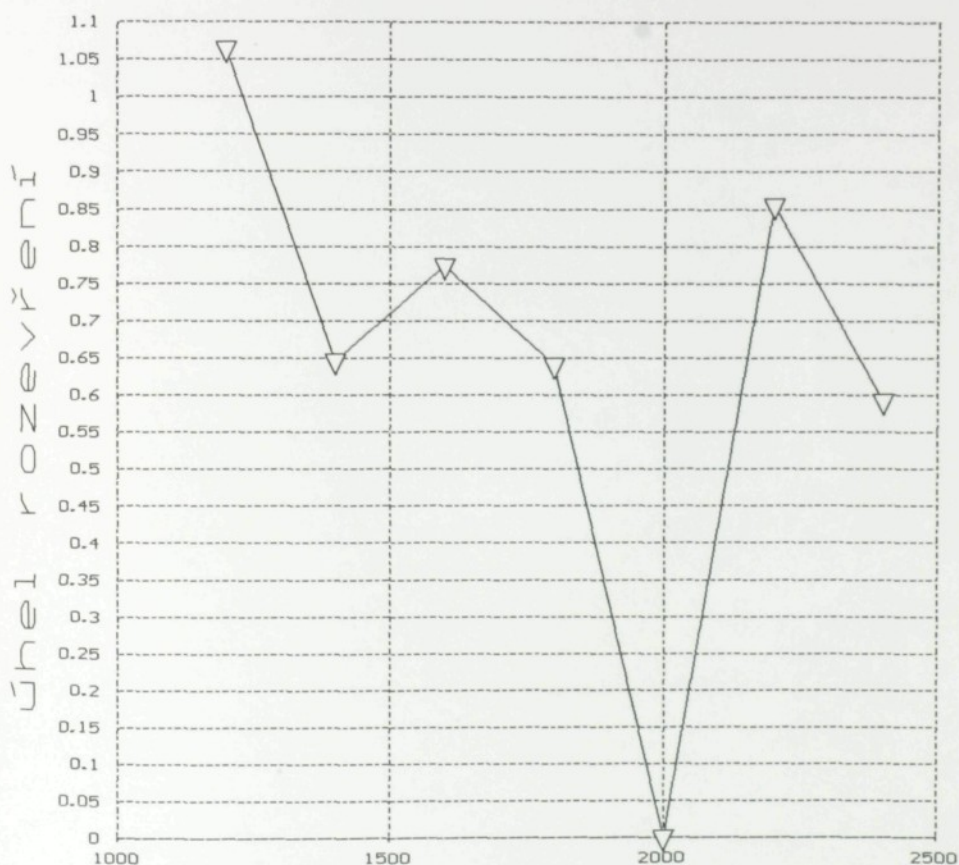


rychlost posuvu (mm/min)

$p=1.0 \text{ bar}$, $P=1500 \text{ W}$, $mtr.=2\text{mm}$



Závislost úhlu rozevření na rychlosti posuvu mtr

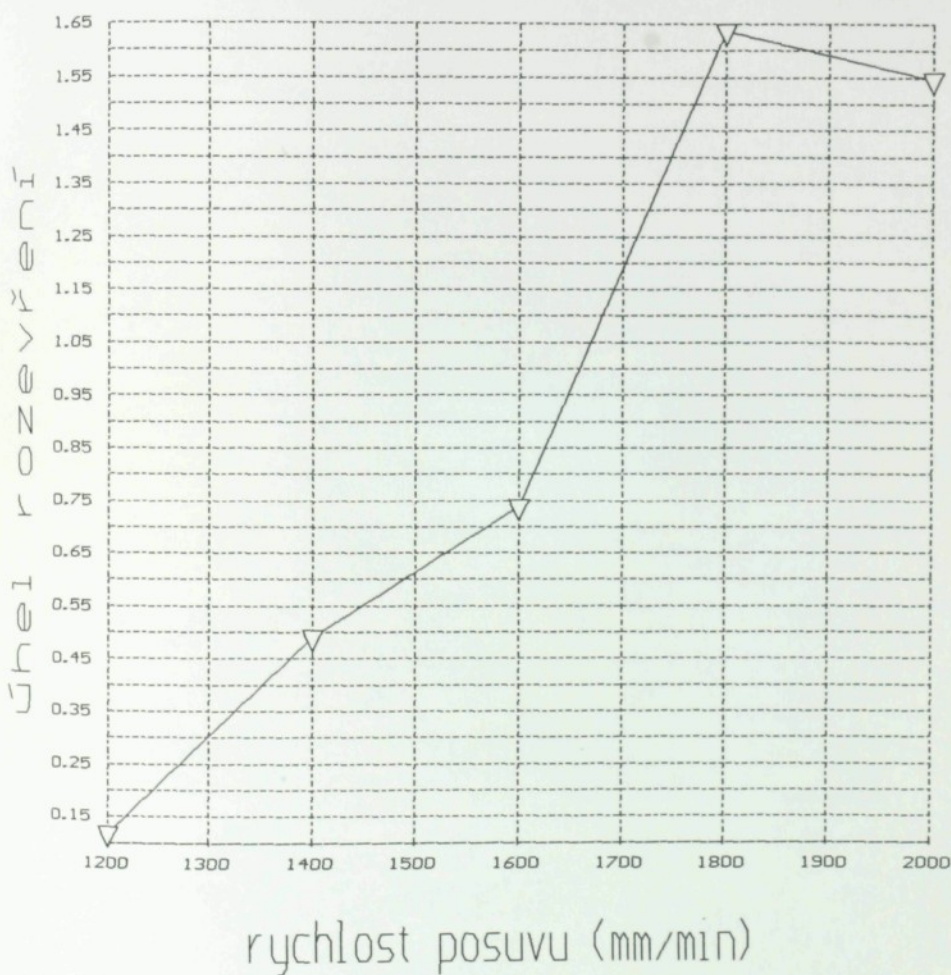


rychlost posuvu mtr.

$p=1.0 \text{ bar}, P=2000 \text{ W, mtr.}=4\text{mm}$



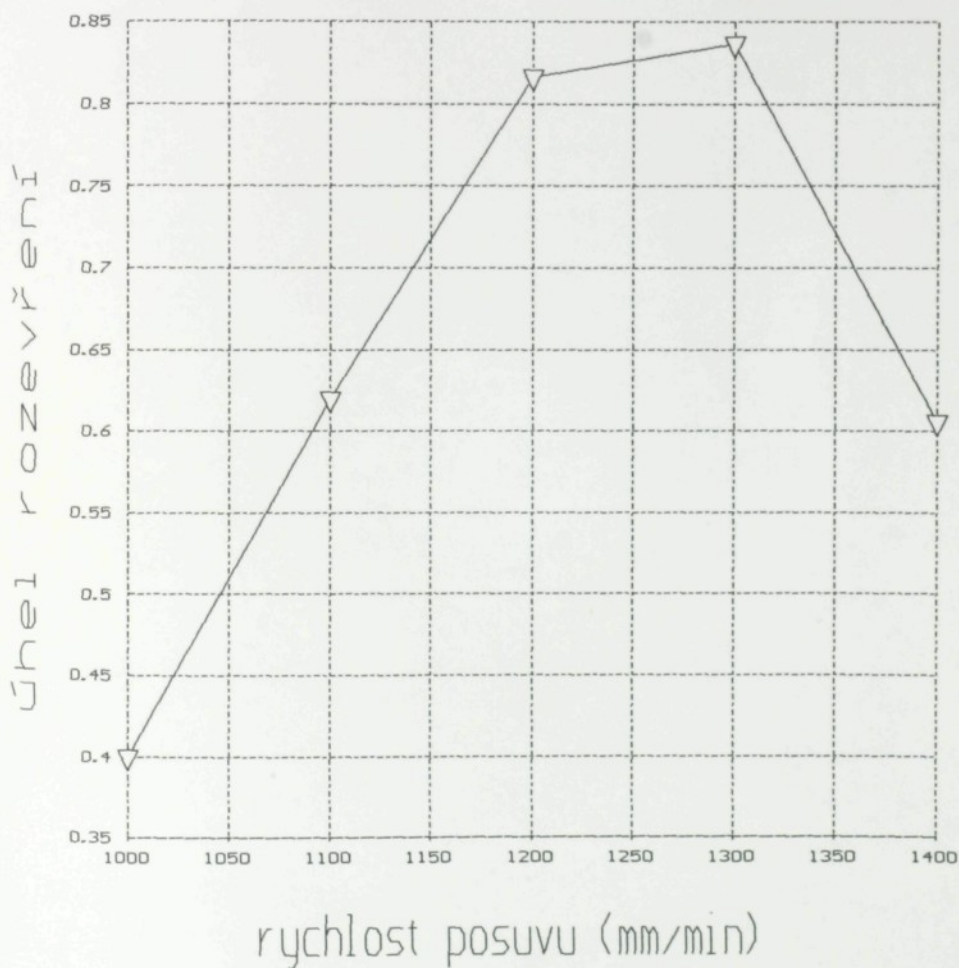
Závislost úhlu rozevření na rychlosti posuvu mtr.



$p=1.0 \text{ bar}, P=2500 \text{ W}, mtr.=6\text{mm}$



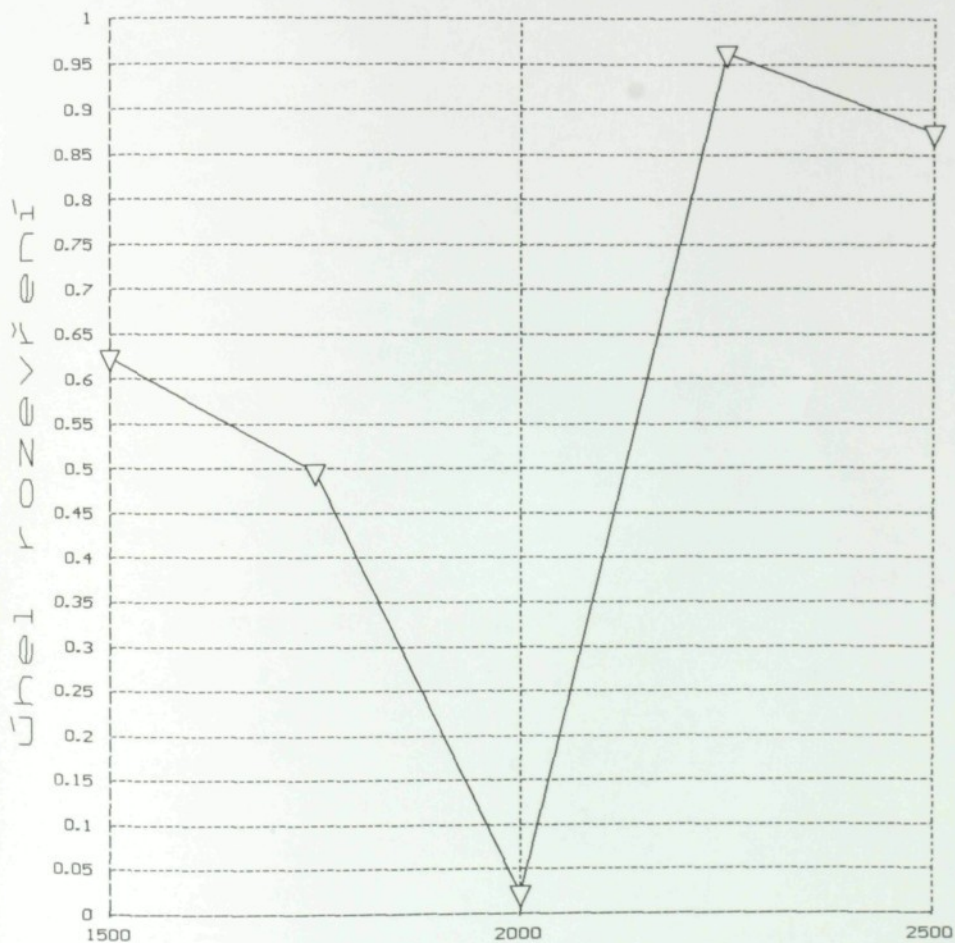
Závislost úhlu rozevření na rychlosti posuvu mtr.



$p=1.0 \text{ bar}$, $P=2500 \text{ W}$, $mtr.=8\text{mm}$



Závislost úhlu rozevření na výkonu LP



výkon LP (W)

$p=1.0 \text{ bar}$, $F=2000 \text{ mm/min}$, $mtr.=4 \text{ mm}$



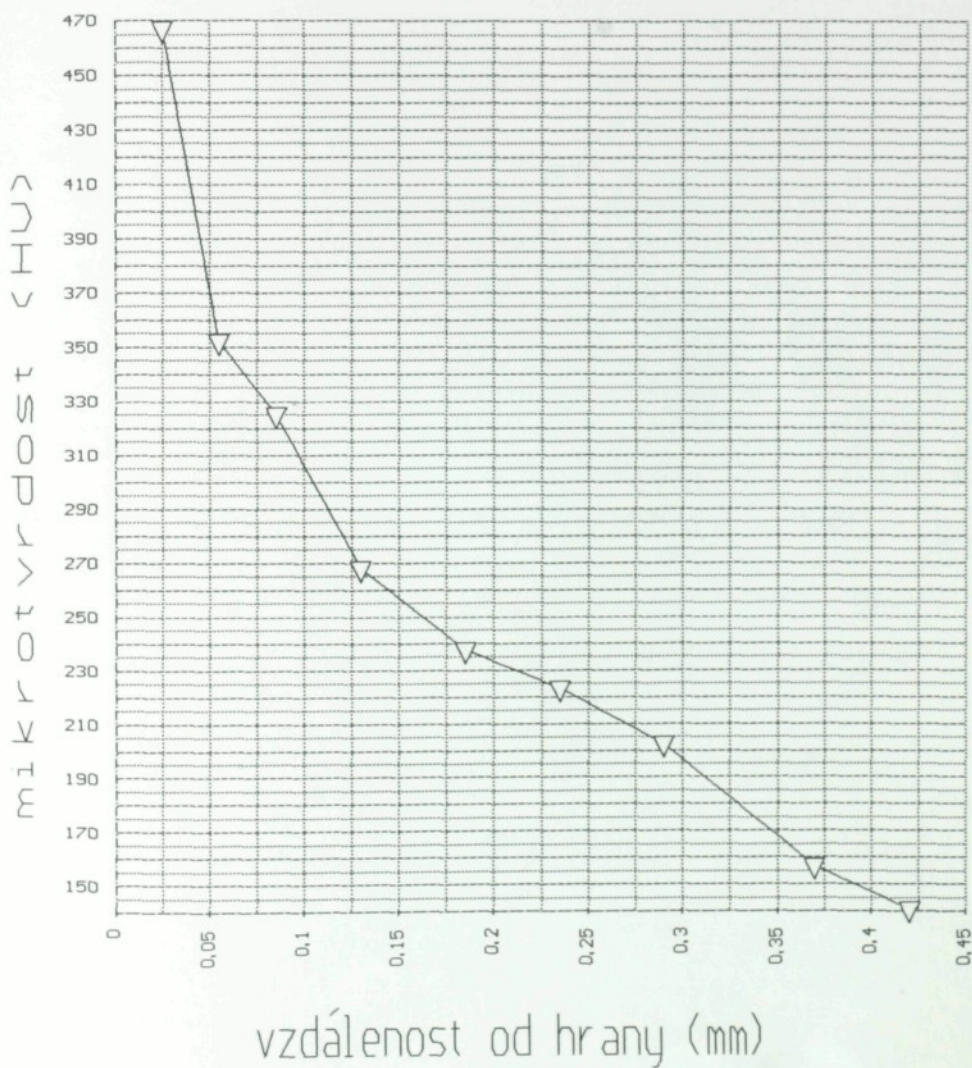
Závislost úhlu rozevření na tlaku pomocného plynu.



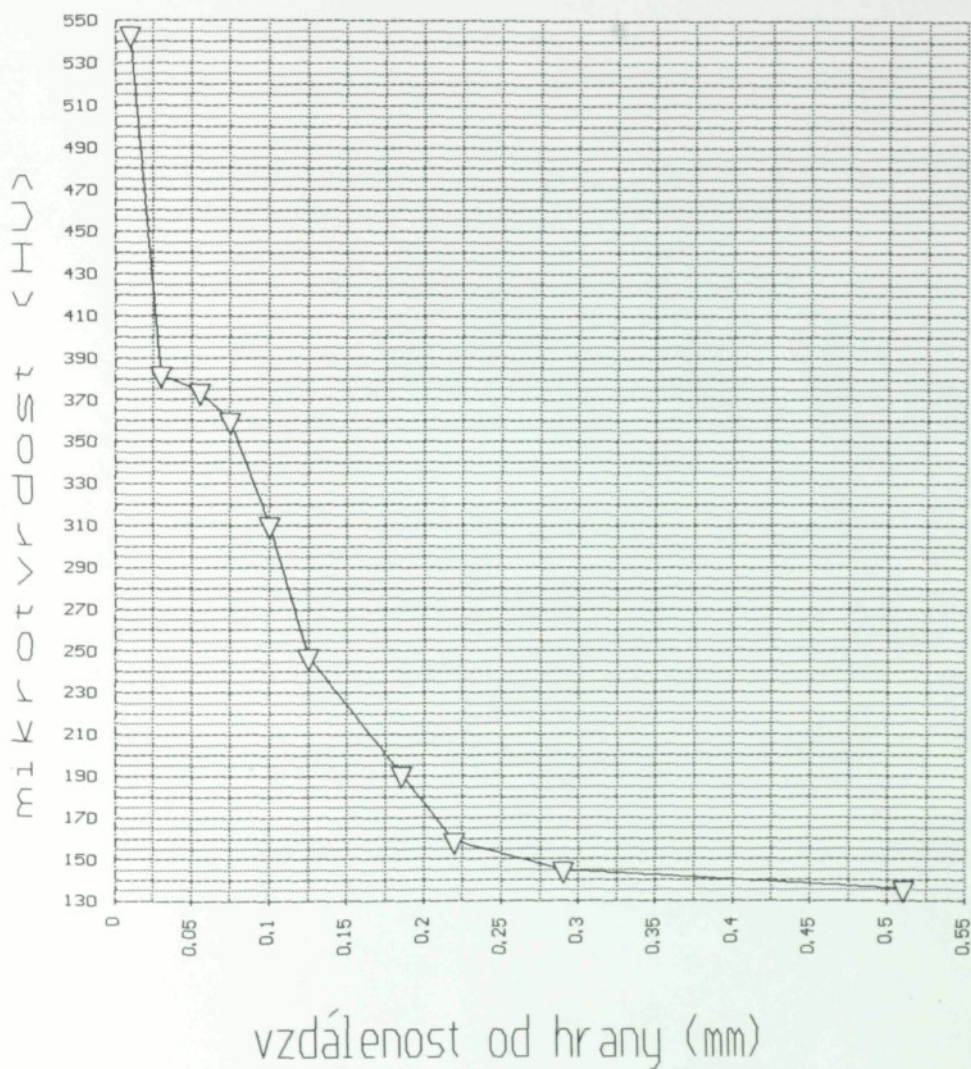
$P = 2500 \text{ W}, F = 1200 \text{ mm/min}, mtr. = 8 \text{ mm}$



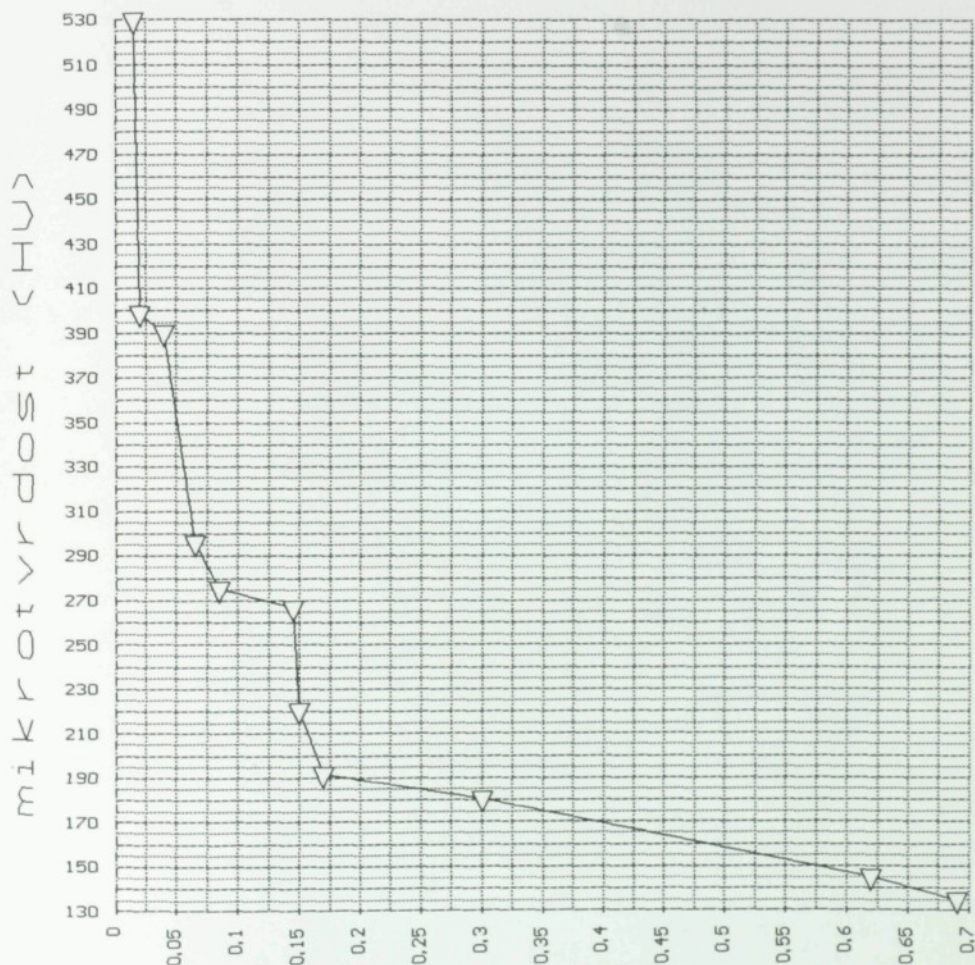
Průběh mikrotvrdosti: materiál tl. 4mm
vzorek č. 11



Průběh mikrotvrdosti: materiál tl. 4mm
vzorek č. 14

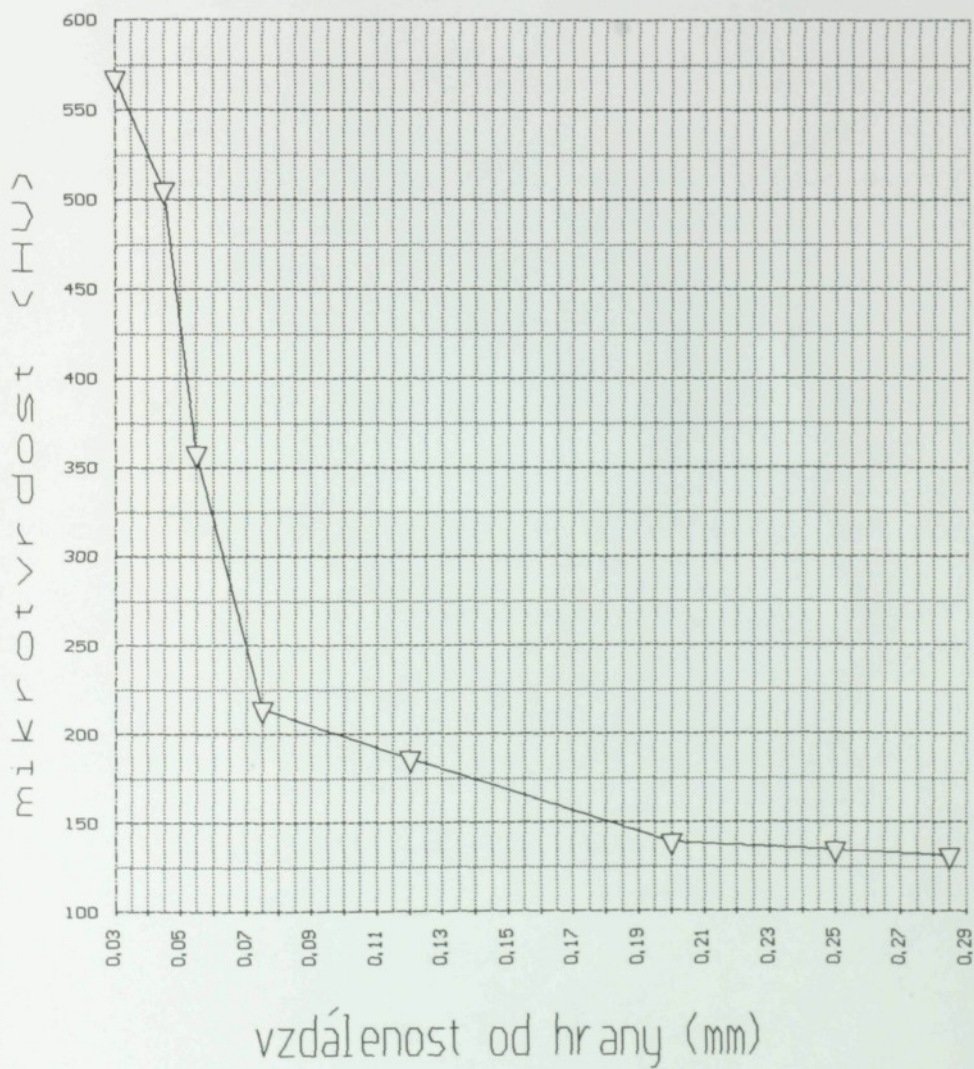


Průběh mikrotvrdosti: materiál tl. 4mm
vzorek č. 17

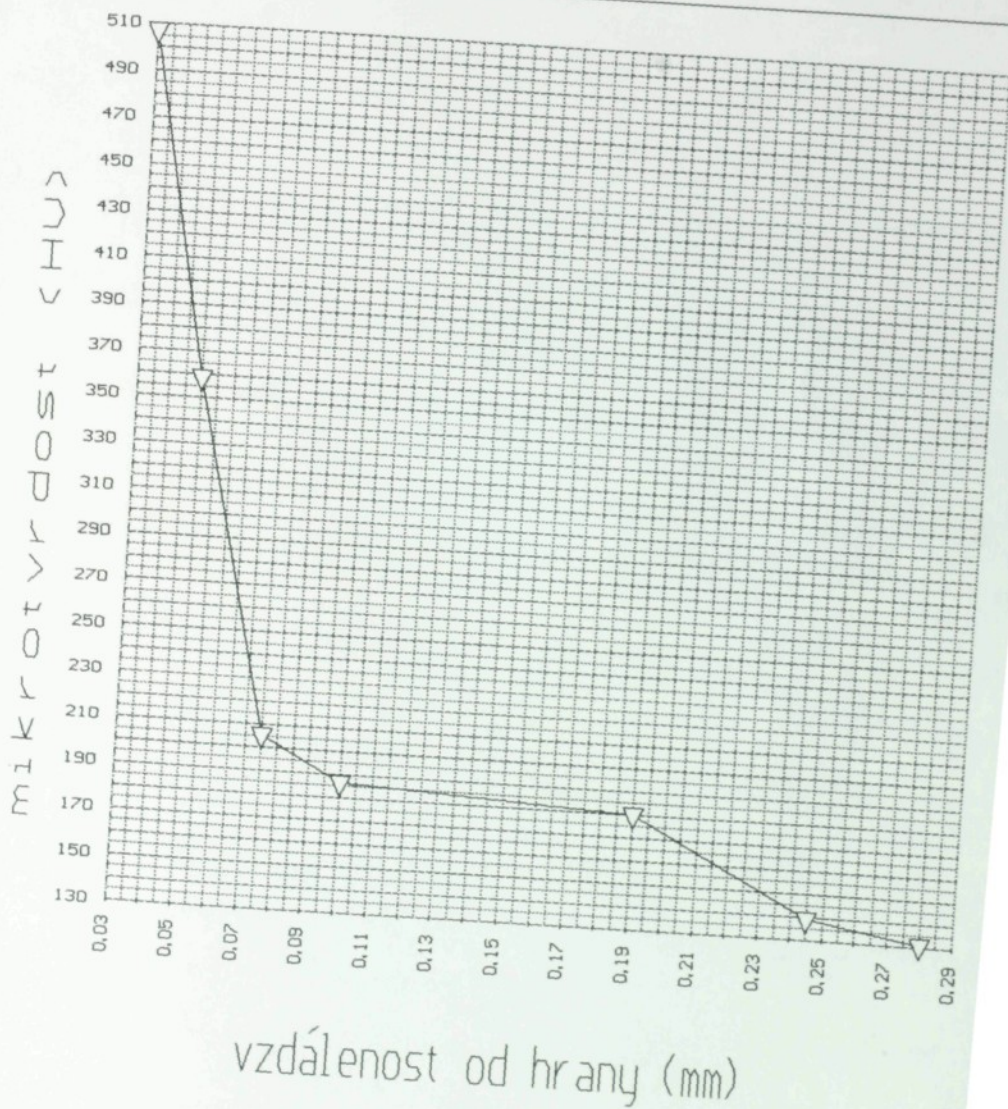


vzdálenost od hrany (mm)

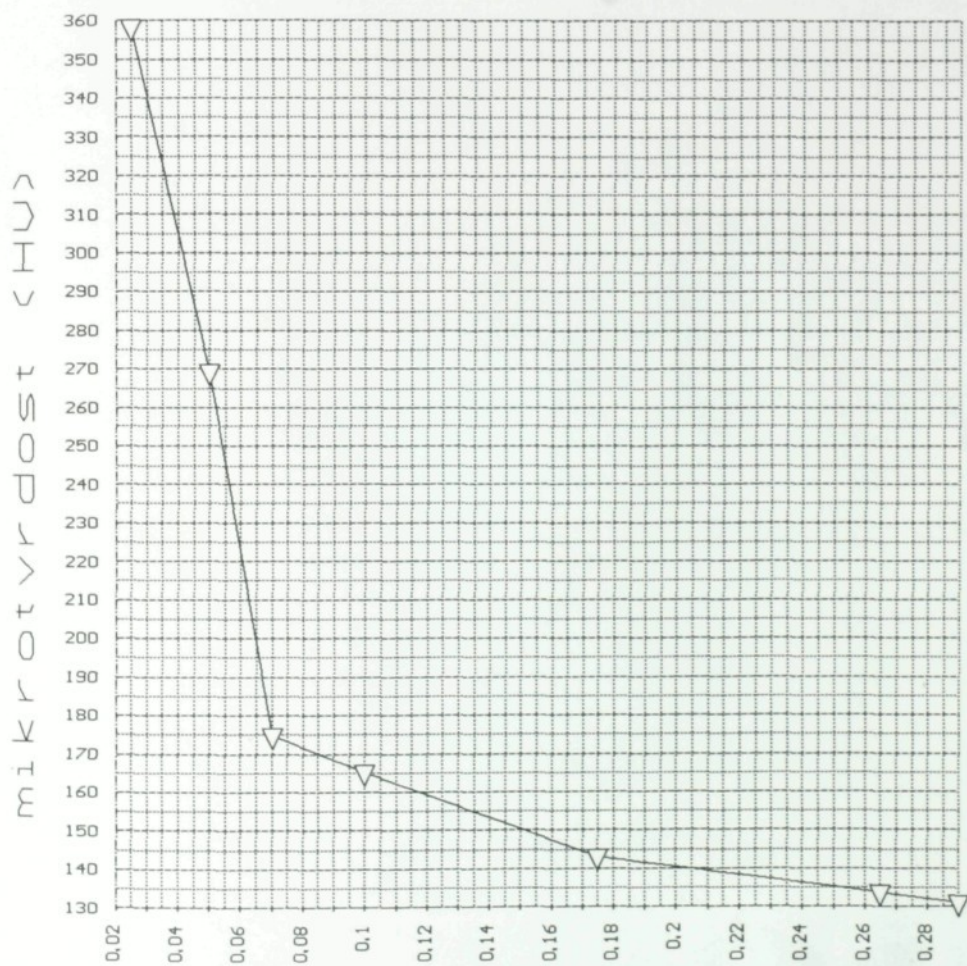
Průběh mikrotvrdosti: materiál tl. 6mm
vzorek č. 11



Průběh mikrotvrdosti: materiál tl. 6mm
vzorek č. 13



Průběh mikrotvrdosti: materiál tl. 6mm
vzorek č. 15



vzdálenost od hrany (mm)

Vrchní strana vzorku :					Příloha č. 1	
tloušťka 4mm					konstantní: P=2000mm/min, p=1.0 bar	
číslo vzorku	číslo měření				výkon LP (W)	konečný o
	1	2	3	4		
31	0.4314	0.5146	0.5438	0.4758	1500	0.4914
32	0.7518	0.2446	0.3106	0.7652	1750	0.5179
33	0.4246	0.5798	0.6492	0.428	2000	0.5204
34	0.5194	0.5336	0.5368	0.5352	2250	0.5313
35	0.4822	0.5836	0.6658	0.4262	2500	0.5395

pozn. Neoznačené veličiny jsou v mm

tloušťka 8mm						konstantní: P=2500W, p=1.0 bar
číslo vzorku	číslo měření				rychlost posuvu (mm/min)	konečný o
	1	2	3	4		
11	0.6064	0.9088	1.204	0.3188	1000	0.7595
12	0.2906	1.13	0.613	0.7532	1100	0.6967
13	0.6658	0.6752	0.482	0.7216	1200	0.6362
14	0.7438	0.455	0.5332	0.7076	1300	0.6099
15	0.4266	0.7272	0.6992	0.5184	1400	0.5929

tloušťka 4mm						konstantní: P=2000W, p=1.0 bar
číslo vzorku	číslo měření				rychlost posuvu (mm/min)	konečný o
	1	2	3	4		
11	0.4372	0.6432	0.5818	0.5402	1200	0.5509
12	0.6142	0.4538	0.7902	0.2912	1400	0.5374
13	0.6454	0.3976	0.5076	0.587	1600	0.5354
14	0.5078	0.5332	0.659	0.3908	1800	0.5227
15	0.5508	0.4632	0.4132	0.6076	2000	0.5087
16	0.6092	0.376	0.4478	0.5612	2200	0.4986
17	0.4816	0.4818	0.556	0.4206	2400	0.485

tloušťka 6mm						konstantní: P=2500W, p=1.0 bar
číslo vzorku	číslo měření				rychlost posuvu (mm/min)	konečný o
	1	2	3	4		
11	0.2872	0.9652	0.6488	0.5528	1200	0.6135
12	0.6474	0.4604	0.9976	0.201	1400	0.5766
13	0.4774	0.6794	0.5024	0.6722	1600	0.5829
14	0.5382	0.5534	0.5806	0.484	1800	0.539
15	0.6926	0.3898	0.5094	0.6482	2000	0.56

tloušťka 2mm				konstantní: P=1500W, p=1.0 bar		
číslo vzorku	číslo měření				rychlost posuvu (mm/min)	konečný o
	1	2	3	4		
11	0.485	0.5071	0.6592	0.413	1500	0.5161
12	0.4814	0.5118	0.3894	0.6352	2000	0.5045
13	0.6752	0.3028	0.2446	0.7776	2500	0.5001
14	0.348	0.6208	0.553	0.4554	3000	0.4938
15	0.5186	0.4558	0.4018	0.5696	3500	0.4865
16	0.4776	0.4732	0.3966	0.5586	4000	0.4765

tloušťka 8mm				konstantní: F=1200mm/min, P=2500W		
číslo vzorku	číslo měření				tlak pomocného plynu (bar)	konečný o
	1	2	3	4		
21	0.7044	0.5362	0.559	0.7024	0.6	0.6255
22	0.7146	0.5086	0.352	0.931	0.7	0.6266
23	0.4306	0.8754	0.4998	0.7442	0.8	0.6377
24	0.4758	0.8904	0.6352	0.6456	1	0.6618
25	0.6636	0.8128	1.099	0.235	1.2	0.7026
26	1.516	0.8518	0.8772	0.5908	1.4	0.9589

Druhá strana vzorku:					Příloha č. 2	
tloušťka 4mm					konstantní: P=2000mm/min, p=1.0 bar	
číslo vzorku	číslo měření				výkon LP (W)	konečný o
	1	2	3	4		
31	0,3194	0,32534	0,496	0,6226	1500	0,4479
32	0,4228	0,362	0,5882	0,5598	1750	0,4832
33	0,3864	0,4978	0,5492	0,642	2000	0,5189
34	0,5094	0,4584	0,4544	0,9716	2250	0,5985
35	0,3964	0,7098	0,6224	0,6734	2500	0,6005

pozn. Neoznačené veličiny jsou v mm

tloušťka 8mm					konstantní: P=2500W, p=1.0 bar	
číslo vzorku	číslo měření				rychlost posuvu (mm/min)	konečný o
	1	2	3	4		
11	0,9138	0,8286	0,7334	0,7854	1000	0,8153
12	0,9482	0,6438	0,6808	0,8602	1100	0,7835
13	0,6228	0,7256	0,7816	0,8706	1200	0,7502
14	0,6478	0,7378	0,7048	0,8146	1300	0,7267
15	0,6918	0,6672	0,7094	0,7464	1400	0,6774

tloušťka 4mm					konstantní: P=2000W, p=1.0 bar	
číslo vzorku	číslo měření				rychlost posuvu (mm/min)	konečný o
	1	2	3	4		
11	0,4228	0,485	0,3194	0,6794	1200	0,4767
12	0,3604	0,559	0,5532	0,4962	1400	0,4922
13	0,4176	0,478	0,2934	0,7366	1600	0,4814
14	0,4278	0,4168	0,58	0,4872	1800	0,4779
15	0,6184	0,2698	0,6592	0,4734	2000	0,5052
16	0,4002	0,5298	0,7336	0,5694	2200	0,5525
17	0,6588	0,2204	0,5592	0,6668	2400	0,5263

tloušťka 6mm					konstantní: P=2500W, p=1.0 bar	
číslo vzorku	číslo měření				rychlost posuvu (mm/min)	konečný o
	1	2	3	4		
11	0,4884	0,6274	0,6462	0,6434	1200	0,6014
12	0,3358	0,8428	0,6332	0,7002	1400	0,628
13	0,479	0,6262	0,6192	0,9156	1600	0,66
14	0,4342	0,7582	0,801	0,848	1800	0,7104
15	0,7228	0,6146	0,709	0,8414	2000	0,7219

tloušťka 2mm				konstantní: P=1500W, p=1.0 bar		
číslo vzorku	číslo měření				rychlost posuvu (mm/min)	konečný o
	1	2	3	4		
11	0.691	0.1204	0.1926	0.6698	1500	0.4138
12	0.6256	0.112	0.49	0.2332	2000	0.3652
13	0.129	0.5622	0.5112	0.2518	2500	0.3635
14	0.6276	0.1036	0.284	0.5002	3000	0.3789
15	0.239	0.4956	0.471	0.445	3500	0.4127
16	0.3886	0.4418	0.3666	0.6238	4000	0.4552

tloušťka 8mm				konstantní: F=1200mm/min, P=2500W		
číslo vzorku	číslo měření				tlak pomocného plynu (bar)	konečný o
	1	2	3	4		
21	0.453	0.6386	0.603	0.6264	0.6	0.5803
22	0.5814	0.6224	0.591	1.16	0.7	0.7387
23	0.6292	0.6622	1.068	0.751	0.8	0.8226
24	0.5788	1.088	0.9218	0.9362	1	0.8812
25	0.7632	0.9138	1.086	0.738	1.2	0.8753
26	0.7616	1.731	1.107	0.9068	1.4	0.8766

Měření drsnosti povrchu

Příloha č.3

Měření provedeno na přístroji: HOMEL TESTER

parametry měření: CUT OFF = 2.5

dráha = 6.3 mm

mtr. tloušťky 8mm

	naměřená	naměřená				
vz.	Ra (μm)	Ra (μm)	Rmax (μm)	Rmax (μm)	F	Ra1, Ra2
č.	(strana b)	(strana c)	(strana b)	(strana c)	(mm/min)	(μm)
11	3,2	17	23	>77	1000	10,1
12	16	6	78	30	1100	11
13	12	4,05	55	26	1200	8,25
14	10	4	41	19	1300	7
15	8	4	45	16	1400	6

mtr. tloušťky 6mm

	naměřená	naměřená				
vz.	Ra (μm)	Ra (μm)	Rmax (μm)	Rmax (μm)	F	Ra1, Ra2
č.	(strana b)	(strana c)	(strana b)	(strana c)	(mm/min)	(μm)
11	8,6	5,4	>30	>30	1200	7
12	7	6	>30	>30	1400	6,5
13	6,1	4,3	27,5	>30	1600	5,2
14	5,6	5,2	>30	>30	1800	5,4
15	2,6	3,6	14,5	20,5	2000	3,1

mtr. tloušťky 4mm

	naměřená	naměřená				
vz.	Ra (μm)	Ra (μm)	Rmax (μm)	Rmax (μm)	F	Ra1, Ra2
č.	(strana b)	(strana c)	(strana b)	(strana c)	(mm/min)	(μm)
11	3,3	3,1	16,5	16	1200	3,2
12	3,4	2,8	20,5	15	1400	3,1
13	1,6	3,4	8,5	18	1600	2,5
14	2,5	1,5	13,5	9	1800	2
15	1,5	1,4	8	6	2000	1,45
16	3,8	1,6	19	8	2200	1,6
17	1,6	1,8	9,5	6,5	2400	1,7

mtř. tloušťky 2mm

	naměřená	naměřená				
vz. č.	Ra(μm) (strana b)	Ra(μm) (strana c)	Rmax(μm) (strana b)	Rmax(μm) (strana c)	F (mm/min)	Ra1,Ra2 (μm)
11	3	3,1	15,5	17,5	1500	3,05
12	2,7	2,8	15,5	15,5	2000	2,75
13	2,4	2,5	14	18	2500	2,45
14	2,1	2,3	13	16	3000	2,2
15	2,5	1,9	14	11,5	3500	2,2
16	2,2	2,2	12,5	11	4000	2,2

mtř. tloušťky 8mm

	naměřená	naměřená				
vz. č.	Ra(μm) (strana b)	Ra(μm) (strana c)	Rmax(μm) (strana b)	Rmax(μm) (strana c)	p (bar)	Ra1,Ra2 (μm)
21	6,7	6,2	>30	18,5	0,6	6,45
22	2,7	3,1	>30	16,5	0,7	2,4
23	10	3,7	>30	21,5	0,8	6,85
24	8,5	10,5	22,5	>30	1	9,5
25	11	15,5	22	27,5	1,2	13,25
26	12,5	15	25	57	1,4	13,75

mtř. tloušťky 4mm

	naměřená	naměřená				
vz. č.	Ra(μm) (strana b)	Ra(μm) (strana c)	Rmax(μm) (strana b)	Rmax(μm) (strana c)	výkon LP (W)	Ra1,Ra2 (μm)
31	1,5	3	7,5	16	1500	2,25
32	3	1,8	18,5	10	1750	2,4
33	2,9	2,9	19	21	2000	2,9
34	2,5	1,2	14,5	6	2250	1,85
35	2,2	2,3	11	10	2500	2,25

MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI:

Měřicí aparatura :mikrotvrdoměr ZWICK

měřený materiál tl. = 6mm měřicí parametry : HV 0.2

vzorek č. 11	č. měření							
	1	2	3	4	5	6	7	8
mikrotvrdost (HV0.2)	567,3	505,1	358,1	214,3	186,1	138,9	134,3	131,3
vzdálenost od hrany (mm)	0.03	0.045	0.055	0.075	0.12	0.2	0.25	0.285

vzorek č. 13	č. měření						
	1	2	3	4	5	6	7
mikrotvrdost (HV0.2)	507,1	358,4	205,4	186,4	179,9	138,9	130,7
vzdálenost od hrany (mm)	0.03	0.05	0.075	0.1	0.19	0.245	0.28

vzorek č. 15	č. měření						
	1	2	3	4	5	6	7
mikrotvrdost (HV0.2)	358,3	269,1	174,7	165,3	143,2	133,7	131,2
vzdálenost od hrany (mm)	0.025	0.05	0.07	0.1	0.175	0.265	0.29

měřený materiál tl. = 4mm

vzorek č. 17	č. měření						
	1	2	3	4	5	6	7
mikrotvrdost (HV0.2)	529,6	398,9	390,3	295,8	275,3	266,9	220,2
vzdálenost od hrany (mm)	0.015	0.02	0.04	0.065	0.085	0.145	0.15

8	9	10	11
191,7	180,2	144,9	134,7
0.17	0.3	0.62	0.69

vzorek č. 14	č. měření						
	1	2	3	4	5	6	7
mikrotvrdost (HV0,2)	543,2	381,9	373,9	359,9	310,6	247,3	190,7
vzdálenost od hrany (mm)	0,01	0,03	0,055	0,075	0,1	0,125	0,185

8	9	10
159,1	145,1	135,8
0,22	0,29	0,51

vzorek č. 11	č. měření						
	1	2	3	4	5	6	7
mikrotvrdost (HV0,2)	467,1	351,9	325,1	268,1	237,6	223,1	202,5
vzdálenost od hrany (mm)	0,025	0,055	0,085	0,13	0,185	0,235	0,29

8	9
157,2	140,7
0,37	0,42

Měření šířky tepelně ovlivněné oblasti:

tl. materiálu 4 mm	
vzorek č. 11	

tl. materiálu 4 mm	
vzorek č. 14	

tl. materiálu 4 mm	
vzorek č. 17	

zakalená	0,1
přechodová	0,15
ovlivněná	0,25

zakalená	0,05
přechodová	0,07
ovlivněná	0,12

zakalená	0,02
přechodová	0,09
ovlivněná	0,11

tl. materiálu 6 mm	
vzorek č. 11	

tl. materiálu 6 mm	
vzorek č. 13	

tl. materiálu 6 mm	
vzorek č. 15	

zakalená	0,02
přechodová	0,155
ovlivněná	0,175

zakalená	0,03
přechodová	0,13
ovlivněná	0,16

zakalená	0,01
přechodová	0,13
ovlivněná	0,14

Poznámka: " zakalená " resp. zpevněná oblast

Příloha č. 6

Měření úhlu rozevření:

konstantní: $F = 2000 \text{ mm/min}$, $p = 1.0 \text{ bar}$				
tl. mtr.	č. vzorku	Výkon LP (W)	Úhel rozevření	Druh rozevření
4, mm	31	1500	0,62378	P
	32	1750	0,49703	P
	33	2000	0,0222	P
	34	2250	0,96248	N
	35	2500	0,87441	N

konstantní: $P = 2500 \text{ W}$, $p = 1.0 \text{ bar}$				
tl. mtr.	č. vzorku	Rychlost posuvu (mm/min)	Úhel rozevření	Druh rozevření
8, mm	11	1000	0,39963	N
	12	1100	0,61984	N
	13	1200	0,81641	N
	14	1300	0,83621	N
	15	1400	0,60552	N

konstantní: $P = 2000 \text{ W}$, $p = 1.0 \text{ bar}$				
tl. mtr.	č. vzorku	Rychlost posuvu (mm/min)	Úhel rozevření	Druh rozevření
4, mm	11	1200	1,06343	P
	12	1400	0,64669	P
	13	1600	0,77345	P
	14	1800	0,64025	P
	15	2000	0,00002	P
	16	2200	0,85508	N
	17	2400	0,59156	N

konstantní: $P = 2500 \text{ W}$, $p = 1.0 \text{ bar}$				
tl. mtr.	č. vzorku	Rychlost posuvu (mm/min)	Úhel rozevření	Druh rozevření
6, mm	11	1200	0,11602	P
	12	1400	0,49082	N
	13	1600	0,73668	N
	14	1800	1,6358	N
	15	2000	1,546	N

konstantní: P = 1500 W, p = 1.0 bar				
tl. mtr.	č. vzorku	Rychlost posuvu (mm/min)	Úhel rozevření	Druh rozevření
2. mm	11	1500	2,92884	P
	12	2000	3,9827	P
	13	2500	3,90438	P
	14	3000	3,2894	P
	15	3500	2,11326	P
	16	4000	0,61012	P

konstantní: F = 1200 mm/min, P = 2500 W				
tl. mtr.	č. vzorku	Tlak plynu (bar)	Úhel rozevření	Druh rozevření
8. mm	21	0,6	0,32408	P
	22	0,7	0,80316	N
	23	0,8	1,32437	N
	24	1	1,5713	N
	25	1,2	1,23632	N
	26	1,4	0,58976	P