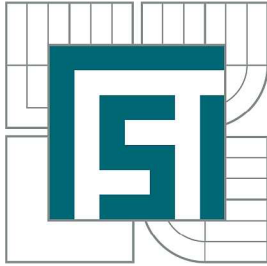


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING INSTITUTE OF
MANUFACTURING TECHNOLOGY

LASEROVÉ ŘEZÁNÍ S PODPOROU VZDUCHU

LASER CUTTING WITH AIR PRESSURE ASSISTANCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ KRAMOLIŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Kramoliš

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Laserové řezání s podporou vzduchu

v anglickém jazyce:

Laser cutting with air pressure assistance

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řezání materiálu laserem s podporou vzduchu leží na pomezí mezi oxidačním a tavným řezáním. Pro dané třídy a tloušťky materiálu (hlubokotažná ocel 11321) je však nutné najít soubory optimálních řezných parametrů.

Cíle diplomové práce:

Rozbor technologických možností metody laserového dělení materiálu.

Nalezení optimálních řezných parametrů (t.j. výkon laseru, řezná rychlost) pro ocelový, za studena válcovaný hlubokotažný plech síly 1 a 2 mm. Zjistit spotřebu stlačeného vzduchu. Vyhodnotit kvalitu řezné hrany a srovnat tento typ řezání s oxidačním a tavným řezáním-
Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Seznam odborné literatury:


1. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
2. DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II, 2vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7
3. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

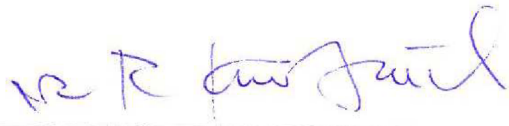
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 9.2.2010 14:58:3





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

KRAMOLIŠ Lukáš: Laserové řezání s podporou vzduchu.

Projekt vypracovaný v rámci inženýrského studia oboru N2301 popisuje laserové řezání s podporou vzduchu a jeho praktické využití v oblasti průmyslu. Práce je rozdělena na část teoretickou a experimentální, ve které je několik na sebe navazujících úkonů, jenž jsou podrobně popsány.

Teoretická část popisuje princip a funkci laseru, jednotlivé typy laseru a jejich dělení, vlastnosti laserového paprsku, laserové řezání atd.

Praktická část je zaměřena na nalezení souboru optimálních řezných parametrů, zjištění výsledků laserového řezání s podporou vzduchu na kvalitu a přesnost řezné plochy. Následné porovnání řezných ploch s konvenční technologií řezání laserem s podporou kyslíku a dusíku. V závěru je zhodnocena vhodnost využití této nekonvenční technologie s přihlédnutím na ekonomický pohled.

Klíčová slova: Ocel 11 321, ocel 17 240, laser, laserová technologie, laserové řezání

ABSTRACT

KRAMOLIŠ Lukáš: Laser cutting with air pressure assistance.

This project, elaborated within the engineering studies (code of field of study: N2301), deal with air supported laser cutting and its practical usage in industry. The project is divided into theoretical and experimental sections, consisting of detailed description of several successive steps of the experiment.

The theoretical section describes the principle and function of laser, individual types of lasers and their classification, laser beam properties, laser cutting, etc.

The practical part is focused on finding of a set of optimal cutting parameters, assessment of results of air supported laser cutting in terms of quality and accuracy of cutting surface. This part is followed by comparison of cutting surfaces with a conventional technology of laser cutting that uses oxygen and nitrogen. Final part of the project evaluates applicability of this unconventional technology from the economic point of view.

Keywords: 11 321 steel, 17 240 steel, laser, laser technology, laser cutting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRAMOLIŠ, L. *Laserové řezání s podporou vzduchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 129s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvoreni/publikace>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 20.5.2010

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Kramlís', is written above a horizontal dotted line.

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce RNDr.Liboru Mrňovi,Ph.D. za vedení, vstřícný přístup a cenné rady, které mi poskytoval v celém průběhu psaní této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jaroslavu Kubíčkovvi za umožnění odborných konzultací.

Můj dík patří také pracovníkům firmy Dendera a.s. se sídlem v Kanicích za možnost provedení experimentu a za poskytnuté materiály konstrukční nízkouhlíkové a korozivzdorné oceli. Děkuji také pracovníkům firmy IMI International s.r.o. Norgren CZ za možnost provedení měření drsnosti vzorků. V neposlední řadě děkuji své rodině za trpělivost a podporu během mého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
1. ÚVOD	11
I. TEORETICKÁ ČÁST	12
2. LASER	13
2.1. Historie laseru.....	13
2.2. Fyzikální princip laseru.....	14
2.3. Laserový paprsek a jeho vlastnosti.....	18
2.4. Konstrukce laseru.....	23
2.5. Požadavky na laserové zařízení.....	25
2.6. Dělení základních druhů laserů.....	27
2.7. Typy průmyslových laserů.....	28
3. LASEROVÁ TECHNOLOGIE	32
3.1. Laserové řezání.....	32
3.1.1. Tavné laserové řezání.....	34
3.1.2. Oxidační laserové řezání.....	35
3.1.3. Sublimační laserové řezání.....	35
3.1.4. Laserové řezání s podporou vzduchu.....	36
3.2. Parametry laserového záření použitého pro řezání.....	36
3.3. Výhody a nevýhody laserového řezání.....	39
3.4. Příklady výrobců laserových systémů.....	39
3.5. Vyhodnocení řezání laserem.....	40
3.6. Výroba stlačeného vzduchu pro laser.....	44
II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	46
4. POUŽITÉ MATERIÁLY	47
4.1. Ocel 11321.....	47
4.2. Ocel 17240.....	47
5. POUŽITÉ STROJE A ZAŘÍZENÍ	48
5.1. Laser Amada FO3015.....	48
5.2. Senzor proudění SD6000.....	49
5.3. Drsnoměr Hommelwerke LV-50E.....	50

6. PRACOVNÍ POSTUPY	51
6.1. Postup vystředění paprsku vůči trysce.....	51
6.2. Nastavení nulového bodu čočky	52
6.3. Kalibrace kapacity	52
7. NALEZENÍ OPTIMÁLNÍCH PARAMETRŮ	53
7.1. Nalezení optimálních parametrů při laserovém řezání oceli 11321	53
7.2. Nalezení optimálních parametrů při laserovém řezání oceli 17240	65
7.3. Laserové řezání oceli 11321 oxidační metodou	77
7.4. Laserové řezání oceli 17240 tavnou metodou	78
8. ZJIŠTĚNÍ SPOTŘEBY STLAČENÉHO VZDUCHU	81
8.1. Porovnání spotřeby plynu při řezání oceli 11321 tloušťky 1mm	82
8.2. Porovnání spotřeby plynu při řezání oceli 17240 tloušťky 1mm	83
8.3. Porovnání spotřeby plynu při řezání oceli 17240 tloušťky 2mm	84
8.4. Porovnání spotřeby plynu při řezání oceli 17240 tloušťky 3mm	85
9. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ DRSNOSTI ŘEZNÝCH PLOCH	86
10. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU	88
11. EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	90
12. ZÁVĚRY	93

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

1. ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá experimentem, jehož cílem je nalézt praktické využití laserového řezání s podporou vzduchu (řezání vzduchem) jako možná variantní náhrada stávajících metod. Každá metoda má ale závažný nedostatek, který brání jejímu univerzálnímu použití.

Podstatou je vypracování experimentální části, která se skládá z několika na sebe navazujících postupů. V první části je popsán rozbor technologických možností metody laserového dělení materiálu. V další části je popsáno hledání optimálních parametrů pro řezání laserem s podporou vzduchu pro hlubokotažný plech tloušťky 1 a 2mm a následné zjištění spotřeby stlačeného vzduchu. Další velmi důležitá část je zaměřena na vyhodnocení kvality řezné hrany řezané laserem s podporou nekonvenčního asistenčního plynu vzduchu a porovnání tohoto typu s řezáním tavným a oxidačním. V konečné fázi je provedeno zhodnocení výsledků experimentu a ekonomické vyhodnocení, které bude sloužit k závěrečnému shrnutí.

Současné požadavky na kvalitu, životnost a přesnost výrobků vyžadují stále nové nekonvenční technologie při výrobě. Jako nekonvenční označujeme technologie, u kterých nedochází k úběru materiálu v důsledku použití mechanické práce, ale využívají fyzikálních, chemických nebo kombinaci těchto dvou principů. Proto se stále častěji při výrobě setkáváme s technologiemi, které jsou často ekonomičtější a za kratší čas dosahují mnohem lepších výsledků.

V současné době se používá pro řezání vysoce legovaných ocelí, hliníku a korozivzdorných ocelí tavné laserové řezání s podporou dusíku (řezání dusíkem). Naopak k řezání nelegovaných ocelí se využívá laserové řezání s podporou kyslíku (řezání kyslíkem). Jedná se metody v oblasti výroby velmi rozšířené. Metoda laserové řezání s podporou vzduchu je v tomto oboru novinkou, která se za určitých podmínek použitelná jako varianta náhrady za současné metody. Laser se za dobu čtyřiceti let od svého vzniku uplatnil v celé řadě oborů. Jako zařízení se dnes používá v: medicíně, automobilovém průmyslu, technologických operacích ve výrobě, geodézii, metrologii, biologii, energetice, astronomii, vojenské technice atd.

I. TEORETICKÁ ČÁST

2. LASER

2.1. Historie laseru [1], [2], [5]

Slovo laser vychází z angličtiny. Je složeno z počátečních písmen anglického názvu popisující jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of radiation, což se dá přeložit jako zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření. Z názvu plyne, že laser vydává světlo, které se od běžného světla liší tím, že je jednobarevné, uspořádané a má malou rozbíhavost.

Cesta, která vedla k sestrojení prvního zařízení, začala už přes staletími. O světelný paprsek se zajímali už staří Řekové, avšak znalosti opodstatnění světla se až do 17. století nijak nezměnily. Nejdříve v 17. století se podařilo Isaacu Newtonovi rozložit bílé světlo skleněným hranolem na spektrum barev a poukázal, že se bílé světlo skládá z více barev. Newton se domníval, že světlo má částicový charakter. Se svou teorií dokázal objasnit všechny vlastnosti světla mezi které patří například odraz, lom a další. Newtonův současník Christian Huyghes viděl podstatu světla ve vlnění, které se šíří v prostoru stejnou rychlostí všemi směry z každého bodu na povrchu tělesa. Newton i Huyghes měli pravdu. Spor rozhodl až v 19. století svými pokusy s ohybem a interferencí světla Thomas Young. Interference je záležitost pouze vlnová. Jde o vzájemné působení stejných světelných vln se stejnou frekvencí a amplitudou v existujícím okamžiku a místě. Na otázku „Co se vlastně vlní?“ odpověděl vlastními výpočty James Clerk Maxwell na přelomu padesátých a šedesátých let 19. století. Z Maxwellovy teorie vyplynulo, že světlo není nic jiného než vlnění elektromagnetického pole. S úžasnou domněnkou přišel v roce 1900 Max Planck. Prohlásil, že energie, která vychází ze zářícího tělesa, neproudí ve spojitém toku, ale v určitých dávkách či kvantech. Dále dospěl k závěru, že energetické kvantum je úměrné frekvenci záření nebo jeho vlnové délce. Takhle se stal zakladatelem kvantové teorie. Planckův vyzařovací zákon byl počátkem cesty za převratnými objevy dvacátého století.

Počátky historie laseru se datují do roku 1917, kdy Albert Einstein poukázal, že vyjma jevů jako jsou samovolné emise a absorpce, musí existovat ještě stimulovaná emise. Další krok směrem k vynálezu laseru provedl ruský fyzik V.A. Fabrikant, jenž v roce 1939 ukázal na možnost využití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím. Později v roce 1951, společně s M.M.Vudynským a F.A.Butajevovou ohlásili patent na metodu zesilování elektromagnetického záření ultrafialového, viditelného, infračerveného a oblast radiových vln tím způsobem, že záření prostupuje prostředím, ve kterém je vytvořen nerovnovážený stav. Stav takového charakteru, že je upřednostňováno obsazení horních energetických stavů atomů.

Poprvé byla tato myšlenka uskutečněna pro zesilování záření v mikrovlnné oblasti. V roce 1952 sovětské fyzikové N.G.Basov a A.M.Prochorov na konferenci o radiospektroskopii přednášeli o molekulárním svazkovém generátoru – MASERu pracujícím se svazkem molekulárního čpavku. První maser sestavil Charles Townes, J.P.Gordon a H.J.Zeiger v roce 1953. Tento prototyp však nebyl schopný pracovat nepřetržitě. V roce 1964 získali Charles Townes, Nikolaj Basov a Alexandr Prochorov společně Nobelovu cenu za fyziku za zásadní výzkum o oboru kvantové elektroniky, který směřoval ke konstrukci oscilátorů a zesilovačů založených na principu maserů a laserů.

V roce 1960 předvedl první funkční rubínový laser v USA Theodore H. Maiman. V tomto roce se také podařilo sestavit první vodíkový maser. Od roku 1961 začal prudký vývoj různých typů laseru současně s vývojem laserové technologie. První polovodičový laser byl sestaven v roce 1962. V České republice se maser objevil v roce 1962 a laser o rok později.



Obr.2.1 První rubínový laser [5]

2.2. Fyzikální princip laseru [1], [3], [6], [7], [11], [13]

Laserový paprsek je elektromagnetické vlnění. Od jiných druhů záření se odlišuje pouze vlnovou délkou. Běžné světelné záření je vlnění, které obsahuje vlny nejrůznějších délek a frekvencí, spontánně vycházející různými směry. V laseru se poprvé podařilo vytvořit podmínky, za kterých se ve vhodném aktivním prostředí pod vlivem určitého stimulujícího elektromagnetického záření spontánní emise potlačí na úkor emise vynucené stimulujícím zářením.

Podstatou laseru je elektromagnetická vlna určité frekvence, která vynucuje přechod elektronů z vyšší hladiny na nižší, čím se zesiluje původní vlna. Lasery jsou v podstatě transformátory energie relativně nižší kvality na energii s vyšší kvalitou.

Podle kvantové fyziky může molekula či atom přijmout energii jen v určitých nejmenších dávkách – kvantech. Tyto kvanta jsou dané rozdílem mezi energetickými hladinami, které může elektron zaujmout. Vyjadřuje to Bohrovův vztah:

$$E = h \cdot \nu$$

kde

E je energetický rozdíl mezi hladinami [J]

h - Planckova konstanta [$J \cdot s$]

ν - frekvence vyzářeného fotonu [s^{-1}]

K tomu, aby došlo ke zvýšení počtu atomů v některé z vyšších energetických hladin je potřebné vnější působení, které se nazývá čerpání. Pro čerpání můžeme použít různé druhy energie. Obsazení energetických hladin se řídí Boltzmannovým rozdělením.

Boltzmannův vztah:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{h\nu}{kT}}$$

kde

N_1 je počet částic na hladině s nižší energií [-]

N_2 - počet částic na hladině s vyšší energií [-]

k - Boltzmannova konstanta [$J \cdot K^{-1}$]

T - teplota soustavy [K]

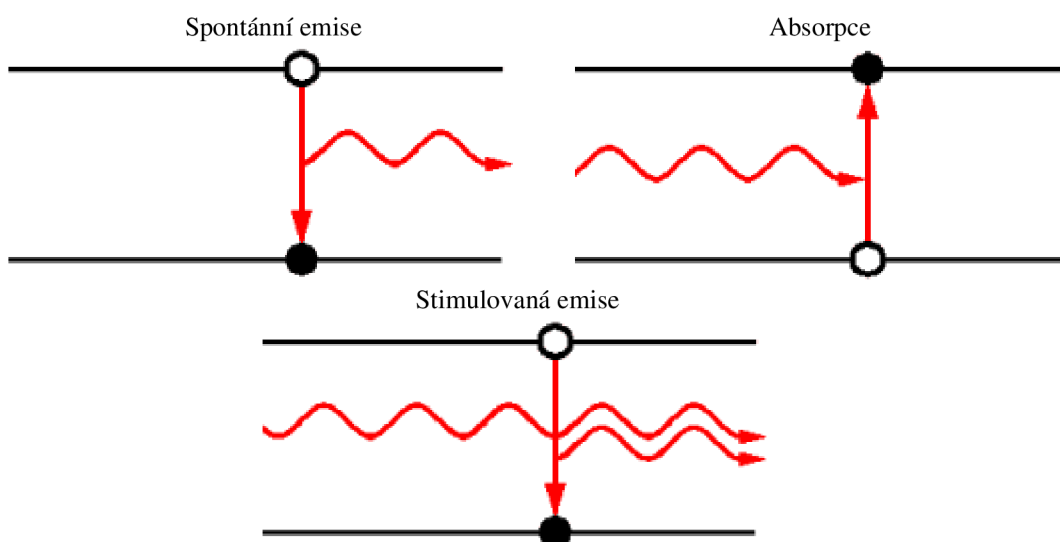
Po načerpání zůstávají atomy na metastabilní energetické hladině určitou dobu, přičemž může dojít k některým jevům:

spontánní emise - jde o zářivý kvantový přechod z vyšší energetické hladiny na menší (tento přechod nezávisí na působení vnějšího elektromagnetického záření)

relaxační přechody - jsou přechody vyvolané různými mechanismy (srážky částic)

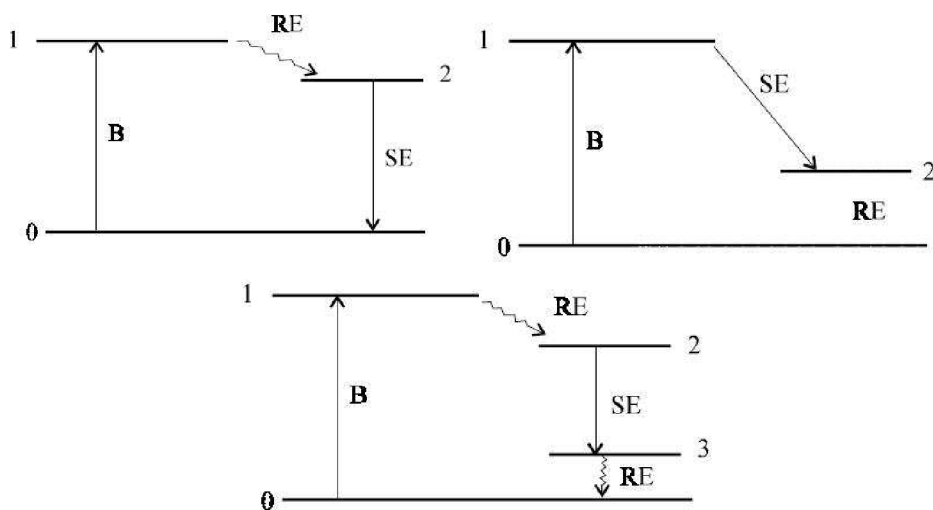
stimulovaná emise - je zářivý kvantový přechod z vyšší energetické hladiny na nižší, který je podmíněný existencí budícího elektromagnetického záření

absorpce - je pohlcení či zeslabení záření při jeho šíření aktivním prostředím



Obr.2.2 Fyzikální procesy v pracovní látce [7]

Stimulovaná emise je charakterizovaná tím, že nabuzený atom nacházející se na vyšší energetické hladině pod vlivem dopadajícího záření vyzářuje energii a přechází na nižší energetickou hladinu.



Obr.2.3 Hladinové modely [7]

1,2,3,4 - energetické hladiny, B - buzení (čerpání), SE - stimulovaná emise, RE - relaxace

- energetické schéma tříhladinového systému, kde hladina 2 je metastabilní
- energetické schéma tříhladinového systému s přímým buzením horní hladiny
- energetické schéma tříhladinového systému, kde hladiny 2 a 3 jsou metastabilní

Podle způsobu čerpání energie, relaxace a stimulované energie poznáme různé systémy, kterou jsou dané použitým aktivním prostředím. Aktivním prostředím je myšlena látka plynná, pevná či kapalná, která je nasycená více atomy na vyšších energetických hladinách. Buzení může být přímé či nepřímé. U nepřímého buzení je příjem energie potřebný na dosáhnutí inverze zprostředkovaný jinou látkou jako je aktivní látka.

Další důležitou podmínkou pro laser je zpětná vazba mezi vyzařovanými fotony, čím dochází k zesílení vycházejícího záření. Tuto funkci zajišťuje rezonátor. Provádí se tak, že aktivní prostředí je umístěné mezi dvěma zrcadly, ze kterých jedno je částečně propustné. Polopropustné zrcadlo propouští část vzniklé světelné vlny ven z aktivního prostředí a druhá část se vrací zpět, kde umožňuje další zesílení světla. Nejrozšířenějším a nejrozšířenějším rezonátorem je rovinný rezonátor s paralelními zrcadly. Jiným používaným typem je konfokální rezonátor, polokoncentrický či prstencový rezonátor. Správná funkce rezonátoru je zajištěna v tom případě, že v něm vzniká stojaté vlnění. Důležitá je vzdálenost zrcadel (L), která závisí na vznikajícím záření podle vztahu:

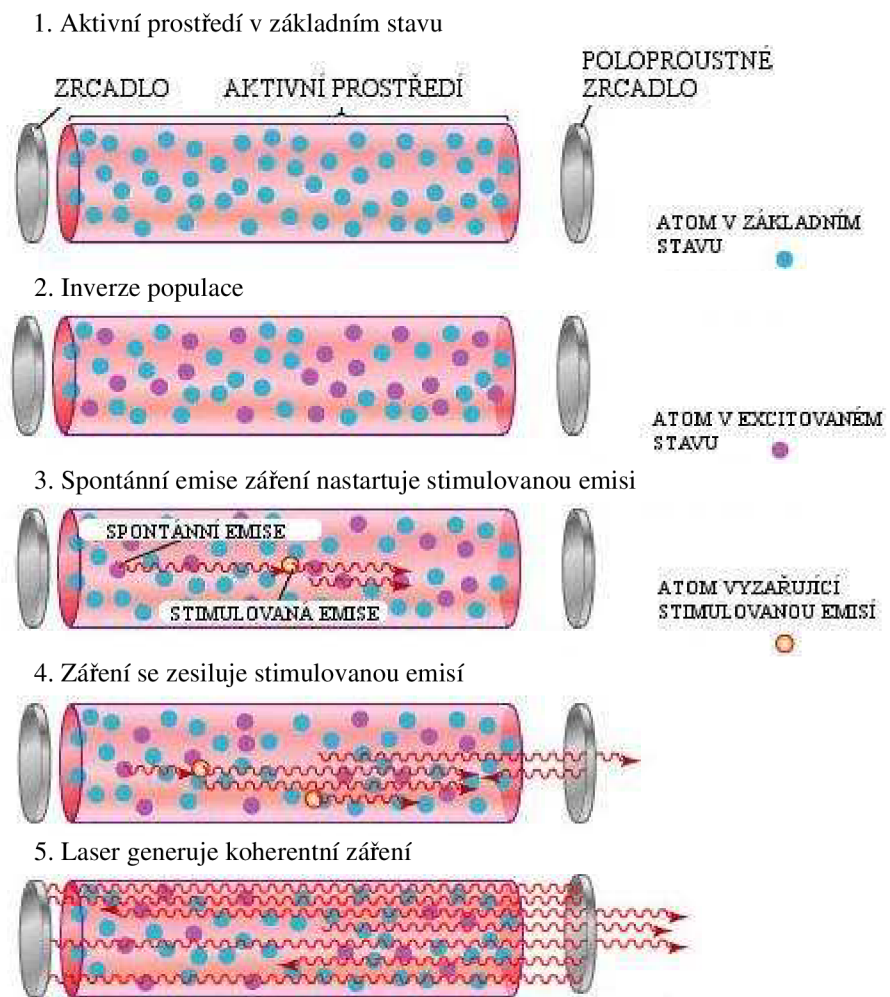
$$L = n \cdot \lambda$$

kde

L je vzdálenost zrcadel [m]

n - přirozené číslo [-]

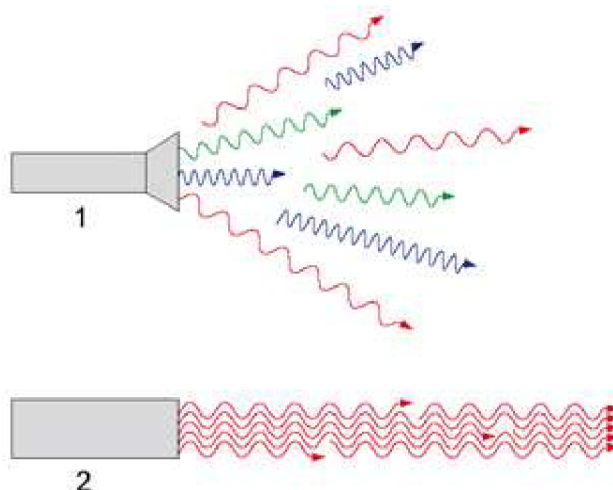
λ - vlnová délka záření [m]



Obr.2.4 Schéma buzení (čerpání) a vznik stimulované emise v rezonátoru laserového generátoru [6]

2.3. Laserový paprsek a jeho vlastnosti [1], [4], [7], [13], [18], [26], [28]

Díky speciálním vlastnostem laserového záření jsou v dnešní době lasery nepostradatelnou součástí. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří monochromaticnost, koherentnost, směrovost a módová struktura.



Obr.2.5 Vlastnosti záření žárovky a laseru [4]

1. Nesouvislé záření žárovky
2. Monochromatické, koherentní laserové záření

Monochromaticnost

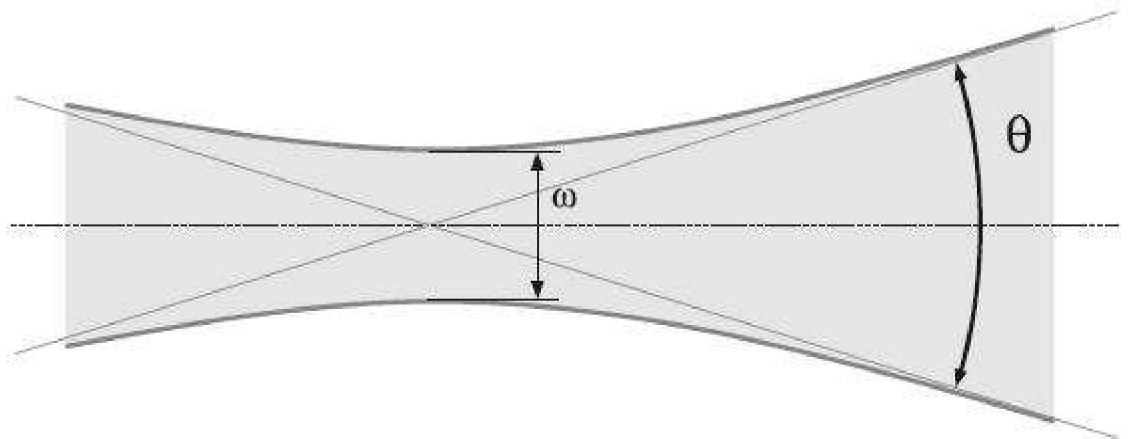
Monochromaticnost vyplývá z podstaty jevu stimulované emise. Laserový paprsek je tvořen fotony stejné vlnové délky. Reálné generátory splňují tuto podmínku s velmi malými odchylkami.

Koherentnost

Koherentní vlnění jsou taková, která mají stejnou frekvenci a jejich fázový rozdíl je v daném bodě neměnný.

Směrovost

Jednou z důležitých vlastností laserového paprsku je jeho velká směrovost. Podmíněná je tím, že záření na výstupu z laseru, na povrchu polopropustného zrcadla je koherentní (sfázované) na ploše, která je větší než vlnová délka záření. Směrovost je charakterizovaná prostorovým úhlem. V praxi se nazývá rovinný úhel divergence paprsku.



Obr.2.6 Parametry paprsku [4]

$$SPP = \frac{1}{2} \omega \cdot \frac{1}{2} \theta = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right) \cdot M^2$$

kde

SPP – parametr paprsku [$mm \cdot mrad$]

ω je průměr paprskového pasu [mm]

θ - úhel divergence (rozbíhavosti) ve vzdáleném poli [mrad]

λ - vlnová délka [mm]

π - Ludolfovo číslo [-]

K - šířící faktor paprsku ($K = \frac{1}{M^2}$) [-]

Modová struktura

V optickém rezonátoru existuje i elektromagnetické pole, které rozděluje amplitudu a fázi vlnění vznikajícího v rezonátoru. Toto rozdělení ovlivňuje transverzální elektromagnetický mód (TEM) pasivního rezonátoru.

Příčný mód může být definovaný v kartézských souřadnicích (TEM_{mn}) nebo v cylindrických (TEM_{pl}). Indexy m, n reprezentují počet minim v řezu paprsku ve vertikálním a horizontálním směru. Analogicky pro indexy p, l na počet minim v radiálním a úhlovém rozložení. Čím větší je hodnota indexu, tím větší je řád módu.

Mód nejnižšího řádu je mód TEM_{00} . Tento mód má Gaussovo rozložení intensity s maximum v ose. Většina technicky používaných laserů pracuje s vyššími módy. Rozdělení energie napříč paprskem u základního Gaussova módu je dáno vztahem:

$$I = I_0 \cdot e^{\left(-\frac{2 \cdot r^2}{r_0^2} \right)}$$

kde

I je intenzita záření v paprsku v závislosti od jeho radiálního rozměru [$W \cdot mm^{-2}$]

r - radiální vzdálenost od osy paprsku [mm]

r_0 - definovaný poloměr paprsku [mm]

I_0 - intenzita záření ve středu paprsku [$W \cdot mm^{-2}$]

Bezrozměrné číslo K vyjadřuje jak se reálný paprsek odlišuje od teoreticky ideálního Gaussova svazku, který má rozložení intenzity podle Gaussovy křivky. Laserový paprsek, který má toto rozložení má $K=1$.

Reálné výkonové lasery využívané v průmyslu jsou směsici základního a vyšších příčných módů, proto je K -číslo vždy menší než 1. Reálně se pohybuje v intervalu 0,5 – 0,95.

$$w_0 = \frac{1 \cdot 2 \cdot \lambda \cdot f}{K \cdot \pi \cdot D}$$

kde

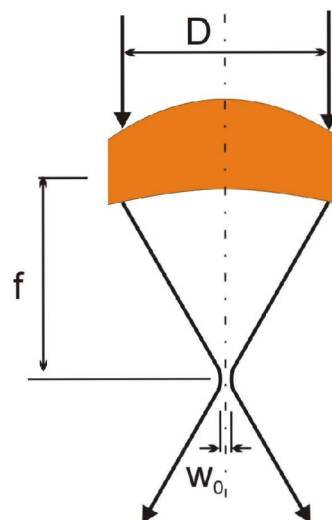
w_0 je průměr zaostřeného paprsku [mm]

λ - vlnová délka laserového paprsku [mm]

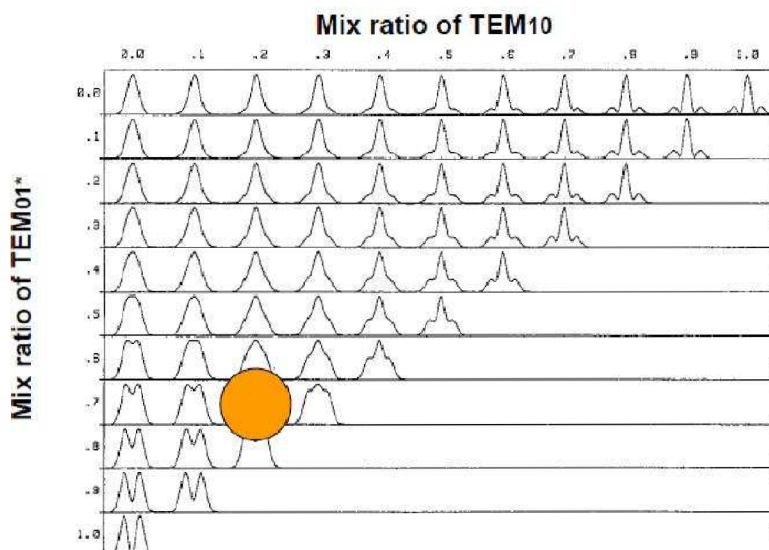
K - kvalita svazku [-]

f - ohnisková vzdálenost [mm]

D - průměr vstupního paprsku do čočky [mm]



Obr.2.7 Schéma zaostření paprsku [28]



Levý horní mód je čistý Gauss tedy TEM_{00} . Poslední mód v prvním řádku je zase čistý TEM_{10} a nejspodnější v prvním sloupci je zase čistý TEM_{01} . Takže výsledný mód laseru je přibližně:

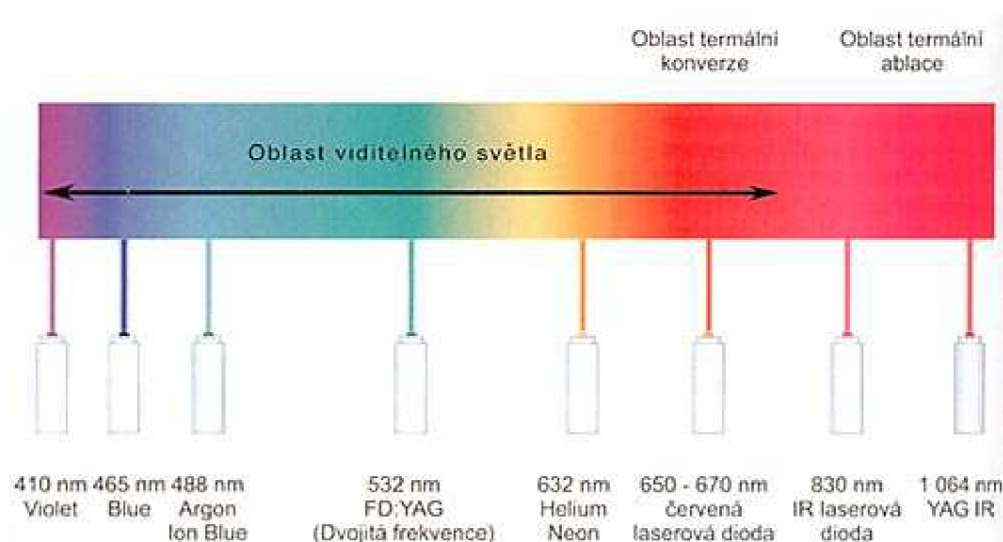
$$0,7 \cdot TEM_{01} + 0,2 \cdot TEM_{10}$$

Obr.2.8 Módová struktura průmyslového CO_2 laseru AMADA FO3015 [28]

Vlnová délka

Vlnová délka udávaná v nanometrech určuje, v jaké oblasti spektra se bude laserový paprsek pohybovat viz obr.2.9. Vlnová délka je navíc důležitá i pro velikost stopy laseru. Podle vlnové délky dělíme lasery na termální, u kterých je vlnová délka vyšší než 630 nm, lasery pracující ve viditelném světle 380 až 630 nm a lasery pracující v UV oblasti tj. pod 380 nm.

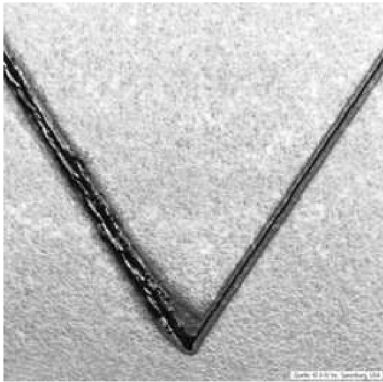
Laserovým paprskem v současné době s nejnižší vlnovou délkou v oblasti viditelného spektra je fialový laser 395 až 410 nm. Jedná se o laserovou diodu s velmi nízkou energetickou náročností asi 5 mW. Druhou laserovou diodou s velmi nízkou vlnovou délkou a podobnou energetickou náročností je modrý laser 465 nm. Oba tyto druhy jsou favority v oblasti viditelného spektra. Nejnižší vlnovou délkou mezi plynovými lasery má argonový laser 488 nm. Jedním z nejčastěji používaných laserů je krystalový Nd:YAG laser se zdvojenou frekvencí o vlnové délce 532 nm s energetickou náročností okolo 100 mW. Dalším využívaným laserem je plynový, Helium Neon laser o vlnové délce 632 nm. Na vlnové délce 650 nm začíná skupina červených laserových diod, emitujících na vlnových délkách 650, 670, 680 nebo 780 nm. Následují výkonné laserové diody s vlnovou délkou 830 a 870 nm a Nd:YAG IR lasery s vlnovou délkou 1 064 nm.



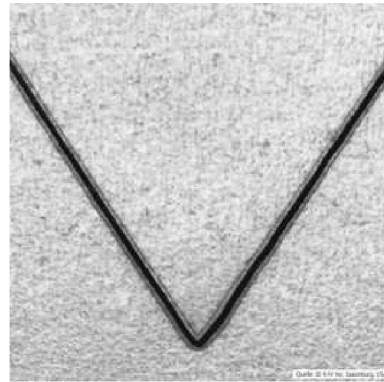
Obr.2.9 Vlnové délky různých typů laserů [18]

Polarizace paprsku laseru

Provádíme-li řezání s lineárně polarizovaným laserovým paprskem, tak výsledky kvality řezné hrany závisí na směru řezání. Pokud směr pohybu řezání odpovídá směru polarizace vlnění, tak je řez kvalitní a bez otřepů. U této polarizace můžeme docílit extrémně vysokých řezných rychlostí. Na druhou stranu pokud směr polarizace vlnění je kolmý na směr řezání, tak je hrana řezu nekvalitní s otřepy. Podobné účinky existují u laserového svařování, ale jsou méně zřetelné. Lineárně polarizované laserové záření je vhodné pouze pro aplikace, u kterých směr řezu je totožný se směrem polarizace.

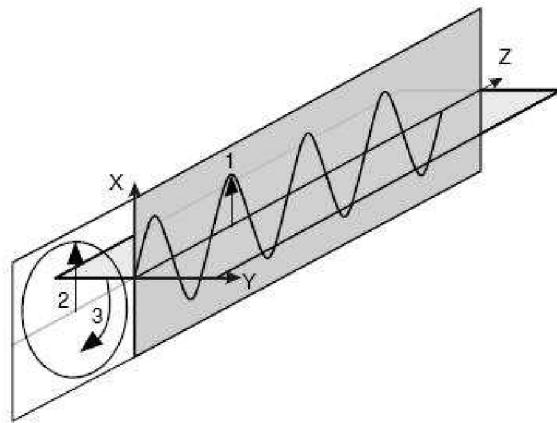


Laserové řezání s lineární polarizací vlnění



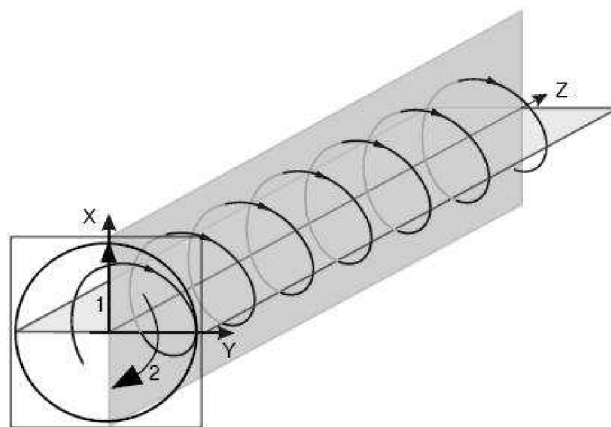
Laserové řezání s kruhovou polarizací vlnění

Obr.2.10 Vliv polarizace na řeznou hranu [4]



Obr.2.11 Lineárně polarizované záření [4]

Ve skutečnosti je žádoucí, aby řezání laserem zůstalo ve všech směrech stejně kvalitní. Tohoto je dosaženo použitím kruhově polarizovaného záření.



Obr.2.12 Kruhově polarizované záření [4]

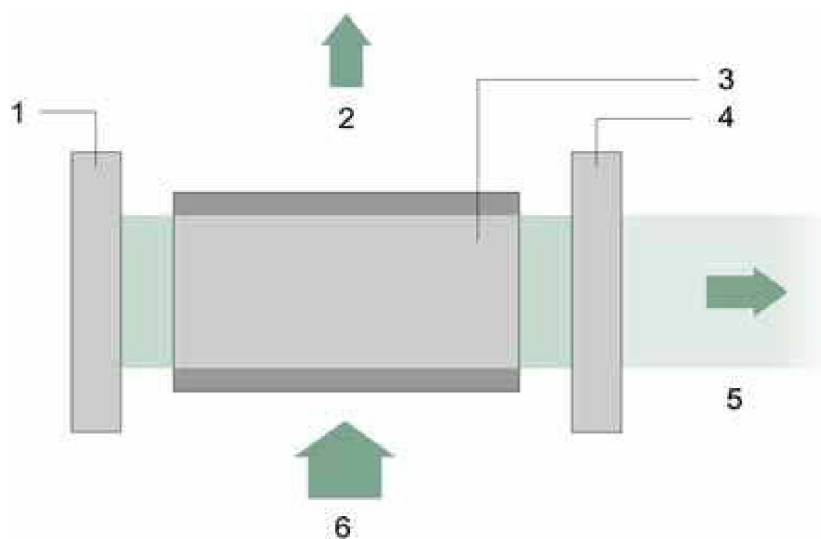
2.4. Konstrukce laseru [3], [4], [9], [26]

Každá soustava laseru se skládá ze tří podstatných částí. Mezi tyto části patří aktivní prostředí (aktivní látka), budící (čerpací) zdroje a rezonanční systém.

Vhodným buzením aktivní látky docílíme jevu, který se nazývá inverze populace. Jedná se o nerovnovážný stav, kdy existuje více atomů na vyšších energetických hladinách než na nižších. Inverze populace je uvnitř aktivního prostředí nezbytnou podmínkou pro to, aby docházelo k zesilování světla. Buzení (čerpání) může být optické (výbojka či dioda), elektrické (výboj nebo proud), chemické (chemická reakce produkující molekuly či ionty), expanzí plynu apod.

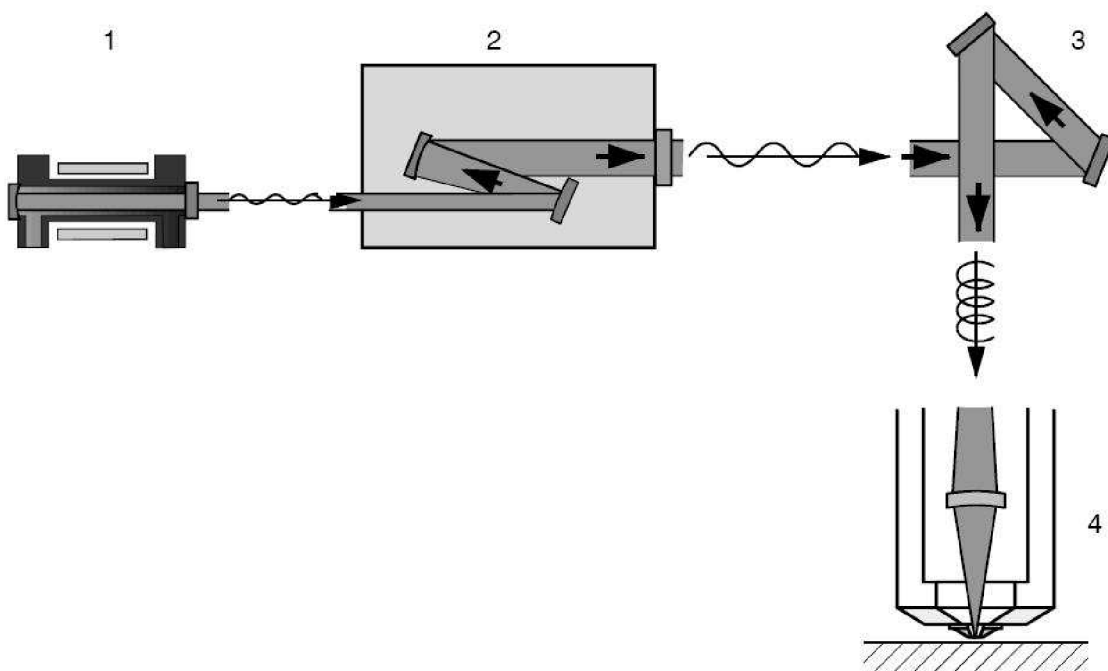
Aktivním prostředím je myšlena látka ať již plynná, pevná nebo kapalná, která je nasycena více atomy na vyšších energetických hladinách. Tyto atomy dále mohou emitovat dvojnásobnou světelnou energii. Aktivní prostředí je nejdůležitější částí laserového zařízení, neboť v něm vzniká stimulovaná emise.

Rezonátor je optická dutina, do které je vložena aktivní látka. Ve většině případů je rezonátor tvořen dvěma zrcadly, přičemž je jedno zrcadlo odrazové a druhé polopropustné a z venčí je opatřen chladičem. Pro správné provedení laseru je zapotřebí vybrat takové aktivní prostředí, ve které lze vytvořit inverzi populace energetických hladin elektronů a zároveň zabezpečit prostřednictvím rezonátoru kladnou zpětnou vazbu pro zesilování generovaného záření.



Obr.2.13 Konstrukce rezonátoru laseru [4]

1. Odrazové zrcadlo
2. Ztrátová energie (teplo)
3. Aktivní prostředí
4. Polopropustné zrcadlo
5. Laserový paprsek
6. Budící energie

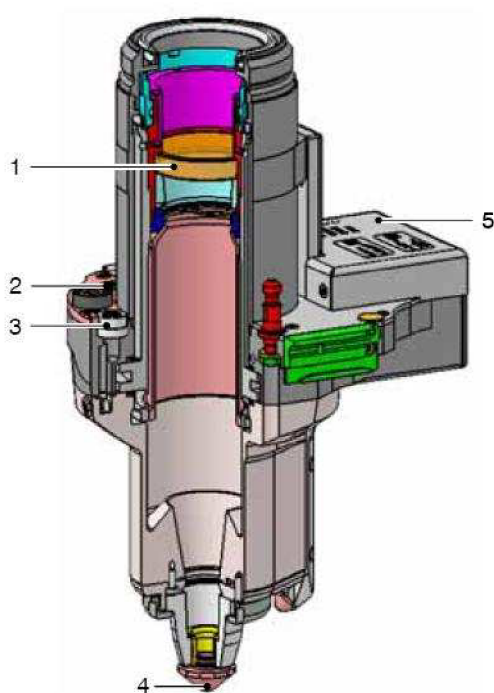


Obr.2.14 Konstrukce laseru [4]

1. Rezonátor
2. Teleskop pro zvětšení průměru laserového svazku
3. Polarizační zrcadlo a úhlová zrcadla pro vedení paprsku
4. Laserová řezací hlava s fokusační optikou

Konstrukce řezací hlavy

Čočky musí být transparentní pro danou vlnovou délku příslušného laserového paprsku. V případě nesplnění této podmínky dojde k absorpci laserového paprsku a ohřívání čočky. V nejhorším případě, kdy teplotní napětí překročí určitou mez, dojde ke zničení čočky. Při spálení čočky se uvolní látky, které jsou velice jedovaté a škodlivé lidskému zdraví. Chlazení se provádí buď přímo pomocí asistenčního řezného plynu nebo pomocí vodního okruhu.



Obr.2.15 Příklad konstrukce řezací hlavy laseru [4]

1. Zinek-selenidová čočka
2. Přívod vzduchu pro chlazení
3. Přívod asistenčního řezacího plynu (kyslík, dusík, vzduch)
4. Řezací tryska
5. Elektronika laserové řezací hlavy

2.5. Požadavky na laserové zařízení [8]

Na laserový systém pro technologické aplikace je kladeno několik zásadních požadavků, od kterých se odvíjí následná volba laseru:

Výkon laseru

Z hlediska technologických aplikací je rozhodující předně optický výkon laseru. Hodnota výkonu by se měla pohybovat v rozmezí 1 až 30KW.

Vlnová délka zařízení

Vlnová délka laserového záření je v přímém vztahu s přesností laserového obrábění - čím je kratší, tím vyšší přesnosti lze dosáhnout, přičemž tato přesnost je nepřímo úměrná druhé mocnině vlnové délky. Je tedy patrné, že je snaha využívat lasery s co nejkratší vlnovou délkou emitovaného záření.

Divergence laserového svazku

Divergence, neboli rozbíhavost laserového paprsku ovlivňuje to, jak dobře lze laserový paprsek fokusovat optickým systémem. Kvalitní, takzvaně jednomódové, laserové záření lze fokusovat do bodu porovnatelného s vlnovou délkou záření, zatímco u mnohamódových svazků je při použití stejné optiky minimální rozměr bodu mnohonásobně větší. Ze stejných důvodů jako u vlnové délky, je snaha využívat laser s co nejmenší divergencí paprsku.

Možnost přenosu záření optickým vláknem

Velkou předností laserového systému je, pokud lze jeho záření na místo aplikace dopravit prostřednictvím optického vlákna. Zvyšuje se tím mnohonásobně flexibilita takového laseru a velmi se rozšiřuje oblast možných použitelných aplikací.

Mobilita

Rozměry, hmotnost laseru a jeho energetická náročnost by měly poskytnout jeho snadnou transportovatelnost do místa určení.

Provozní náklady

Náklady na pořízení, provoz (spotřeba energie, chladících kapalin a pomocných náplní), údržbu (servis a výměna opotřebovaných dílů) a inovaci laserového zařízení by měly být logicky co nejnižší.

Účinnost laserového systému

Jedním z ekonomických hledisek použitelnosti laseru v průmyslových aplikacích hned vedle jeho pořizovací ceny a nákladů na údržbu jeho účinnost. Prvotním zdrojem energie běžně bývá elektrický proud a tak je snaha používat takové lasery, které mají vysoký poměr elektrického napájecího výkonu k výkonu užitečného laserového záření.

Robustnost, spolehlivost a stabilita laseru

Nutnou podmínkou pro průmyslové nasazení laseru je jeho vysoká spolehlivost a odolnost vůči vnějším vlivům, jako jsou otřesy, prach, vlhkost a změny teploty. Laser musí fungovat spolehlivě v širokém rozsahu pracovních podmínek a v případě poruchy musí být bezpečně odstaven.

Ekologické a bezpečnostní faktory

Moderní průmyslové zařízení musí splňovat hodně bezpečnostních a ekologických kritérií. Lasery všeobecně přispívají ke zlepšení ekologických podmínek provozu, na druhou stranu je ale laserové záření v mnoha případech velice nebezpečné lidskému zdraví, zejména zraku.

2.6. Dělení základních druhů laserů [1], [3], [11], [14]

Lasery je možné rozdělit podle:

- a) aktivního prostředí
- b) vlnové délky
- c) způsobu čerpání energie
- d) režimu paprsku
- e) výkonu
- f) použití

a) Dělení laserů podle aktivního prostředí

- plynové (atomární, molekulové, iontové)
- kapalinové
- pevnolátkové (rubín, yttrium aluminium granát)
 - tyčové
 - diskové
 - vláknové
 - polovodičové

b) Dělení laserů podle vlnové délky

- infračervené
- v oblasti viditelného pásma
- ultrafialové
- rentgenové

c) Podle způsobu čerpání energie lze dělit na lasery čerpané:

- opticky (výbojkou, slunečním světlem)
- elektricky (srážkami v elektrickém výboji)
- chemicky (energií chemické vazby)
- gazodynamické
- jadernou energií (jaderným výbuchem)

d) Dělení laserů dle režimu paprsku

- kontinuální
- pulzní

e) Dělení laserů podle dosahovaného výkonu

- nízkovýkonové (desetiny W až stovky W)
- vysokovýkonové (1kW až 30KW)

f) Podle použití dělíme na lasery

- výzkumné
- měřicí
- lékařské
- technologické
- vojenské

2.7. Typy průmyslových laserů [1], [4], [8], [10], [13], [17]

CO₂ laser

Jedná se o nejrozšířenější plynový laser, jehož aktivní prostředí tvoří molekuly oxidu uhličitého buzené doutnavým elektrickým výbojem. Záření generované tímto typem laseru spadá do vzdálené infračervené oblasti.



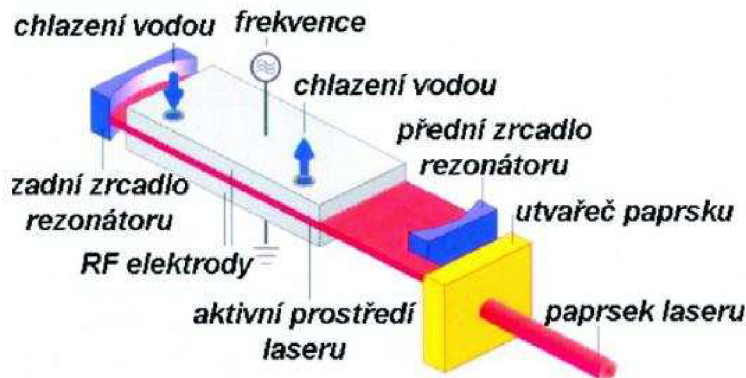
Obr.2.16 Laserový řezací stroj Trumpf Trumatic 3030L 3200W [10]

CO₂ lasery se vyznačují relativně vysokou účinností 8 – 10 %. V současné době pouze CO₂ laser dosahuje požadovaného rozsahu výstupních výkonů 1kW až 30 kW a proto patří mezi nejrozšířenější lasery. Nízkovýkonové typy jsou charakterizovány malými rozměry a velkou životností. Jejich výstupní výkony se pohybují až řádu 10 W. Výkony desítek až stovek wattů se generují systémy s několika metry dlouhými, vodou chlazenými trubicemi, ve kterých proudí aktivní plyn. Výkony až desítek kilowatů se pak získávají ve velkoobjemových systémech, kde je nutné průtočné chlazení plynové směsí.

Vyjma vysokého výkonu a velké účinnosti exceluje CO₂ laser ještě slušnou kvalitou laserového svazku. Ostatní vlastnosti jsou již nežádoucího rázu. Vlnová délka 10,6 μm se, nehledě k tomu že neprochází optickými vlákny a laserové záření je nezbytné do místa určení dopravit systémem zrcadel, příliš nehodí pro přesné obrábění.

Vzhledem k malé objemové hustotě výkonu CO₂ laseru vychází vysokovýkonové laserové systémy hodně velké a hmotné a zařízení není prakticky mobilní. Je to taktéž závislé na přívodu chladicí kapaliny a na dodávce pracovní plynové směsi, která vyjma oxidu uhličitého obsahuje také dusík a nákladné hélium.

Vzhledem ke složitosti a provozní náročnosti vyžaduje takové zařízení nepřetržitou kontrolu a údržbu. Přes tyto nedostatky nemá díky dosahovaným maximálním výkonům CO₂ laser dostupnou konkurenci a drží své místo především v oblastech, jako je svařování a řezání kovových plechů velkých tloušťek. Ke světoznámým výrobcům CO₂ laserů patří především německá firma Trumpf, Bystronic, Amada, Rofin-Sinar.



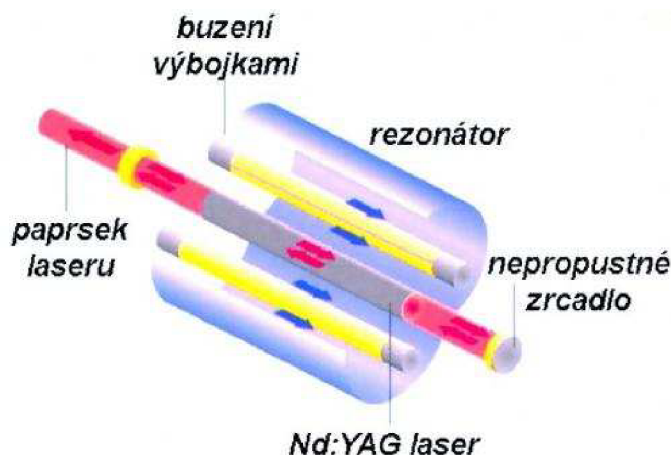
Obr.2.17 Konstrukce CO₂ laseru od firmy Rofin-Sinar s difusním chlazením [17]

Nd:YAG laser

Nd:YAG laser je pevnolátkový laser, jehož aktivním prostředím je opticky čerpaný Nd:YAG krystal (yttrium-aluminium granát dopovaný neodymem Nd³⁺). Nd:YAG je v dnešní době nejčastěji používaným pevnolátkovým laserem. Generuje za pokojové teploty v impulsním i kontinuálním režimu na vlnové délce 1064nm, případně s menší účinností i na vlnové délce 1320 nm. Metodami nelineární optiky je možno dosáhnout generace záření na vlnové délce 532 nm, případně 355 nebo 266 nm. Tento laser dosahuje na vlnové délce 1064 nm v kontinuálním režimu maximálního výkonu od stovek do tisíců wattů. V impulsním režimu se dosahuje energie pulsů do desítek jouůlů.

Délka impulsů od zlomku sekund do 5 piko sekund, podle druhu použité modulace kvality rezonátoru. Nd:YAG laser má rozsáhlou oblast použití, počínaje laserovým obráběním, přes laserové gravírování až po vrtání a svařování. Jeho největší výhoda spočívá ve vlastnostech použitého aktivního prostředí. Aktivní prostředí se skládá z krystalické látky, která je velmi stabilní a vyniká vysokou hustotou energie a akumulací schopností, umožňující generovat krátké vysokovýkonové pulsy. Konstrukce pevnolátkových laserů je ve srovnání s plynovými lasery jednodušší, údržba se omezuje na výměnu čerpacích výbojek.

Příznivá je i kratší vlnová délka ve srovnání s CO₂ laserem, která činí 1,06 μm. Záření u Nd:YAG laseru lze jednoduše přenášet optickými vlákny na vzdálenost několik desítek metrů. Nevýhodou tohoto laseru je poměrně nízká účinnost 2 až 3 %, značný elektrický příkon výkonových systémů a s tím propojená nutnost vodního chlazení systému. Uvedené nedostatky se v dnešní době pokouší odstranit několik výrobců nahrazením výbojkového čerpání čerpáním polovodičovými diodami. Takové systémy pak vynikají vysokou účinností 15 až 20 %, nižší spotřebou elektrické energie a chladicí vody a jiné lasery převyšují nízkou hmotností. Nevýhodou je ovšem velmi vysoká cena vysokovýkonových polovodičových laserových diod, která brzdí rozšíření takovýchto laserových systémů.



Obr.2.18 Konstrukce Nd:YAG laseru [17]

Vláknové lasery

Jako velmi perspektivní volbou k pevnolátkovému Nd:YAG laseru a plynovému CO₂ laseru se objevují v poslední řadě vláknové lasery. Aktivní prostředí laserů tvoří křemenná vlákna dopovaná prvky vzácných zemin mezi které patří Yterbium, Erbium, Neodym. Vláknové lasery pracují v kontinuálním režimu a vyzařují záření na vlnových délkách od 1000 do 1500 nm.

Pro buzení těchto laserů se s výhodou využívají nízkovýkonové polovodičové LED diody. Excelují dobrou kvalitou laserového paprsku, vysokou životností a účinností a nízkou cenou. Tyto vlastnosti na sebe přebírá i výsledný vláknový laser, který využívá možnosti paralelního spřažení velkého množství nízkovýkonových laserů do jednoho systému, takže lze jednoduše navrhnout systém jehož výsledný generovaný výkon se může pohybovat od stovek wattů až po desítky kW. V dnešní době jsou dostupné vláknové lasery s výkonem 2 – 4kW. Vyjma nízké spotřeby elektrické energie a vysoké účinnosti vynikají tyto lasery malou hmotností, vysokou spolehlivostí a kvalitou laserového svazku.

Díky dosahovanému výkonu mohou v budoucnu vystřídat i vysokovýkonové CO₂ lasery a mohly by poskytnout velké rozšíření laserových technologií do běžné praxe.

Excimerové lasery

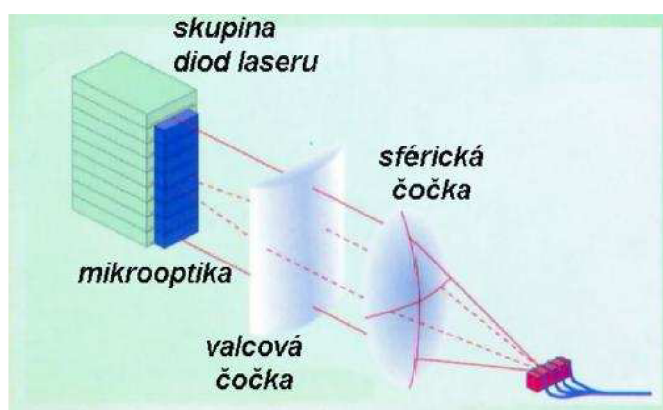
Excimerové lasery jsou plynové pulzní lasery, jejichž pracovní náplň se skládá ze směsi halogenidů a vzácných plynů např. Krypton-Fluor, Argon-Fluor. Aktivní prostředí je buzeno elektrickým výbojem. Významným důvodem použití těchto laserů je velmi krátká vlnová délka 157 nm, 193nm, 248 nm umožňující velmi přesné obrábění s přesností na mikrometry. Tyto lasery taktéž našly široké uplatnění ve fotolitografii.

Energie impulsů excimerových laserů dosahuje jednotky až desítek joulů, střední výkon bývá maximálně stovky wattů. Účinnost takovýchto systémů je relativně slušná až 10 %. Hlavní negativum spočívá ve komplikované údržbě a velmi drahém provozu. Vzhledem k malému rozšíření excimerových laserů je jejich vysoká pořizovací cena.

Polovodičové lasery

V dnešní době se zdají být polovodičové laserové diody (HDL) jako velmi nadějně. Jsou teprve na počátku průmyslového využívání. Tyto systémy vynikají elektrickou účinností 25 – 30%, protože přeměňují elektrický proud přímo na světelné záření. Vlnová délka emitovaného záření je taktéž velmi výhodná 800 – 900 nm a dnes se již vyrábějí laserové diody, jejich záření je přímo přivedeno do optického vlákna. Systémy HDL jsou taktéž velmi kompaktní, nenáročné na údržbu a velice lehké. Díky tomu se jednoduše integrují do stávajících zařízení.

Současně mají také všechny technické a provozně-ekonomické dispozice pro využití při pájení, lepení, popouštění, kalení, obrábění, navařování, gravírování, svařování umělých hmot, potrubí atd. Technologicky podmíněné nedostatky jako například velká divergence (rozbíhavost) laserového paprsku, teplotní závislost výkonu a malá provozní životnost jsou postupně cíleně optimalizovány. Kromě aplikací k přímému použití HDL se rozšiřují diodové lasery jako podpora obrábění. V kombinaci s číslicově řízenými obráběcími stroji se nabízejí lasery ke zpracování keramiky na bázi nitridů křemíku. Největší nevýhodou vysokovýkonových laserových diod je jejich pořizovací cena.



Obr.2.19 Konstrukce polovodičového laseru [17]

3. LASEROVÁ TECHNOLOGIE [1], [12]

S využíváním laseru se dnes setkáváme ve všech odvětvích života a všude jeho aplikace přináší podstatný pokrok v lidské činnosti.

Ve strojírenství patří v dnešní době laserové technologie mezi nejprogressivnější způsoby působení člověka na materiál ve výrobním procesu. S jejich pomocí je možné výrazně zvýšit kvalitu, technickou úroveň a produktivitu práce. Díky jim je dnes možné při inovačních cyklech výroby dosahovat takových parametrů výrobků, na které dosavadními technologiemi není možno dosáhnout.

Povšimněme si hlavně těchto tří strojírenských technologií, ve kterých je použití laseru již hodně zvládnuto a v řadě aplikací se úspěšně využívá:

- Laserové řezání
- Laserové svařování
- Tepelné zpracování laserem

Laserové řezání [1], [4], [8], [11], [12], [15], [16], [26]

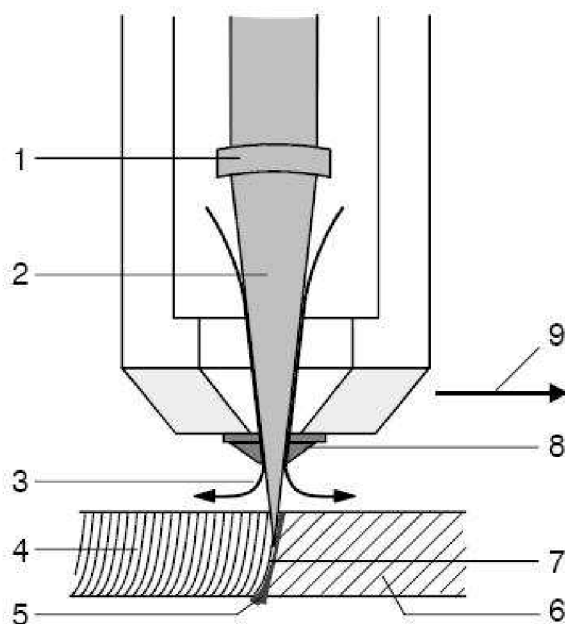
Dělení materiálů je nestále velmi důležitou nepostradatelnou výrobní operací. Používá se k tomu celá řada metod, každá z nich si vytvořila svoji oblast optimálního použití. Každá z nich má ale nějaký významný nedostatek, který zabraňuje jejímu univerzálnímu používání, a tak přicházejí stále další a modernější postupy.



Obr.3.1 Pohled do pracovního prostoru CO₂ laseru [15]

K nejnovějším metodám patří laserové dělení, při kterém zaostřený (fokusovaný) laserový paprsek s značně vysokou koncentrací výkonu umožňuje dělit materiály a slitiny prakticky nezávisle na jejich tepelně-fyzikálních vlastnostech. Dosahuje se přitom velmi malé šířky řezu s minimální tepelně ovlivněnou oblastí. Při laserovém dělení nedochází k mechanickému působení na zpracovávaný materiál a vznikají minimální deformace. Proto je možné dělit materiály s vysokou přesností, a to i materiály velmi snadno deformovatelné nebo křehké.

Vysoká koncentrace výkonu v laserovém svazku zabezpečuje vysokou produktivitu práce a vynikající kvalitu řezu. Jednoduché ovládání laserového svazku průmyslovým robotem nebo manipulátorem umožňuje dělit materiály i složitými křivkovými řezy na ploše i v prostoru. Z cenového hlediska je v dnešní době produkce z technologických pracovišť pro dělení materiálů laserem konkurence schopná ve srovnání s ostatními technologiemi dělení. Jedinou, ale nepochybně podstatnou nevýhodou zůstává vysoká cena zařízení.



Obr.3.2 Princip laserového řezání [4]

1. Fokusační (zaostřovací) optika
2. Laserový paprsek
3. Asistenční ochranný plyn
4. Rýhy po laserovém řezání
5. Roztavený kov nebo struska
6. Obrobek
7. Okraj řezu na obrobku
8. Laserová tryska
9. Směr řezání

Při laserovém řezání usilujeme o to co nejrychleji lokálně odtavit materiál za pomoci energie laserového záření při zachování co nejmenší zóny zasažené tepelnými účinky. Velmi efektivně lze laserovým paprskem řezat zvláště materiály s malou tepelnou vodivostí. Při řezání laserovým paprskem nehraje roli tvrdost materiálu, ale prvořadé jsou jeho optické a tepelné vlastnosti. Absorpci záření lze zvýšit příhodným povlakem. Na množství absorbované energie má vliv i jakost povrchu. Hrubý povrch absorbuje více než povrch vyleštěný.

Při řezání se pohybuje buď laserový paprsek po obrobku, nebo obrobek vůči paprsku. Ve většině průmyslových aplikací používajících laserové řezání se přivádí koaxiálně s laserovým paprskem na místo řezání proud plynu. Při řezání kovů se tak do místa vzájemného působení přivádí reaktivní plyn, jako například kyslík O_2 .

V současné době jsou pro průmyslové řezání nejpoužívanější kontinuální CO₂ lasery se středním výkonem do 6kW. Při řezání kovů je zapotřebí využívat lasery s výkony převyšující 1kW. Rychlost řezu závisí na vlastnostech materiálu, jeho tloušťce a druhu přídavného asistenčního plynu. Takto můžeme řezat např. ocelové desky kontinuálním CO₂ laserem s výkonem 6 kW do tloušťky 20 mm s rychlostí 1 m/min. Podobných výsledků bylo získáno i při řezání korozivzdorných oceli, titanových a jiných slitin. Metody řezání laserem můžeme rozdělit v závislosti na použitém řezném plynu na:

- Tavné
- Oxidační
- Sublimační
- Vzduchem

3.1.1. Tavné laserové řezání

U tavného řezání laserem je dělený materiál lokálně nataven a vzniklá tavenina se od základního materiálu odděluje proudem chemicky čistého inertního plynu, který se do místa řezu přivádí, ale na vlastním procesu řezání se nepodílí. V porovnání s ostatními metodami řezání laserem je možno u tohoto způsobu dosáhnout jen nižší řezné rychlosti. Maximální řezná rychlost roste lineárně s výkonem laseru a klesá přibližně lineárně s tloušťkou řezaného materiálu.

Tento způsob je vhodný hlavně k vytváření nezoxidovaných řezů kovových materiálů, jako např. vysoce legovaných ocelí, korozivzdorných ocelí, hliníku, mědi, mosazi a pozinkovaného plechu. Nejčastěji využívané plyny při tavném řezání jsou dusík či argon. Při řezání titanu nebo zirkonia aplikujeme právě zmiňovaný inertní plyn argon, protože titan je velice reaktivní kov a musí být chráněn před účinky kyslíku a dusíku popř. vzduchu. Pro dosažení minimálního chemického ovlivnění řezaného materiálu a kvalitních řezných hran s minimem okují je vhodné jako řezný plyn využít dusík vysoké čistoty, např. min. 99,999 objemových procent, což odpovídá hodnotě 5.0 a vysokého tlaku 1-2 MPa na trysce. V závislosti na kvalitě řezaného materiálu se můžou na spodní hraně řezu objevit otřepy, které je nutno odjehlit.



Obr.3.3 Součást vyrobená řezáním laserem s podporou dusíku [4]

3.1.2. Oxidační laserové řezání

Oxidační řezání laserem se od tavného řezání liší jen použitím kyslíku jako řezného plynu. Čistota kyslíku se pohybuje kolem hodnoty 3,5 což znamená 99,95 objemových procent. Tlak kyslíku při výstupu z řezné dýzy je 5 barů pro tenké materiály o tloušťce 1 až 3 mm, pro tloušťky materiálu do 10 mm je tlak cca 1 bar a pro silnější materiály je obvykle nastaven na hodnotu pod 1 bar. Vzájemným působením kyslíku s roztaveným povrchem kovu vzniká exotermní reakce, která má za následek další ohřívání materiálu. V důsledku tohoto účinku je možné dosáhnout u nelegovaných a nízkolegovaných ocelí vysokých rychlostí řezání, řez je avšak širší a horší kvality, s větší drsností a s větší tepelně ovlivněnou oblastí.

Tento způsob není použitelný pro zhotovování ostrých geometrických tvarů, malých otvorů, apod. Jistým východiskem je přechod na pulzní provoz laseru, kdy se řezaný materiál v mezeře mezi jednotlivými pulzy ochladí a nenastává exotermní reakce. Další vylepšení kvality řezu lze dosáhnout regulací výkonu laseru, který musí být optimalizován dle tloušťky materiálu.



Obr.3.4 Kvalita plochy při řezání laserem s podporou kyslíku [4]

3.1.3. Sublimační laserové řezání

Sublimační způsob řezání, při kterém se materiál v místě řezu odpařuje, se dnes velmi málo využívá. Pro minimalizaci tavné zóny, která vzniká na hraně řezu, je nutná vysoká hustota energie laserového svazku. Zároveň se musí kontrolovat tloušťka řezaného materiálu, která nesmí být větší než průměr paprsku, aby páry materiálu znovu nezkondenzovaly a nesvařily řez. Tato omezení platí u materiálů, u nichž vzniká tekutá fáze. U materiálů, které se netaví, např. dřevo, keramika apod., omezovací faktor tloušťky neplatí. Sublimační řezání potřebuje pečlivé nastavení optiky v závislosti na tloušťce materiálu. Maximální řezná rychlost je nepřímo úměrná odparnému teplu materiálu a přímo úměrná rychlosti proudění řezného plynu.

3.1.4. Laserové řezání s podporou vzduchu

Tento způsob řezání laserem je hybrid, který leží mezi tavným a oxidačním řezáním. Jako asistenční plyn je použitý vzduch. Vzduch je tvořen: cca 21%O₂ , 78%N₂ a dalšími prvky.

Výhody:

- jednoduchá výroba stlačeného vzduchu
- možnost výroby stlačeného vzduchu přímo na pracovišti
- cenově výhodnější oproti dusíku a kyslíku

Nevýhody:

- větší omezení řezané tloušťky materiálu
- dosažení horší kvality řezné plochy

3.2. Parametry laserového záření použitého pro řezání [12]

Laserový paprsek je definován svojí vlnovou délkou, výkonem, rozdělením hustoty energie v příčném průřezu, polarizací, divergencí a průměrem. Pro dosažení nezbytné hustoty energie pro řezání je laserový svazek zaostřen (fokusován) optikou, která je dána ohniskovou vzdáleností, transparentí, absorpcí a reflexivitou, fokusační plochou a hloubkou ostrosti. Řezný proces potom ovlivňuje poloha ohniska fokusační optiky ve vztahu k povrchové ploše materiálu. Celá řada parametrů je definována výrobně a nelze je u daného laseru změnit, pro vlastní technologický proces jsou klíčové jen tyto parametry:

- výkon laserového paprsku
- transparence (propustnost) fokusační optiky
- ohnisková vzdálenost optiky
- poloha ohniska ve vztahu k povrchové ploše obrobku
- řezná rychlost
- odstup trysky od plechu

Tepelně-fyzikální vlastnosti řezaného materiálu

- reflexivita řezaného materiálu rozhodující pro vlnovou délku laserového paprsku
- hustota materiálu
- tepelná kapacita
- skupenské teplo tání
- skupenské teplo výparné
- tepelná vodivost
- teplota tání
- teplota vypařování
- chemická energie vzniklá při reakci řezaného materiálu s kyslíkem
- elektrický odpor materiálu

Parametry řezného plynu pro řezání jsou podstatné tyto parametry řezného plynu:

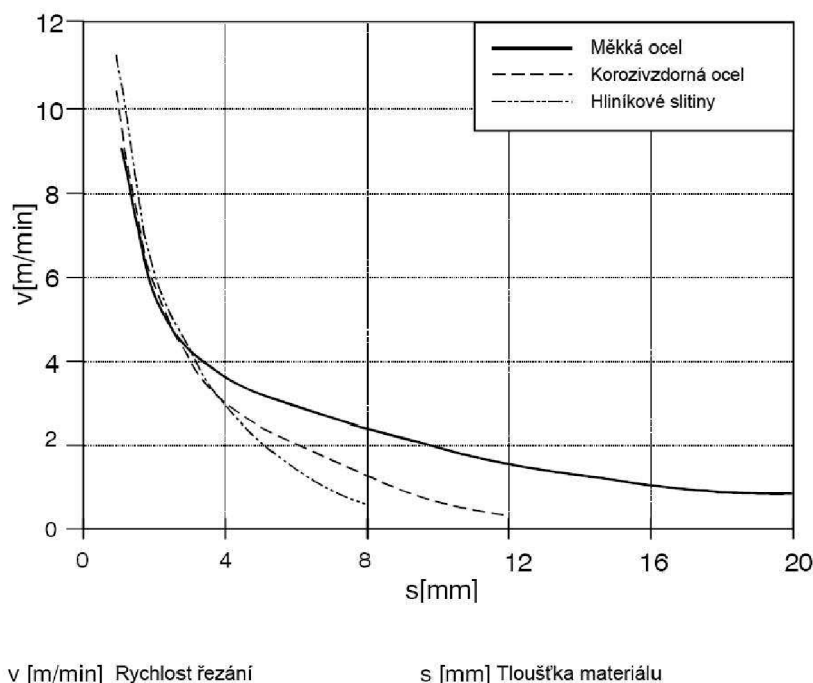
- druh plynu
- pracovní tlak
- průměr trysky, kterou proudí řezný plyn
- geometrie tvaru trysky

Tlak plynu a geometrie tvaru trysky ovlivňují kvalitu řezu, drsnost povrchu řezné plochy a tvorbu otřepů. Tlak plynu při nízkotlakém řezání bývá do 100 kPa. Při řezání středotlakém se pohybuje do 500 kPa a při řezání vysokotlakém do 2 MPa. Konvenční trysky mají kruhový, kuželovitě se rozšiřující otvor. Vzdálenost trysky od materiálu musí být co možno nejmenší, aby plyn optimálně pracoval v řezné drážce. Běžně se pohybuje mezi 0,5 - 2,5 mm. Na odstranění taveniny z drážky se podílí jen ta část plynu, která do ní vstupuje. Proto se příznivě projevuje průměr trysky přibližně rovný šířce řezné spáry řezu. Takto malý průměr se však brzy znečistí a znemožňuje další řezání. Proto v praxi leží průměr trysek mezi hodnotami 1 - 2,5 mm. Spotřeba řezného plynu závisí na průměru trysky a tlaku plynu.

Řezací rychlost laseru

Řezací rychlost je definovaná jako relativní rychlost mezi nástrojem, tj. řezacím hořákem a zpracovávaným kusem.

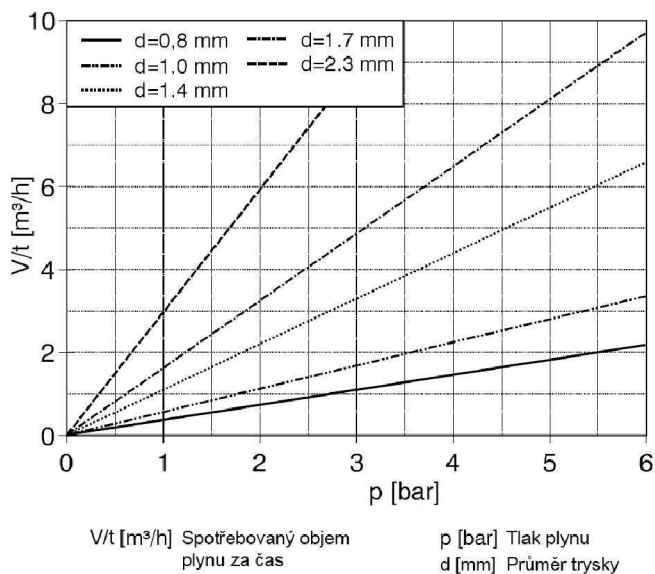
Stejně jako výkon laseru, musí být i rychlost řezání přizpůsobena druhu a tloušťce materiálu. Chybně zvolena rychlost řezání může vést k vysoké drsnosti, otřepům a k nekvalitnímu řezu. S vyšší rychlostí řezání roste přibližně lineárně potřebný výkon laseru.



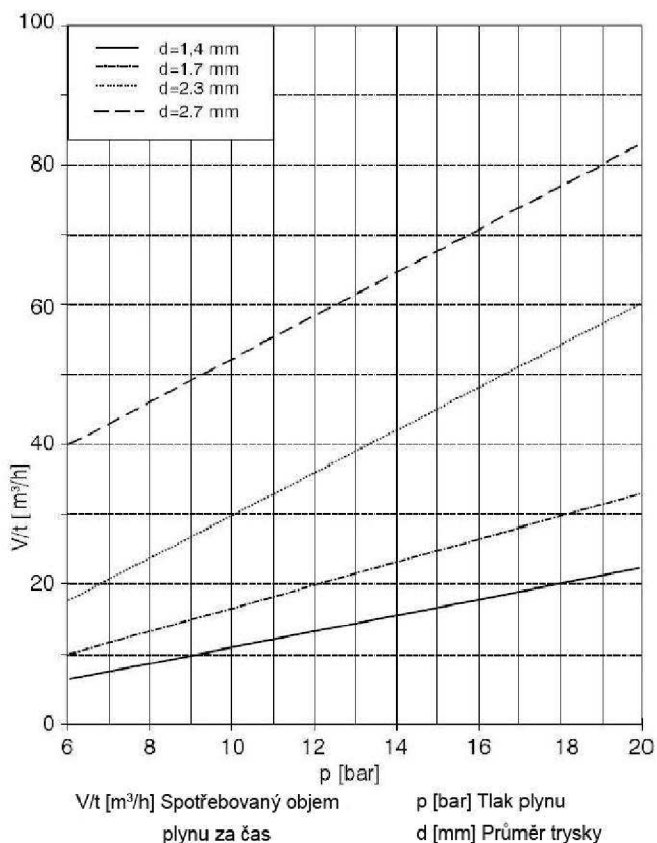
Obr.3.5 Maximální rychlost řezání 4kW laserem v závislosti na druhu a tloušťce materiálu [4]

Spotřeba plynu při řezání laserem

Spotřeba plynu při řezání je závislá tlaku plynu a velikosti výstupního průměru trysky. Čím větší je tlak plynu a velikost průměru trysky, tím je větší spotřeba plynu viz obrázky 3.6 a 3.7. Uváděné hodnoty spotřeby plynu za čas jsou uvedeny v Nm^3/h .



Obr.3.6 Maximální spotřeba plynu za hodinu při řezání kyslíkem do tlaku 6 barů [4]



Obr.3.7 Maximální spotřeba plynu za hodinu při řezání dusíkem do tlaku 20 barů [4]

3.3. Výhody a nevýhody laserového řezání [11]

Výhody

- vysoká přesnost řezaných dílů u slabých a středních tloušťek materiálů
- řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků, tvarů s ostrými úhly
- řezná hrana kolmá vůči povrchu
- velmi malé přivedené teplo, malé deformace obráběného kusu
- velmi malá šířka řezné spáry (0,2 - 0,4 mm)
- vysoká řezná rychlost
- lze řezat téměř všechny technické materiály

Nevýhody

- vysoké pořizovací a provozní náklady
- omezení tloušťky materiálu: konstrukční ocel do 25mm, vysokolegovaná ocel do 15 mm, hliník do 10 mm
- nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku
- hrubý řez u řezání konstrukční oceli s vyšším obsahem Si a P
- snížení stability procesu u řezání lesklých povrchů
- menší účinnost (CO₂ - laser max. 10%)

3.4. Příklady výrobců laserových systémů [8]

Trumpf

<http://www.trumpf.com>

Německý producent průmyslových CO₂ laserů a laserových systémů s výkonem od 700 W do 20 kW pro řezání, svařování a modifikace povrchů. Vyjma CO₂ laserů vyrábí tato firma také pulzní Nd:YAG lasery se středním výkonem do 650 W a kontinuální Nd:YAG lasery s výkonem do 6 kW.

Coherent

<http://www.coherent.com>

Americká firma, která se zabývá širokou oblastí produktů na bázi laserů a laserových diod a včetně měřicí a diagnostické techniky.

Bystronic

<http://www.bystronic.cz>

Švýcarská společnost zabývající se širokou oblastí služeb pro řezání laserem, vodním paprskem a ohýbání.

Amada

<http://www.amada.de>

Japonská společnost, která se zabývá výrobou strojů na zpracování plechů. Zejména se jedná o laserové stroje s řídicí jednotkou Fanuc.

Rofin-Sinar

<http://www.rofin.com>

Německý výrobce laserových systémů pro průmyslové zpracování materiálu včetně řezání laserem, svařování laserem, značení a povrchové úpravy.

Electrox

<http://www.electrox.com/>

Firma se sídlem ve Velké Británii, která se zabývá výrobou laserových systémů pro značkování, svařování a řezání.

PRC Laser

<http://www.prclaser.com>

Americká společnost vyrábějící výkonové CO₂ lasery pro řezání a svařování.

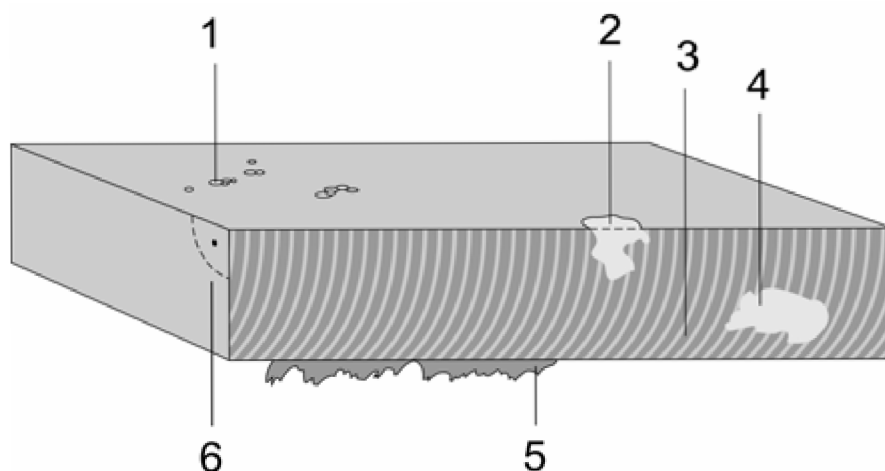
Continuum

<http://www.continuumlasers.com>

Americký lídr a výrobce pulzních pevnolátkových systémů pro vědecké a komerční aplikace.

3.5. Vyhodnocení řezání laserem [4], [19], [26], [29]

Jako kritéria vyhodnocené pouhým okem můžeme brát například vydrolení materiálu, otřepy či rýhy po řezání. Pro přesnější vyhodnocení lze využít doplňkové zařízení pro měření drsnosti, kolmosti a šířky mezery řezné spáry. Vyhodnocení řezné plochy probíhá dle normy ČSN EN ISO 9013.



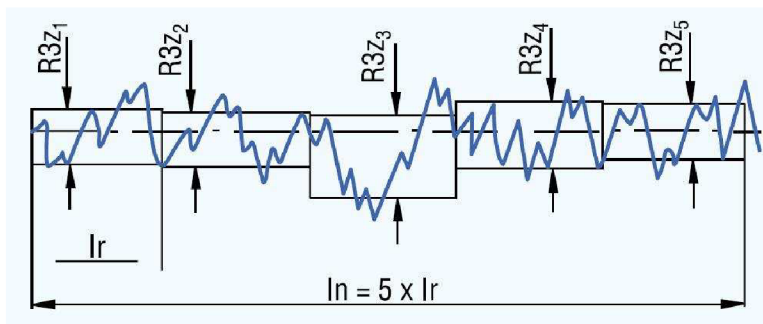
Obr.3.8 Kritéria hodnocení kvality řezné plochy [4]

1. Opatření během skladování
2. Vydrolení materiálu
3. Rýhy po řezání laserem
4. Eroze
5. Otřepy
6. Kolmost

Drsnost

Drsnost R_a je definovaná jako střední aritmetická hodnota absolutních úchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky l_r .

Drsnost $R_{3z}(R_{z5})$ je definovaná jako aritmetický průměr pěti jednotlivých drsností R_{3z1} až R_{3z5} jako vyhodnocení vzdálenosti třetích nejvyšších špiček a rýh uvnitř jednotlivých základních délek.



Obr.3.9 Základní drsnost R_{3z} [29]

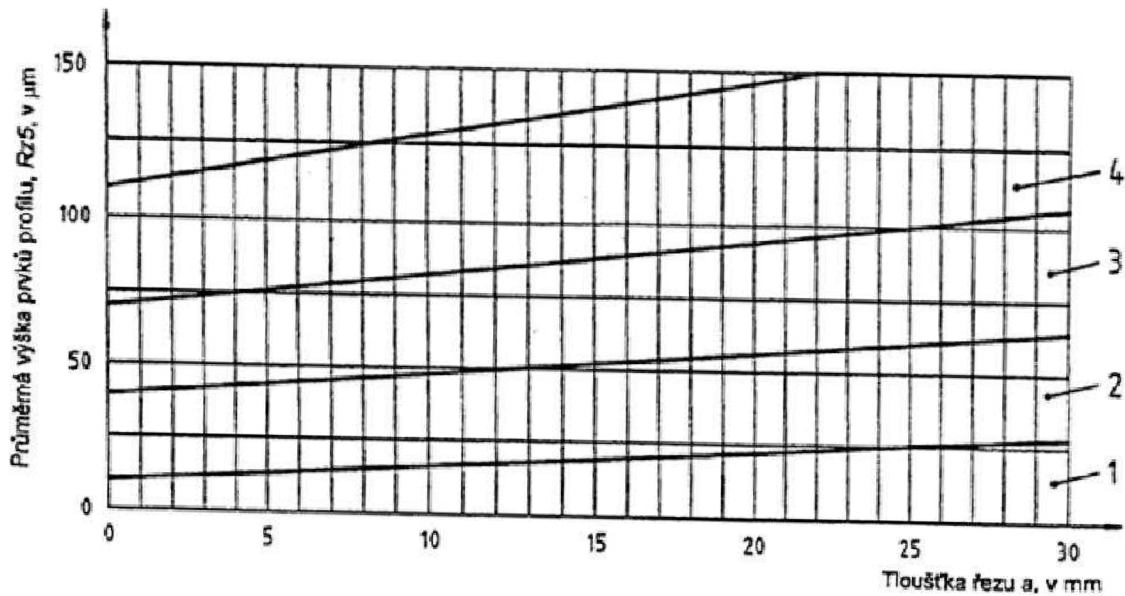
Průměrná výška profilu R_{z5}

Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu R_{z5} jsou uvedena v tabulce 3.1 a v grafu 3.1.

Tabulka č.3.1 Průměrná výška profilu R_{z5} [19]

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu, R_{z5} μm
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,8a \text{ mm})$

Graf č.3.1 Průměrná výška prvků profilu Rz5 [19]

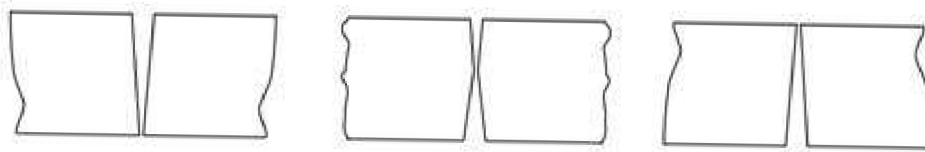


Při řezání materiálu pomocí laserového paprsku jsou rýhy v rovině rovnoběžné k ose paprsku. Drsnost je určena hloubkou těchto rýh v řezné rovině. U řezání laserem se drsnost zvyšuje s rostoucí tloušťkou materiálu.

Tvar a šířka řezu

Šířka řezu je definovaná jako vzdálenost mezi povrchy řezu na horní hraně řezu nebo pokud došlo k natavení horní hrany, bezprostředně pod tímto natavením hrany, způsobeným řezacím paprskem.

Při řezání laserem obvykle nastává situace, kdy není rovnoběžné horní ostří vůči spodnímu ostří.



Obr.3.10 Typy řezů při řezání laserem [4]

Šířka řezu se zvětšuje s rostoucí tloušťkou materiálu, Záleží na těchto faktorech:

- ohniskový průměr
- materiál
- vlnová délka
- postup řezání

Šířka řezné spáry se pohybuje mezi 0,15mm (u tloušťky materiálu 1 až 6 mm) a až 0,5mm (u tloušťky materiálu 20 až 30 mm). Šířka řezné spáry musí být konstantní po celé pracovní ploše, jinak rozměry řezaných částí budou nepřesné.

Otřepy

Jsou jedním z nejdůležitějších kritérií pro vyhodnocování řezu zhotovené laserem. Je tomu tak, protože otřepy musí být vždy odstraněny. Tím pádem je zapotřebí dodatečné operace. Může vzniknout několik druhů otřepů. Od drobných otřepů, které lze snadno odstranit až po ostré a tvrdé otřepy, které lze odstranit například broušením.

Materiál a výkon laseru

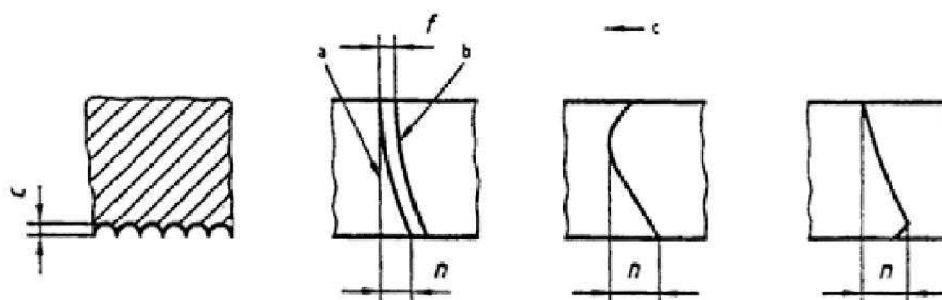
Danému laseru musí být přizpůsoben řezací postup, typ materiálu a jeho tloušťka. Maximální tloušťka materiálu, kterou lze řezat, závisí na druhu daného materiálu a výkonu laseru. S rostoucí tloušťkou materiálu roste přibližně lineárně potřebný výkon laseru.

Provozní režim

Při využití nepřetržitého nebo pulzního režimu je možno ovládat množství energie, které musí být přivedeno do obrobku.

Skruz

Skruz je definován jako průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání.



Obr.3.11 Skluzová rýha [19]

kde

a je referenční přímka

b - skluzová rýha

c - směr posuvu

n - vzdálenost mezi dvěma body skluzové rýhy

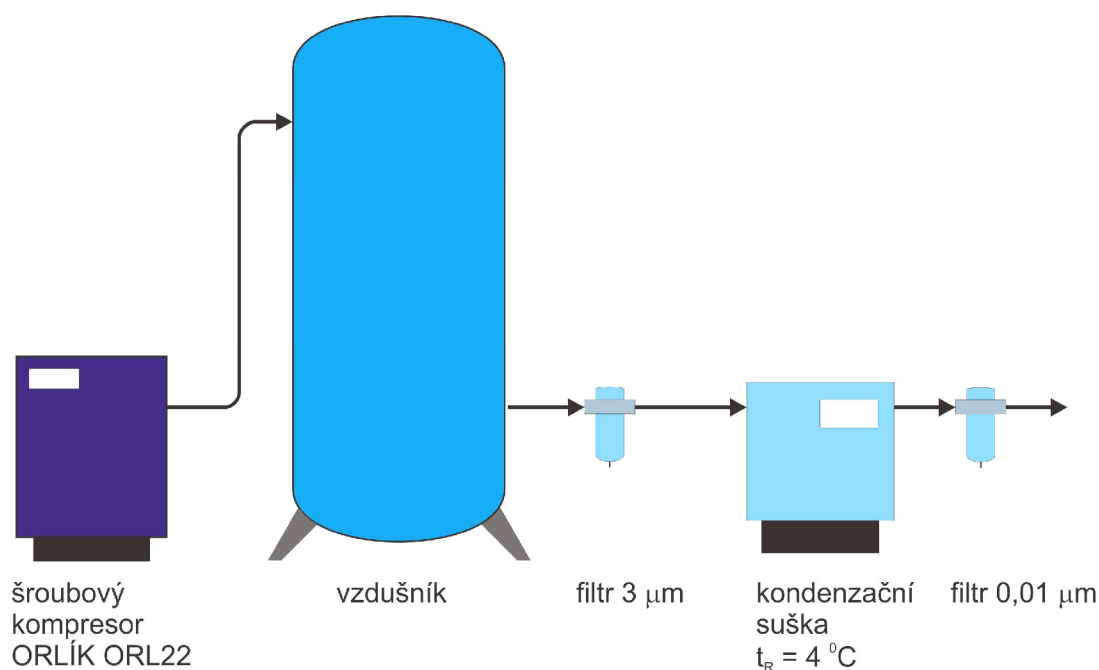
C - velikost otřepů

f - vzdálenost mezi dvěma body dvou skluzových rýh

3.6. Výroba stlačeného vzduchu pro laser [30], [31]

Postup výroby stlačeného vzduchu je následující:

Šroubový kompresor nasává vzduch z okolní atmosféry přes vzduchový filtr. Stlačený vzduch putuje potrubím do vzdušníku kde se hromadí. Dále následuje filtr, který nepropustí částice větší než $3\ \mu\text{m}$. V kondenzační sušce probíhá kondenzace vlhkosti v tlakovém vzduchu. Před vypuštěním tlakového vzduchu do pátevní sítě následuje filtr, který nepropustí částice větší než $0,01\ \mu\text{m}$.



Obr.3.12 Schéma výroby stlačeného vzduchu [28]

Prvky tvořící komplex pro výrobu stlačeného vzduchu:

Kompresor

V našem případě se jedná o šroubový kompresor ORLÍK ORL22, který vyniká nízkou hlučností a vysokou účinností. Kompresor nasává přes vzduchový filtr, který odlučuje hrubé nečistoty. Ve většině případů je poháněn elektromotorem. Do jednotky kompresoru je současně vstřikován olej, který zajišťuje mazání kompresoru a zároveň odvádí teplo, vznikající stlačováním vzduchu.

Vzdušník

Vzdušník je obyčejná ocelová, svařovaná nádoba zpravidla provedením nastojato, která plní především funkce:

- akumuluje dostatečné množství tlakového vzduchu
- svým objemem vyrovnávat tlakové nárazy vzniklé přerušovanou dodávkou tlakového vzduchu
- umožnit odloučení vody a oleje z tlakového vzduchu

Mezi zákonné příslušenství vzdušníku patří:

- výrobní štítek
- provozní manometr
- pojišťovací ventil

Filtry

Filtry slouží k odstranění pevných částic až do velikosti až $0,01 \mu m$ a prachových částic z tlakového vzduchu.

Kondenzační suška

Chladicí sušička slouží k odstranění vlhkosti ve stlačeném vzduchu na hodnotu odpovídající tlakovému rosnému bodu $+4^{\circ}C$.

Převážná část znečištění spočívá ve vlhkosti, která ve formě kapiček nebo mlhy, vzniká stlačením části vodních par přes hranici nasycení. Podíl vlhkosti závisí především na relativní vlhkosti vzduchu.

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4. POUŽITÉ MATERIÁLY

4.1. Ocel 11321 (ČSN 41 1321, dle EN DC01) viz příloha č.28 [22]

Tabulka č.4.1 Chemické složení

C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
max 0,1	max 0,45	max 0,030	max 0,030

Tabulka č.4.2 Mechanické vlastnosti

Stav	Mez kluzu R _e max [MPa]	Mez pevnosti R _m [MPa]	Tažnost A ₈₀ min [%]
.21	235	280 - 380	29

Charakteristika oceli

Jde o nelegovanou hlubokotažnou ocel se zvláštními vlastnostmi. Ocel je vhodná pro mírný až hluboký tah. Využívá se pro střední tažení za studena. Plechy jsou vhodné na tváření za studena, lakování, protlačování, pokovování v tavenině a smaltování jen u neuklidněné oceli. Pokud se jedná o neuklidněnou ocel, po válcování za studena je náchylná k stárnutí. Svařitelnost zaručená v závislosti na rozměrech polotovaru.

Využití oceli

Použití této oceli leží v průmyslu strojírenském, elektrotechnickém atd. Vzhledem k dobré tvařitelnosti se využívá např. na trubky svařované z pásů pro olejové chladiče transformátorů, potrubí, nábytek, jízdní kola, motocykly, vtokové potrubí vodních turbín, závitové trubky pro plynovody, vodovody, apod.

4.2. Ocel 17240 (ČSN 41 7240, dle EN X5CrNi18-10) viz příloha č.29 [21], [23]

Ocel 17240 byla zvolena, protože se ve firmě Dendera a.s. často zpracovává a je dostatek plechů této oceli ve formě zbytků. Jako další aspekt volby této oceli bylo zjištění reakce vzduchu jako řezného plynu na korozivzdornou ocel.

Tabulka č.4.3 Chemické složení

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]
max 0,07	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,030	17 - 20	9 - 11,5

Tabulka č.4.4 Mechanické vlastnosti

Mez kluzu R _e max [MPa]	Mez pevnosti R _m [MPa]	Tažnost A ₅₀ min [%]
185	490 - 685	37

Charakteristika oceli

Jedná se o korozivzdornou austenitickou ocel obsahující 18% chromu a 10% niklu. Austenitická gama fáze je paramagnetická, ocel je tedy nemagnetická. Ocel má vynikající odolnost proti korozi v prostředích jako např. voda a ovzduší bez koncentrace chloridů nebo anorganických kyselin a solí. Svařitelnost této oceli je zaručena. Odolnost proti korozi lze zvýšit povrchovým leštěním. Použití do provozní teploty až 350 °C. Obrobitelnost je ztížená, nutno obrábět velmi ostrými nástroji z vysoce legovaných rychlořezných ocelí nebo nástroji vyrobených z tvrdokovových materiálů. Tvařitelnost tažením a ohýbáním je velmi dobrá. Ocel má velmi dobré mechanické vlastnosti i při extrémně nízkých teplotách.

Využití oceli

Použití nachází v průmyslu potravinářském, farmaceutickém atd. Ocel vhodná pro stavbu chemických zařízení včetně tlakových nádob dle ČSN69 0010. Je vhodná pro prostředí oxidační povahy, pro silné anorganické kyseliny jen při velmi nízkých koncentracích a v oblasti normálních teplot. Ve venkovním prostředí vzdoruje povrchové korozi jen v tom případě, že nánosy chemických zplodin (prach a soli) jsou pravidelně z povrchu oplachovány dešťovými srážkami. Tato nejvíce používaná korozivzdorná ocel vyhovuje odběratelům hlavně poměrem cena / dobrá korozivzdornost v určených prostředích.

5. POUŽITÉ STROJE A ZAŘÍZENÍ

Během experimentální části bylo použito laserového řezacího stroje a zařízení jako jsou snímač proudění, který slouží ke zjištění spotřeby použitého plynu při řezání laserem a dále drsnoměr, který je využit k měření drsnosti řezné plochy.

5.1. Laser Amada FO3015 [20], [24]

Pro provedení experimentu byl použit zmíněný laser Amada FO3015 od japonské firmy Amada. Provedení praktické části probíhalo ve spolupráci s českou firmou Dendera a.s. se sídlem v Kanicích.



Obr.5.1 Laser Amada FO3015 [24]

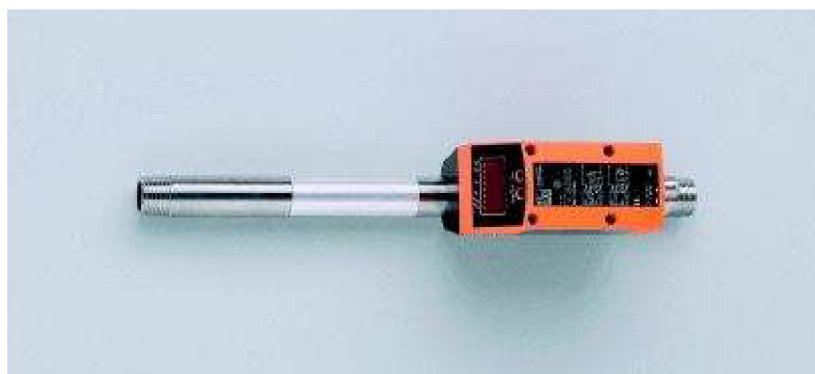
Tabulka č.5.1 Technická data laseru [20]

Model	Amada FO3015
Výkon [kW]	4
Pracovní pojezd X x Y x Z [mm]	3070x1550x200
Řezná rychlost [m/min ⁻¹]	0 - 20
Přesnost řezání [mm]	0,1/1000
Nosnost stolu [kg]	850
Laserový rezonátor	C-4000
Rozměry laserového řezacího stroje DxŠxV [mm]	9789x2967x2343
Rozměry pomocného stolu DxŠxV [mm]	4080x2480x1390
Hmotnost laserového zařízení [kg]	12000
Výrobní číslo stroje	FO 3015.084
NC řídicí jednotka	Fanuc FS-160iLA
Vlnová délka [μm]	10,6

5.2. Senzor proudění SD6000 [25]

Jedná se o průtokoměr od společnosti IFM Electronic, který byl zapůjčen od firmy Dendera a.s. k měření spotřeby stlačeného vzduchu.

V praktické části byl využit průtokoměr, který byl připojen přes rychlospojky do tlakové přívodní hadice (světlost 1/2") mezi rozvod stlačeného vzduchu a laserový stroj.



Obr.5.2 Snímač proudění [25]

Tabulka č.5.2 Technická data senzoru proudění

Typ	SD6000
Zobrazovací oblast [Nm^3/h]	0 - 90
Měřicí rozsah [Nm^3/h]	0,25 - 75
Signalizace teploty [$^{\circ}\text{C}$]	0 - 60
Hmotnost [kg]	1,176
Odolnost proti tlaku [bar]	16

5.3. Drsnoměr Hommelwerke LV-50E [27]

Jedná se o drsnoměr na měření drsnosti povrchů. Naměřené hodnoty se zobrazují na digitálním displeji Hommel-testeru T2000. V praktické části byl využit tento drsnoměr pro změření drsnosti povrchů řezných ploch.



Obr.5.3 Drsnoměr Hommelwerke LV-50E

Tabulka č.5.3 Technická data drsnoměr LV-50E

Typ	Hommelwerke LV-50E
Parametry měření	Ra, Rz, Rq, Rt, R3z, Rmax
Rozsah měření Ra [μm]	0,03 – 12,5
Rozlišení [μm]	0,01
Sonda	Diamantový hrot, $r = 5 \mu\text{m}$
Rychlost posuvu [mm/s]	0,5
Provozní teplota [$^{\circ}\text{C}$]	5 - 40

Tabulka č.5.4 Technická data vyhodnocovacího zařízení drsnoměru T2000

Typ	Hommel tester T 2000
Zobrazovací displej	LCD 84x32 bodů
Délka snímání [mm]	0,48; 1,5; 4,8; 15; 48
Hmotnost [kg]	8,4

6. PRACOVNÍ POSTUPY

6.1. Postup vystředění paprsku vůči trysce [20]

Po vyčištění či výměně výstupní čočky na řezací hlavě musí být čočka seřízena tak, aby laserový paprsek procházel středem otvoru trysky. Podmínkou bude, že záznam charakteristiky regulace odstupu byl proveden. Pomůcky a nástroje jsou opět přesně stanoveny (termokartón, měřicí lupa, lepicí páska, fix, ochranné laserové brýle)

Postup vystředění paprsku pomocí lepicí pásky je následující:

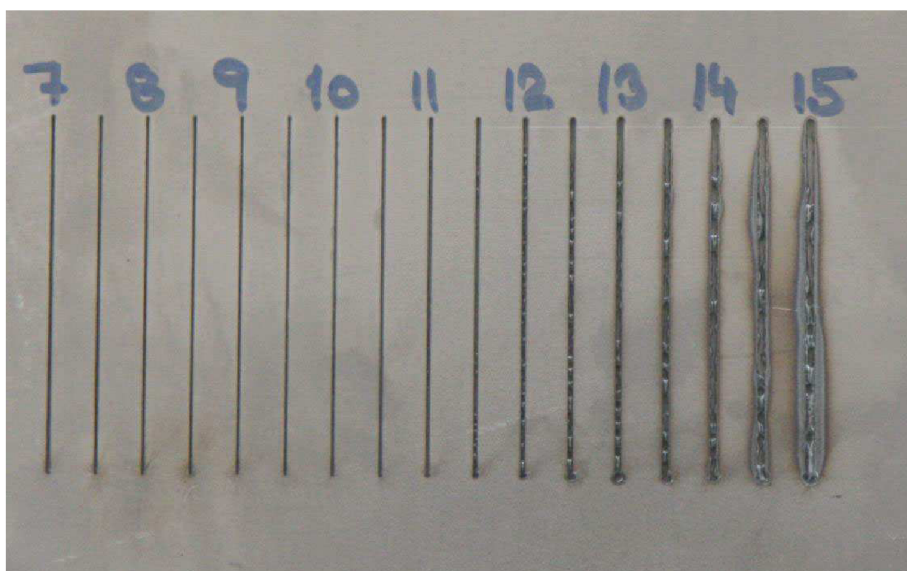
1. Vystředění paprsku k trysce se provádí pomocí specifického programu.
2. Vyvolání programu na ovládacím panelu.
3. Označit polohu trysky.
4. Nalepit lepicí pásku na otvor trysky.
5. Termokarton položit na plechovou podložku.
6. Uzavřít ochranná dvířka
7. Spustit laserové pulzy
8. Otevřít ochranná dvířka
9. Vyšroubovat trysku jen v případě, že navzdory zalepené trysce není možné rozeznat žádný otvor nebo otvor úplně na okraji otvoru trysky, musí být využita tryska s větším průměrem
10. Pokud není otvor v lepicí pásce soustředný s otvorem trysky, musí se na základě označení na trysce zjistit, ve kterém směru je třeba provést přestavení.
11. Pomocí seřizovacích šroubů na čelní straně řezací hlavy lze výstupní čočku a tím i paprsek seřizovat v diagonálním směru k otvoru trysky. Ochranné pouzdro nad seřizovacími šrouby posunout dopředu a seřizovací šrouby otočit požadovaným směrem.
12. Po každém přestavení nalepit novou lepicí pásku na otvor trysky a trysku znovu zašroubovat.
13. Uzavřít ochranná dvířka
14. Laserový pulz znovu spustit a po otevření ochranných dvířek znovu zkontrolovat soustřednost.
15. Postup se neustále opakuje, dokud není otvor soustředný s otvorem trysky.

6.2. Nastavení nulového bodu čočky

Nastavení nulového bodu čočky laseru se provádí z důvodu zjištění relativní polohy ohniska, při které laser vytváří kvalitní řez bez otřepů.

Postup nastavení je následující:

1. Nastavení nulového bodu čočky se provádí pomocí programu NC-FOCUS-CHECK.
2. Založení plechového dílu o tloušťce 1,5 mm.
3. Uzavřít ochranná dvířka.
4. Vyvolání programu na ovládacím panelu.
5. Po dokončení řezání vyjmout plechový díl.
6. V závislosti na hodnotách max a min popsat jednotlivé řezy.
7. Následné hodnocení kvality řezu a otřepů.



Obr.6.1 Jednotlivé řezy laserem sloužící k nastavení nulového bodu čočky

Při hodnocení kvality řezu se vizuálně zhodnotí lícní a rubová strana plechového dílu s přihlédnutím na šířku řezu. Požadavek na řez je takový, že na rubové straně nesmí být otřepy a řez musí být co nejužší. V tomto případě byl nulový bod čočky na hodnotě 10,5mm viz obrázek 6.1.

6.3. Kalibrace kapacity

Kalibrace kapacity se provádí automaticky pomocí programu AS 98 SENSOR. Slouží k nastavení správné regulace odstupu trysky od plechu.

7. NALEZENÍ OPTIMÁLNÍCH PARAMETRŮ

Řezání laserem s podporou vzduchu je v dnešní době nekonvenční metoda laserového dělení materiálu, u které nejsou známy optimální parametry řezání jako tomu je u laserového řezání s podporou kyslíku či dusíku. Řezání laserem je velmi citlivý proces, na kterém stojí velké množství vyráběných produktů.

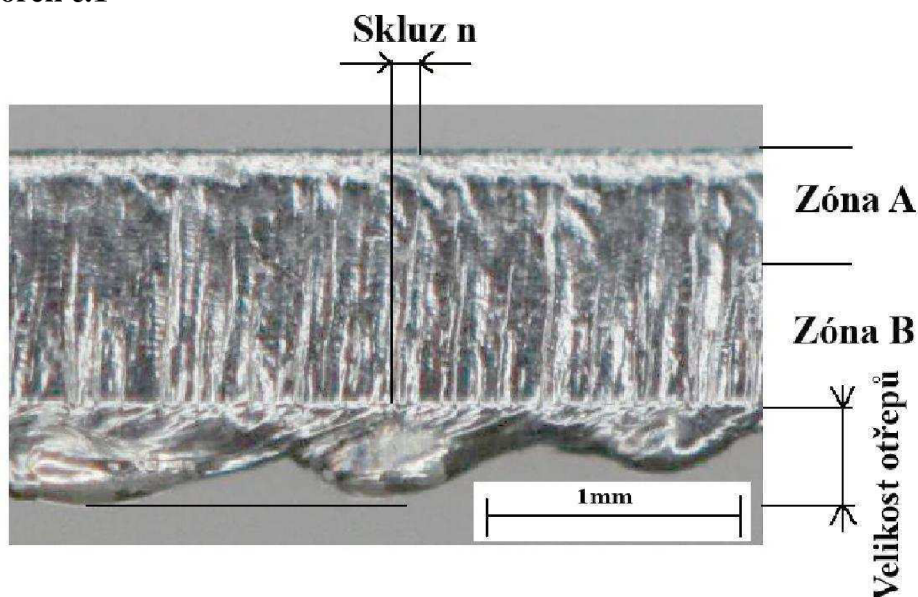
Praktická část byla provedena ve firmě Dendera a.s., která mimo jiné poskytla dané materiály. Cílem tohoto experimentu je najít optimální řezací parametry, které se získají řezáním zkušebních kusů z ocelí 11321 a 17240. Na základě zjištěných výsledků se stanoví výstupy. V další části se porovná kvalita řezné plochy u kusů řezaných laserem s podporou vzduchu s kusy řezanými laserem s podporou kyslíku a dusíku. Kvalitu řezné plochy je možné provést kontrolou pouhým okem, ale pro přesnější zkoumání řezné plochy byla provedena makroskopická kontrola. Účelem této kontroly je stanovení makroskopického charakteru řezané plochy, zpravidla prohlídkou zkušebního vzorku. Prohlídka byla provedena na vzorcích několikanásobně zvětšených, aby byla zřetelná kvalita řezné plochy, možné otřepy a jiné vady. Vyhodnocení a měření řezaných vzorků probíhá dle normy ČSN EN ISO 9013.

7.1. Nalezení optimálních parametrů při laserovém řezání oceli 11321

Postup je takový, že se začne řezat laserem s podporou vzduchu ocelový plech 11321 o tloušťce 1mm. Bude snaha dosáhnout nejkvalitnější možné řezné plochy při dodržení nejvyšší možné řezné rychlosti, abychom maximálně využili potenciál laseru. Nejdříve se vyřeže jeden vzorek, u kterého analyzujeme řeznou plochu lupou a následně se nastaví změna parametrů stroje, které by měly vést ke zlepšení řezné plochy. Samozřejmě ne vždy povede změna parametrů ke zlepšení řezu. Mezi proměnné parametry patří: řezná rychlost, výkon laseru, relativní poloha ohniska laseru a tlak plynu. Relativní poloha ohniska je nastavena na výchozí hodnotu 10,5mm.

Před započítím experimentu byla zvolena tryska o výstupním průměru 1mm a konstantní hodnotu vzdálenosti trysky od řezaného materiálu 0,3mm. Dále je nutné správně vystředit paprsek vůči trysce dle pracovního postupu popsáno v kapitole 6.1. Po vystředění paprsku vůči trysce se ustaví ocelový plech 11321 na pracovní stůl laseru a může být zahájen samotný proces řezání.

Řezaný vzorek č.1



Obr.7.1 Řezaný vzorek č.1

První vzorek byl řezán parametry viz tabulka č.7.1. Na vzorku jsou viditelné poměrně velké otřepy, které jsou viditelné i pouhým okem. Velikost otřepů dosahuje až $405 \mu\text{m}$. Kvalita řezné plochy je v tomto stavu nepřijatelná. V dalším kroku bude snaha zlepšit kvalitu řezné plochy snížením relativní polohy ohniska.

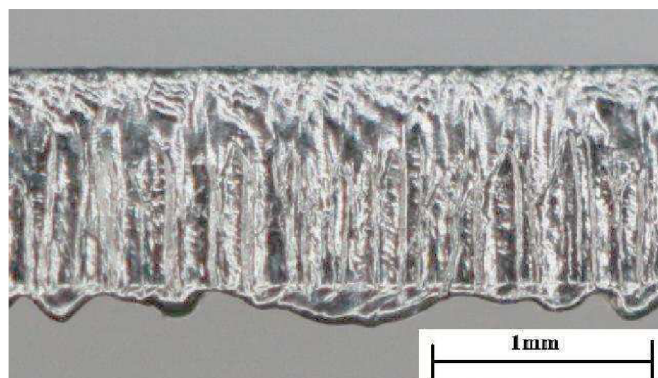
Tabulka č.7.1 Řezací parametry vzorku č.1

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 1mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon laseru [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3	7,5	0,6

Tabulka č.7.2 Naměřené hodnoty na vzorku č.1

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
405	110	4,6

Řezaný vzorek č.2



Obr.7.2 Řezaný vzorek č.2

Na tomto vzorku je viditelné zlepšení kvality řezné plochy, avšak stále vzhledem k velikosti otřepů se u dalšího řezaného vzorku sníží poloha ohniska o 0,5mm.

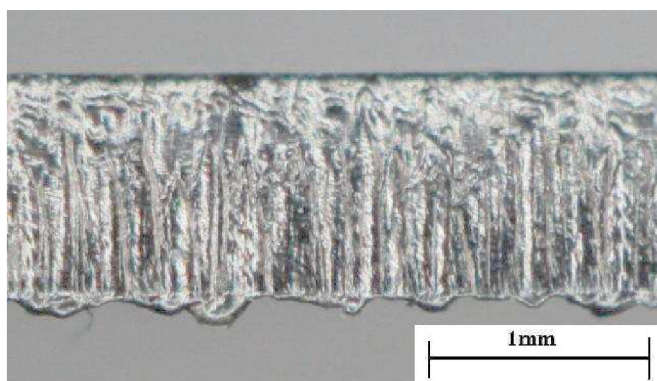
Tabulka č.7.3 Řezací parametry vzorku č.2

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 1mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon laseru [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3	7	0,6

Tabulka č.7.4 Naměřené hodnoty na vzorku č.2

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
180	30	5,1

Řezaný vzorek č.3



Obr.7.3 Řezaný vzorek č.3

Po snížení relativní polohy ohniska jsou stále viditelné otřepy, nicméně ve srovnání s předchozím případem jsou menších rozměrů. Tento vzorek byl řezán dle parametru v tabulce č.7.5.

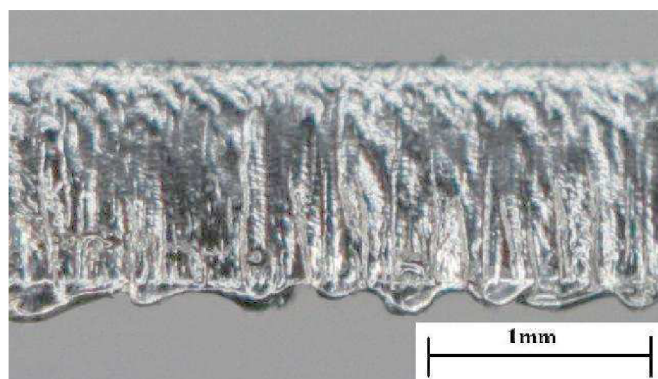
Tabulka č.7.5 Řezací parametry vzorku č.3

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 1mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon laseru [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3	6,5	0,6

Tabulka č.7.6 Naměřené hodnoty na vzorku č.3

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
140	10	5,2

Řezaný vzorek č.4



Obr.7.4 Řezaný vzorek č.4

V tomto případě byla snížena relativní poloha ohniska o 0,5mm a navíc navýšen výkon laseru o 0,2kW. Dle obrázku řezné plochy jsou viditelné větší otřepy ve srovnání s předchozím případem.

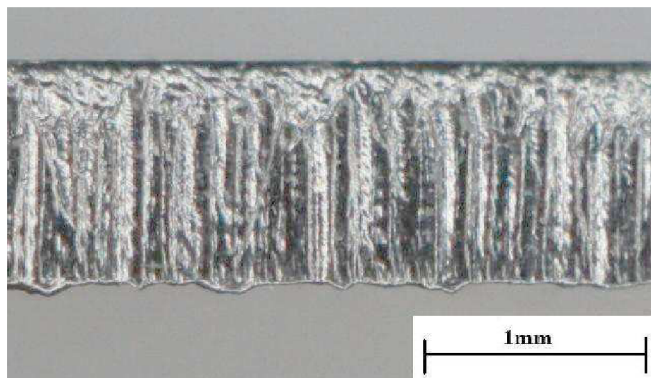
Tabulka č.7.7 Řezací parametry vzorku č.4

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 1mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon laseru [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3,2	6	0,6

Tabulka č.7.8 Naměřené hodnoty na vzorku č.4

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
195	40	4,1

Řezaný vzorek č.5



Obr.7.5 Řezaný vzorek č.5

U tohoto řezu bylo navázáno na parametry viz tabulka 7.5 s rozdílem snížení relativní polohy ohniska na hodnotu 6mm. Na obrázku 7.5 zvětšené řezné plochy je možno vidět značné zlepšení řezné plochy s malými otřepy.

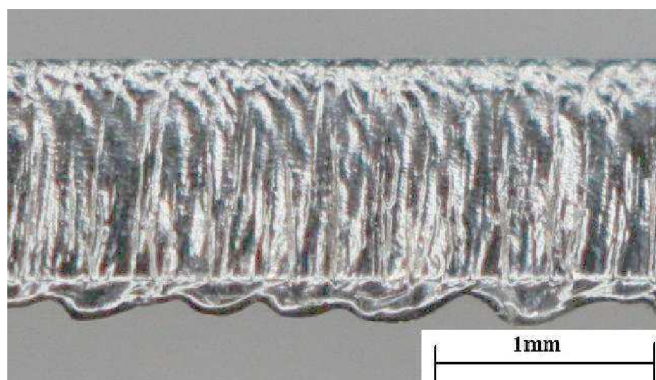
Tabulka č.7.9 Řezací parametry vzorku č.5

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 1mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon laseru [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3	6	0,6

Tabulka č.7.10 Naměřené hodnoty na vzorku č.5

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
80	25	5,6

Řezaný vzorek č.6



Obr.7.6 Řezaný vzorek č.6

Při řezání tohoto vzorku byla zvýšená řezná rychlost na hodnotu 5m/min a zvýšen výkon laseru na 3,2kW při snížení relativní polohy ohniska o 0,5mm. Na obrázku řezné plochy jsou viditelné nepříjemně velké otřepy, které bychom museli odstranit nutnou další operací např. broušením.

Vzhledem k nízké relativní poloze ohniska a malému výstupnímu průměru trysky 1mm dochází k zahřívání trysky, protože vlivem posunutí relativní polohy ohniska k nižším hodnotám se paprsek rozšiřuje a tím pádem předává teplo do trysky a následkem tohoto vlivu se tryska zahřívá, což je samozřejmě nežádoucí.

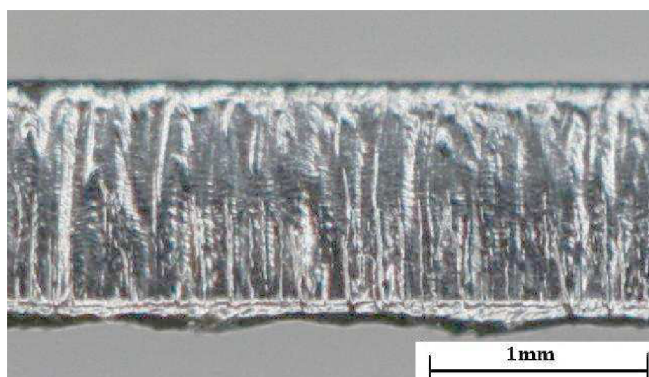
Tabulka č.7.11 Řezací parametry vzorku č.6

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 1mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon laseru [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
5	3,2	5,5	0,6

Tabulka č.7.12 Naměřené hodnoty na vzorku č.6

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
210	105	4,1

Řezaný vzorek č.7



Obr.7.7 Řezaný vzorek č.7

Před řezáním tohoto kusu došlo k výměně trysky o výstupním průměru 1mm za trysku o průměru 2mm, aby se odstranilo nežádoucí zahřívání trysky a zároveň se mohlo pohybovat k nižším hodnotám relativní polohy ohniska. Při samotném řezání se vycházelo z parametrů řezaného vzorku č.5 s rozdílem navýšení výkonu na 3,2kW. Na obrázku jsou viditelné otřepy, které bychom odstranili pouze další nutnou operací.

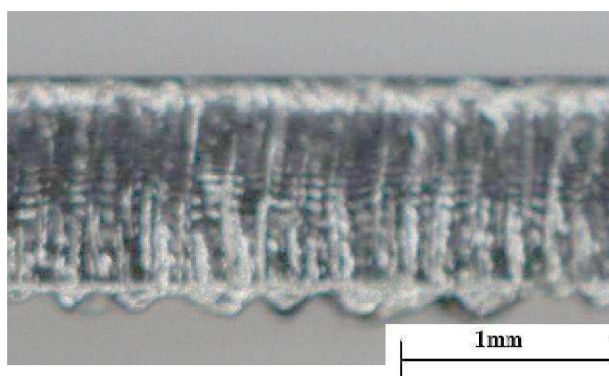
Tabulka č.7.13 Řezací parametry vzorku č.7

Materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3,2	6	0,6

Tabulka č.7.14 Naměřené hodnoty na vzorku č.7

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
135	60	2,5

Řezaný vzorek č.8



Obr.7.8 Řezaný vzorek č.8

U řezání tohoto vzorku byla snížena relativní poloha ohniska o 0,5mm. Na obrázku 7.8 jsou viditelné větší a ostřejší otřepy ve srovnání s předchozím případem. Tento vzorek byl řezán dle parametrů v tabulce č.7.15.

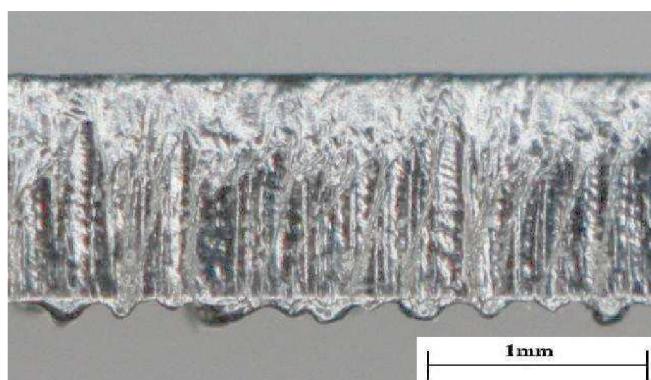
Tabulka č.7.15 Řezací parametry vzorku č.8

Materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3,2	5,5	0,6

Tabulka č.7.16 Naměřené hodnoty na vzorku č.8

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
170	110	5,4

Řezaný vzorek č.9



Obr.7.9 Řezaný vzorek č.9

Před řezáním tohoto vzorku bylo nastaveno snížení relativní polohy ohniska o 0,5mm na hodnotu 5mm. Na obrázku jsou viditelné kapkovité otřepy, které jsou velice tvrdé a bez nutné dodatečné operace neodstranitelné.

Tabulka č.7.17 Řezací parametry vzorku č.9

Materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3,2	5	0,6

Tabulka č.7.18 Naměřené hodnoty na vzorku č.9

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
120	25	7,5

Řezaný vzorek č.10



Obr.7.10 Řezaný vzorek č.10

U tohoto řezaného vzorku byla zvýšena rychlost řezání na hodnotu 5m/min při zvýšení výkonu stroje na hodnotu 3,6kW a relativní poloze ohniska 6mm. Dle obrázku je možné konstatovat, že volba parametru nebyla správná a je třeba upravit vstupní data. Na řezné ploše se tvoří tvrdé podlouhlé otřepy v celé délce řezu, které znamenají využití nutné dodatečné operace.

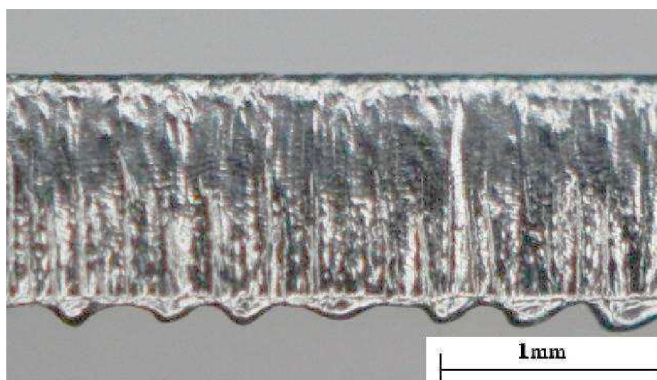
Tabulka č.7.19 Řezací parametry vzorku č.10

Materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
5	3,6	6	0,6

Tabulka č.7.20 Naměřené hodnoty na vzorku č.10

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
220	35	2,3

Řezaný vzorek č.11



Obr.7.11 Řezaný vzorek č.11

Při řezání tohoto vzorku se vyšlo z parametrů viz tabulka č.7.19 s rozdílem posunutí relativní polohy ohniska na hodnotu 5,5mm. Na obrázku č.7.11 je možné pozorovat vytvořené kapkovité ořepů z roztaveného kovu během řezacího procesu.

Tabulka č.7.21 Řezací parametry vzorku č.11

Materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
5	3,6	5,5	0,6

Tabulka č.7.22 Naměřené hodnoty na vzorku č.11

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost ořepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
165	30	3,3

Řezaný vzorek č.12



Obr.7.12 Řezaný vzorek č.12

U řezání vzorku byla snížena relativní poloha ohniska o 0,5mm. Výsledkem této úpravy parametrů jsou otřepy na spodní hraně řezné plochy, kterých je méně, avšak jsou větších rozměrů. Byla vyzkoušena i změna tlaku vzduchu, ale tato úprava parametrů vedla k velkému zhoršení kvality řezné plochy.

Tabulka č.7.23 Řezací parametry vzorku č.12

Materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
5	3,6	5	0,6

Tabulka č.7.24 Naměřené hodnoty na vzorku č.12

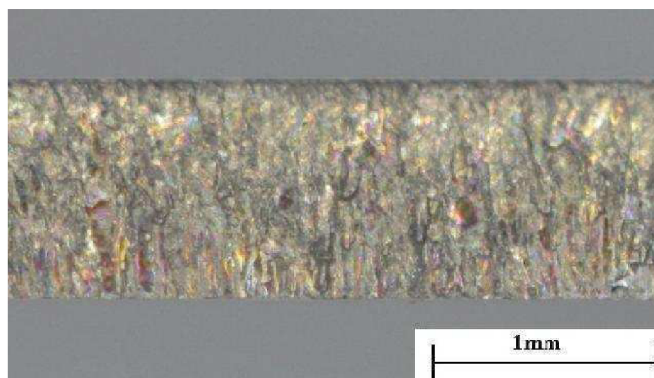
Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
170	55	3,3

7.2. Nalezení optimálních parametrů při laserovém řezání oceli 17240

Postup bude obdobný jako u řezání oceli 11321. Začne se řezat laserem s podporou vzduchu ocelový plech 17240 o tloušťce 1mm. Bude snaha dosáhnout co nejkvalitnější řezné plochy při splnění nejvyšší možné řezné rychlosti. Nejdříve se vyřeže jeden vzorek, u kterého se analyzuje řezná plochu pouhým okem při dobrém zraku nebo lupou.

U řezání oceli 17240 laserem s podporou vzduchu byla ponechána použitá tryska o výstupním průměru 2mm. Pro řezání prvního kusu z oceli 17240 byly zvoleny řezné parametry viz tabulka 7.19. Tato volba byla provedena na základě vysoké řezné rychlosti a nízké relativní polohy ohniska. V případě, že pod lupou budou viditelné otřepy, tak se upraví relativní poloha ohniska k nižším hodnotám.

Řezaný vzorek č.13



Obr.7.13 Řezaný vzorek č.13

Na zvětšeném obrázku řezné plochy je možné pozorovat kvalitní řez, který neobsahuje žádné otřepy. Řezná plocha má nazelenalou barvu, což naznačuje vytvoření oxidu chromu na řezné ploše. Pravděpodobně se jedná o oxid chromitý, který se vyznačuje zelenou barvou. V tomto případě bylo dosaženo na první pokus kvalitní řezné plochy u tloušťky plechu 1mm oceli 17240.

Tabulka č.7.25 Řezací parametry vzorku č.13

Materiál 17240, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
5	3,6	6	0,6

Tabulka č.7.26 Naměřené hodnoty na vzorku č.13

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
0-5	20	5,4

Řezaný vzorek č.14



Obr.7.14 Řezaný vzorek č.14

V tomto případě byla zvolena tloušťka plechu 2mm oceli 17240 vzhledem k nalezení optimálních parametrů pro tloušťku 1mm. Vyšlo se z řezných parametrů viz tabulka 7.25 s rozdílem snížení řezné rychlosti na hodnotu 4,5m/min. Po vyřezání vzorku jsou na obrázku 7.14 viditelné drobné otřepy na spodní řezné hraně.

Tabulka č.7.27 Řezací parametry vzorku č.14

Materiál 17240, tloušťka materiálu 2mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4,5	3,6	6	0,6

Tabulka č.7.28 Naměřené hodnoty na vzorku č.14

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 2mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
25	55	7,5

Řezaný vzorek č.15



Obr.7.15 Řezaný vzorek č.15

V tomto případě se zvýšila řezná rychlost na hodnotu 5m/min. Na obrázku řezné plochy nejsou patrné žádné viditelné otřepy. Na řezné ploše jsou vytvořeny oxidy chromu, nicméně řez je technicky přijatelný.

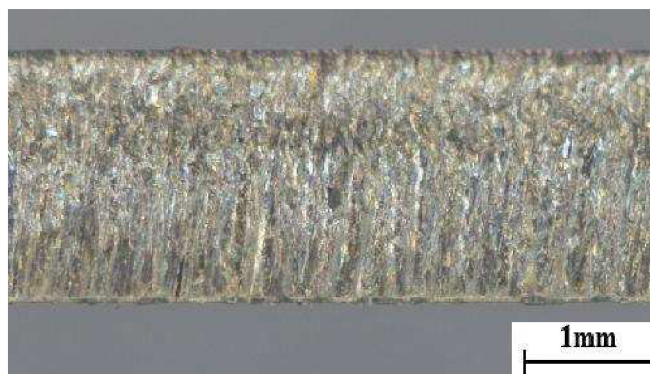
Tabulka č.7.29 Řezací parametry vzorku č.15

Materiál 17240, tloušťka materiálu 2mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
5	3,6	6	0,6

Tabulka č.7.30 Naměřené hodnoty na vzorku č.15

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 2mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
20	75	3,5

Řezaný vzorek č.16



Obr.7.16 Řezaný vzorek č.16

U tohoto vzorku byla snaha snížit relativní polohu ohniska o 0,5mm. Výsledek řezné plochy je viditelný na obrázku 7.16. Na spodní hraně nejsou viditelné žádné otřepy, nicméně řezná plocha je více rýhovaná ve spodní části v porovnání s předchozím případem. Proto jsou zvoleny optimální řezné parametry oceli 17240 tloušťky 2mm viz tabulka č.7.29.

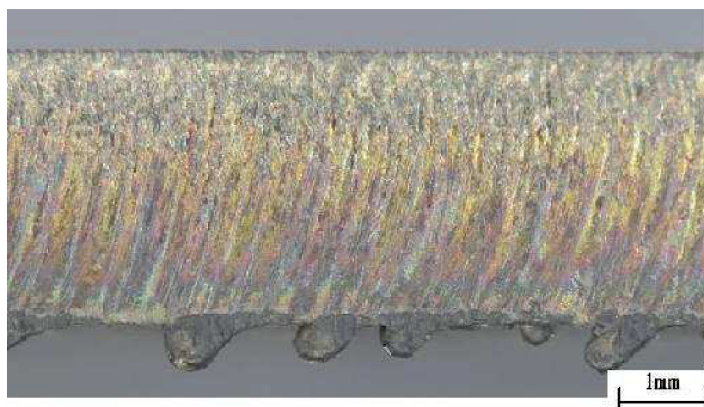
Tabulka č.7.31 Řezací parametry vzorku č.16

Materiál 17240, tloušťka materiálu 2mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
5	3,6	5,5	0,6

Tabulka č.7.32 Naměřené hodnoty na vzorku č.16

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 2mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
25	120	5,6

Řezaný vzorek č.17



Obr.7.17 Řezaný vzorek č.17

Tento případ je zaměřený na nalezení optimálních parametrů tloušťky materiálu 3mm. Vycházelo se z nalezených optimálních řezných parametrů viz tabulka č.7.29, kterými byl řezán vzorek č.15.

Na obrázku jsou viditelné výrazné otřepy na spodní hraně řezné plochy, které jsou technicky nepřijatelné. Tento jev je vždy nutno následně odstranit mechanickou cestou například broušením.

Při makroskopické kontrole je viditelný směr rýhování, který je způsoben paprskem laseru při vysoké řezné rychlosti. Dále je viditelná tvorba oxidů chromu, které vznikají při řezání laserem vysokou řeznou rychlostí a vysokým výkonem laseru. Tyto oxidy se zabarvují do různých tónů od žluté, modré až po fialovou.

Tabulka č.7.33 Řezací parametry vzorku č.17

Materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
5	3,6	6	0,6

Tabulka č.7.34 Naměřené hodnoty na vzorku č.17

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
220	240	4,3

Řezaný vzorek č.18



Obr.7.18 Řezaný vzorek č.18

Vzhledem k předchozí technicky nepřijatelné řezné ploše s otřepi velikosti až $220 \mu m$ se snížila hodnota řezné rychlosti na $4 m/min$ při zachování nastavení předešlých parametrů viz tabulka 7.33. Na zvětšeném obrázku je zřetelná změna k lepšímu co se týče velikosti otřepů a výrazného rýhování.

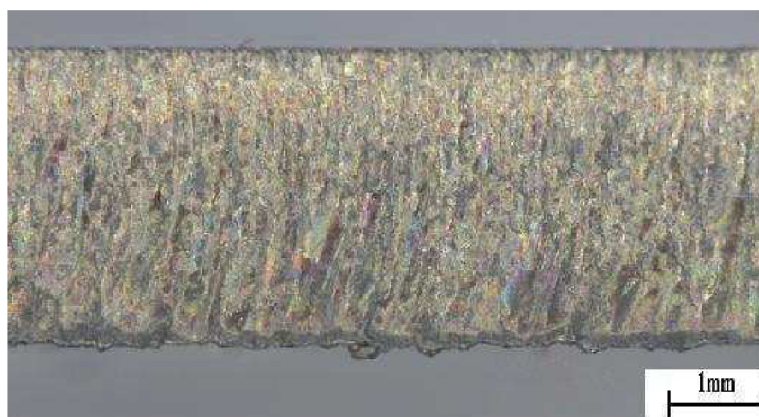
Tabulka č.7.35 Řezací parametry vzorku č.18

Materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3,6	6	0,6

Tabulka č.7.36 Naměřené hodnoty na vzorku č.18

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
65	140	7

Řezaný vzorek č.19



Obr.7.19 Řezaný vzorek č.19

V tomto případě se vycházelo z řezných parametrů viz tabulka č.7.35 s rozdílem navýšení výkonu laseru na hodnotu 3,8kW, aby došlo k odstranění hrubého povrchu tím, že se vnese větší energie do řezu.

Dle obrázku je viditelné, že se nepodařilo odstranit hrubý povrch, nicméně drobné otřepy na spodní hraně řezu jsou stále přítomné.

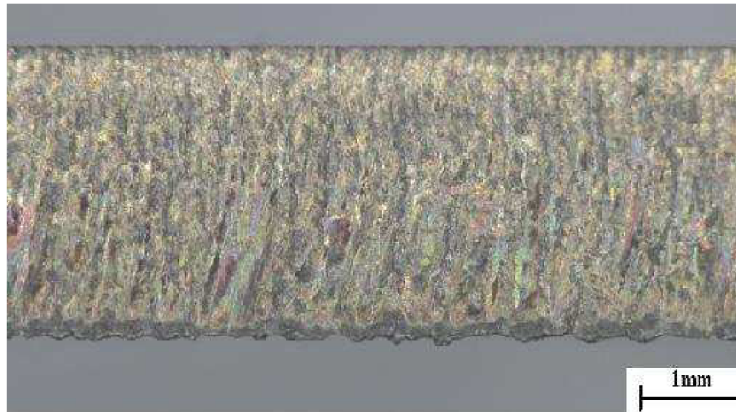
Tabulka č.7.37 Řezací parametry vzorku č.19

Materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3,8	6	0,6

Tabulka č.7.38 Naměřené hodnoty na vzorku č.19

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
80	205	7,1

Řezaný vzorek č.20



Obr.7.20 Řezaný vzorek č.20

U řezání tohoto vzorku došlo ke snížení relativní polohy ohniska o 0,5mm. Na obrázku 7.20 jsou viditelné drobné otřepy na spodní hraně řezné plochy.

Tabulka č.7.39 Řezací parametry vzorku č.20

Materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3,8	5,5	0,6

Tabulka č.7.40 Naměřené hodnoty na vzorku č.20

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
60	215	8,1

Řezaný vzorek č.21



Obr.7.21 Řezaný vzorek č.21

Změna vstupních parametrů je pouze ve snížení relativní polohy ohniska o 0,5mm. Výsledek této úpravy vstupních parametrů je zobrazen na obrázku 7.21, ze kterého je zřetelné zvýšení velikosti otřepů na spodní hraně řezné plochy.

Tabulka č.7.41 Řezací parametry vzorku č.21

Materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3,8	5	0,6

Tabulka č.7.42 Naměřené hodnoty na vzorku č.21

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
90	160	11,3

Řezaný vzorek č.22



Obr.7.22 Řezaný vzorek č.22

Při řezání tohoto vzorku se vyšlo z parametrů viz tabulka 7.41 s rozdílem snížení tlaku vzduchu na hodnotu 0,5MPa. Snížení tlaku plynu vedlo k navýšení množství a velikosti otřepů na spodní řezné hraně.

Tabulka č.7.43 Řezací parametry vzorku č.22

Materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3,8	5	0,5

Tabulka č.7.44 Naměřené hodnoty na vzorku č.22

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
115	230	7,4

Řezaný vzorek č.23



Obr.7.23 Řezaný vzorek č.23

U tohoto řezu se vyšlo z tabulky č.7.41 s rozdílem navýšení tlaku vzduchu na 0,7MPa. Výsledek této úpravy je na obrázku 7.23. Na spodní hraně řezné plochy jsou viditelné podlouhlé tvrdé otřepy v celé délce řezu, které jsou způsobeny špatným oddělením roztaveného kovu od základního materiálu

Tabulka č.7.45 Řezací parametry vzorku č.23

Materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4	3,8	5	0,7

Tabulka č.7.46 Naměřené hodnoty na vzorku č.23

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
95	155	12,1

7.3. Laserové řezání oceli 11321 oxidační metodou

Řezaný vzorek č.24



Obr.7.24 Řezaný vzorek č.24

U laserového řezání oceli 11321 s podporou kyslíku viz obrázek 7.24 se vycházelo ze známých optimálních parametrů viz tabulka č.7.47. U oxidačního řezání tohoto vzorku byla vzdálenost trysky od plechu nastavena na hodnotu 0,8mm. Na obrázku nejsou viditelné žádné otřepy, čili řezná plocha je technicky přijatelná.

Tabulka č.7.47 Řezací parametry vzorku č.24

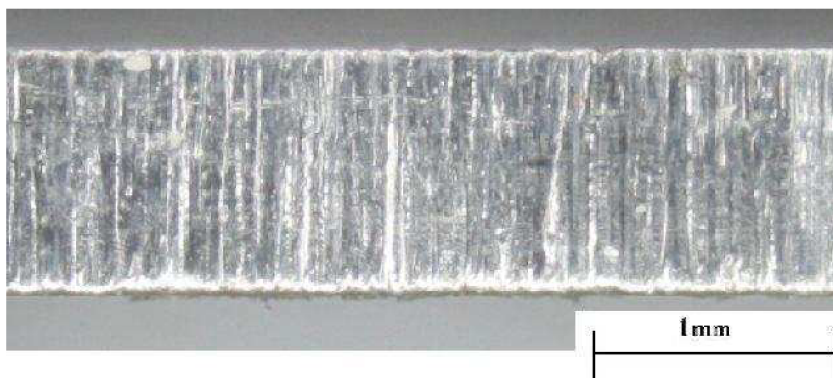
Materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 1mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
6,5	3	10	0,25

Tabulka č.7.48 Řezací parametry vzorku č.24

Řezaný materiál 11321, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
0-2	280	1,3

7.4. Laserové řezání oceli 17240 tavnou metodou

Řezaný vzorek č.25



Obr.7.25 Řezaný vzorek č.25

Vzorek č.25 byl řezán dle známých parametrů viz tabulka č.7.49. Na obrázku 7.25 nejsou patrně žádné ořepy. Řezná plocha slouží k porovnání kvality řezu k laserovému řezání s podporou vzduchu.

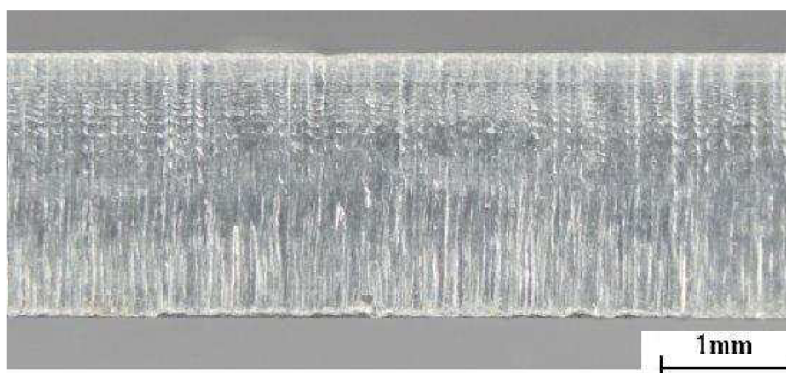
Tabulka č.7.49 Řezací parametry vzorku č.25

Materiál 17240, tloušťka materiálu 1mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
6	4	8,5	0,8

Tabulka č.7.50 Řezací parametry vzorku č.25

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 1mm		
Velikost ořepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
0-3	30	1,9

Řezaný vzorek č.26



Obr.7.26 Řezaný vzorek č.26

Na obrázku 7.26 je vidět kvalitní řezná plocha po tavném laserovém řezání bez viditelných otřepů. Tento vzorek byl řezán dle známých parametrů viz tabulka č.7.51.

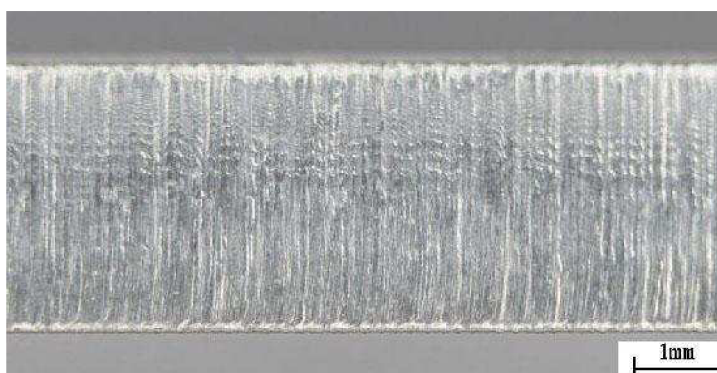
Tabulka č.7.51 Řezací parametry vzorku č.26

Materiál 17240, tloušťka materiálu 2mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
4,8	4	8	1

Tabulka č.7.52 Řezací parametry vzorku č.26

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 2mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
0-3	25	1,9

Řezaný vzorek č.27



Obr.7.27 Řezaný vzorek č.27

Tento vzorek oceli 17240 tloušťky 3mm byl řezán podle známých parametrů viz tabulka 7.53. Na obrázku 7.27 nejsou viditelné žádné otřepy a řezná plocha slouží jako porovnání k řezu řezaným laserem s podporou vzduchu.

Tabulka č.7.53 Řezací parametry vzorku č.27

Materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm, průměr trysky 2mm			
Rychlost posuvu [m/min]	Výkon [kW]	Relativní poloha ohniska [mm]	Tlak plynu [MPa]
3,5	4	7,5	1,2

Tabulka č.7.54 Řezací parametry vzorku č.27

Řezaný materiál 17240, tloušťka materiálu 3mm		
Velikost otřepů [μm]	Velikost skluzu [μm]	Ra [μm]
0-3	35	1,8

8. ZJIŠTĚNÍ SPOTŘEBY STLAČENÉHO VZDUCHU

Spotřeba stlačeného vzduchu je důležitá veličina, která slouží k určení vhodnosti této nekonvenční metody laserového řezání. Zjištění spotřeby stlačeného vzduchu při samotném řezání je poměrně jednoduché. Průtokoměr byl zapojen přes rychlospojky do tlakové hadice mezi rozvod stlačeného vzduchu a laser. Po zapojení senzoru proudění stačilo aplikovat proces řezání zkušebního vzorku laserem a na průtokoměru se digitálně zobrazovala aktuální spotřeba vzduchu. Aktuální zapojení průtokoměru je viditelné na obrázku 8.1.

Během řezání zkušebních vzorků byla odečtena aktuální spotřeba vzduchu na senzoru proudění v závislosti na výstupním průměru trysky.

Naměřené hodnoty spotřeby vzduchu při řezání laserem jsou uvedeny v následujících tabulkách a grafech. Hodnoty spotřeby kyslíku a dusíku byly odečteny z obrázku 3.6 a 3.7. Při řezání laserem s podporou kyslíku či dusíku nebylo možné použít průtokoměr, protože tlaková zařízení podléhají revizi a navíc nebyly k dispozici vhodné přechodky pro propojení.



Obr.8.1 Zapojení průtokoměru

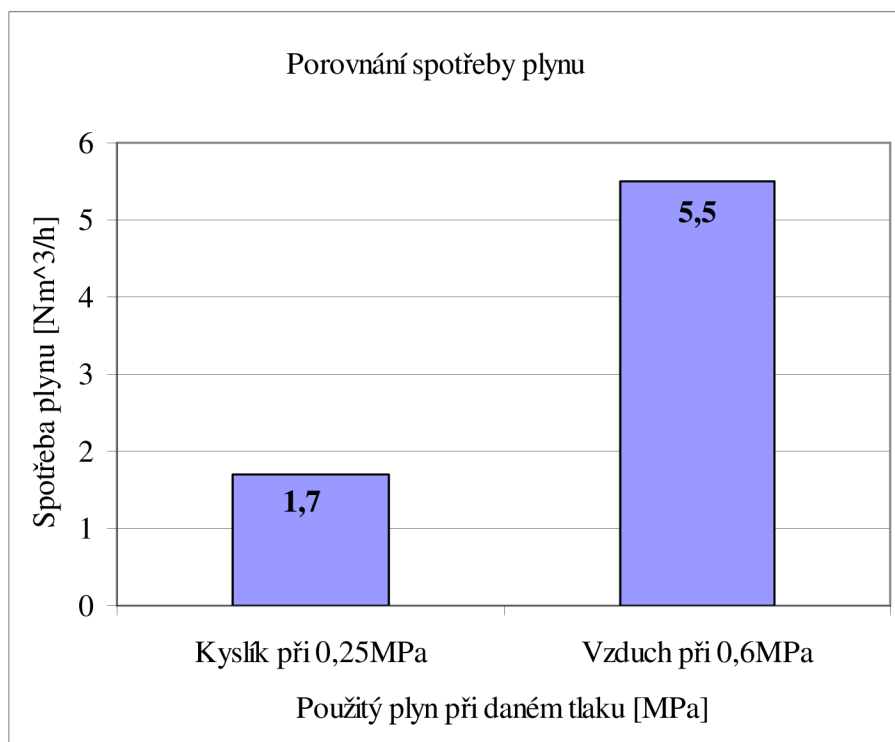
8.1. Porovnání spotřeby plynu při řezání oceli 11321 tloušťky 1mm

Tabulka č.8.1 Spotřeba plynu pro ocel 11321 tloušťky 1mm a pro výstupní průměr trysky 1mm

Použitý plyn při daném tlaku	Kyslík při 0,25MPa	Vzduch při 0,6MPa
Spotřeba plynu [Nm ³ /h]	1,7	5,5

Ocel 11321 byla řezána laserem s použitím trysky o výstupním průměru 1mm a 2mm při daném tlaku použitého plynu. Vzhledem k tomu, že jsme nedosáhli dobrých výsledků řezných ploch u oceli 11321 s použitím trysky 2mm, je uvedeno porovnání spotřeby plynu pouze pro trysku o výstupním průměru 1mm viz graf č.8.1.

Graf č.8.1 Porovnání spotřeby plynu pro ocel 11321 tloušťky 1mm a pro výstupní průměr trysky 1mm



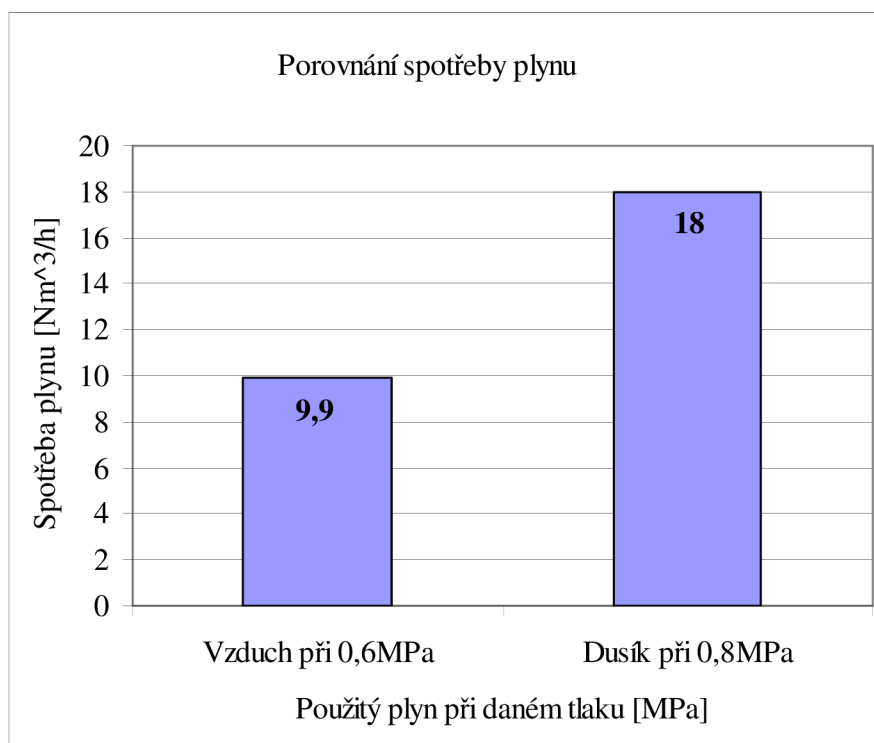
8.2. Porovnání spotřeby plynu při řezání oceli 17240 tloušťky 1mm

Tabulka č.8.2 Spotřeba plynu pro ocel 17240 tloušťky 1mm a pro výstupní průměr trysky 2mm

Použitý plyn při daném tlaku	Vzduch při 0,6MPa	Dusík při 0,8MPa
Spotřeba plynu [Nm ³ /h]	9,9	18

U laserového řezání oceli 17240 je použita tryska o výstupním průměru 2mm pro všechny řezané tloušťky materiálu. Při řezání laserem s podporou vzduchu je použit stále stejný tlak 0,6MPa. U laserového řezání dusíkem se tlak plynu zvyšuje s rostoucí tloušťkou materiálu. Spotřeba plynu pro ocel 17240 tloušťky 1mm je zobrazena v grafu č.8.2.

Graf č.8.2 Porovnání spotřeby plynu pro ocel 17240 tloušťky 1mm a pro výstupní průměr trysky 2mm



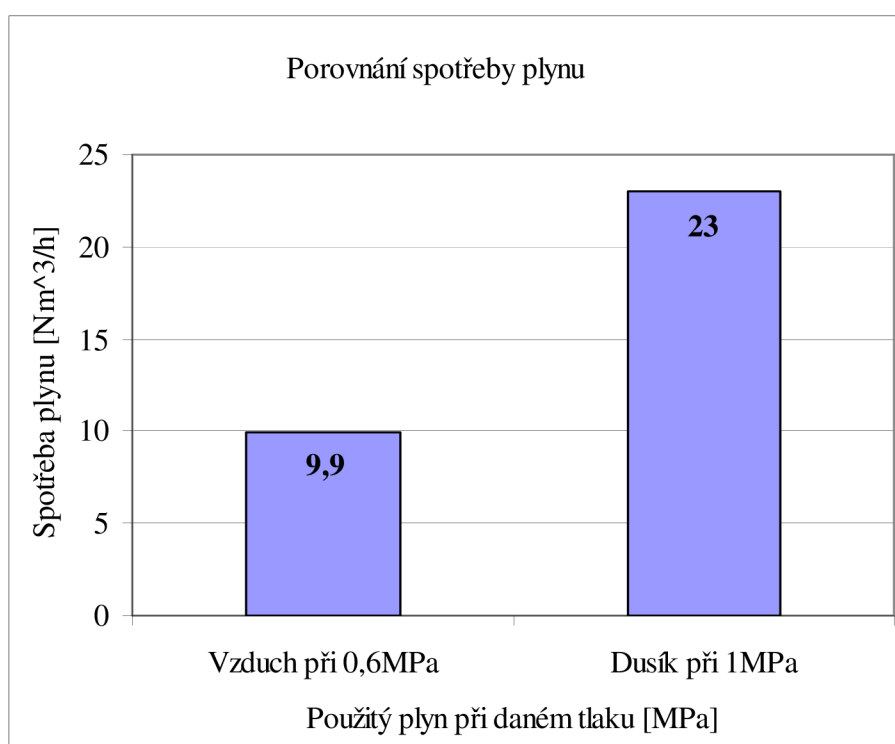
8.3. Porovnání spotřeby plynu při řezání oceli 17240 tloušťky 2mm

Tabulka č.8.3 Spotřeba plynu pro ocel 17240 tloušťky 2mm a pro výstupní průměr trysky 2mm

Použitý plyn při daném tlaku	Vzduch při 0,6MPa	Dusík při 1MPa
Spotřeba plynu [Nm ³ /h]	9,9	23

Při řezání oceli 17240 tloušťky 2 mm je spotřeba použitých plynů uvedena v grafu č.8.3. Spotřeba dusíku je větší ve srovnání s předchozím případem, protože se zvýšil tlak plynu na 1MPa z důvodu řezání větší tloušťky materiálu.

Graf č.8.3 Porovnání spotřeby plynu pro ocel 17240 tloušťky 2mm a pro výstupní průměr trysky 2mm



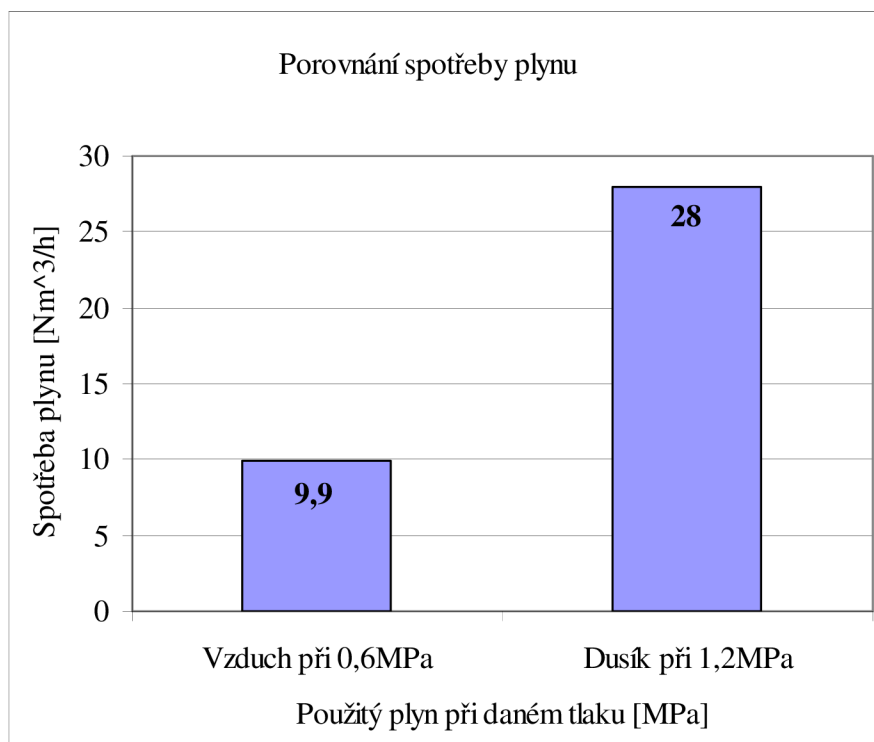
8.4. Porovnání spotřeby plynu při řezání oceli 17240 tloušťky 3mm

Tabulka č.8.4 Spotřeba plynu pro ocel 17240 tloušťky 3mm a pro výstupní průměr trysky 2mm

Použitý plyn při daném tlaku	Vzduch při 0,6MPa	Dusík při 1,2MPa
Spotřeba plynu [Nm ³ /h]	9,9	28

V poslední řadě je uvedeno srovnání spotřeby plynu u řezání laserem ocel 17240 tloušťky 3mm viz graf č.8.4. Spotřeba dusíku roste přibližně o 5Nm³/h se zvětšením řezané tloušťky materiálu o 1mm.

Graf č.8.4 Porovnání spotřeby plynu pro ocel 17240 tloušťky 3mm a pro výstupní průměr trysky 2mm



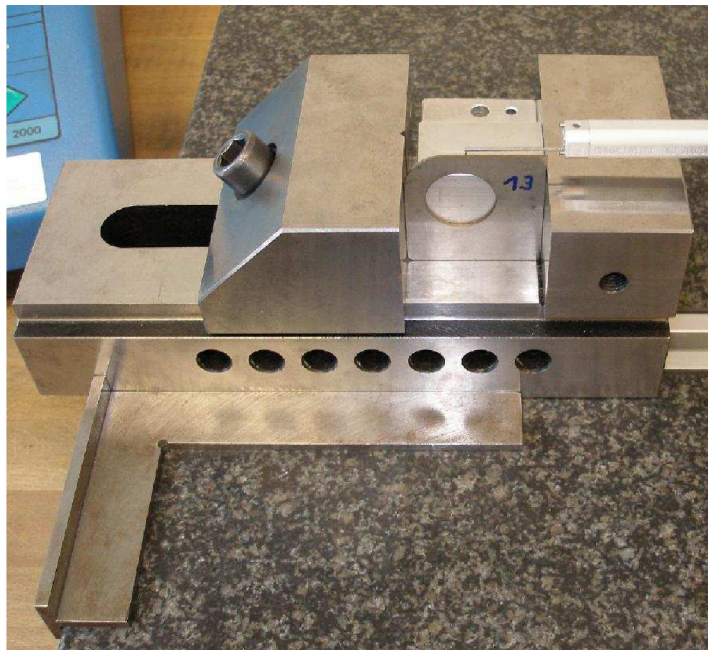
9. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ DRSNOSTI ŘEZNÝCH PLOCH

Měření drsnosti řezných ploch vzorků probíhalo ve spolupráci v firmou IMI International Norgren CZ se sídlem v Modřicích u Brna.

Bylo změřeno všech 27 vzorků, jejichž data a výsledné průběhy drsnosti jsou přiloženy v přílohách 1 - 27.

Upnutí vzorků pro měření drsnosti řezných ploch bylo provedeno pomocí svěráku, srovnávací kostky a vyrovnáno pomocí úhelníku viz obrázek 9.1 a 9.2.

Hodnoty drsností R_a a R_z5 jednotlivých měřených vzorků jsou v tabulce 9.1. Drsnosti vzorků byly vyhodnocené dle normy ČSN EN ISO 9013.



Obr.9.1 Upnutí vzorku pro měření drsnosti



Obr.9.2 Měření drsnosti řezné plochy vzorků

Tabulka č.9.1. Naměřené hodnoty drsností Ra a Rz5 jednotlivých vzorků

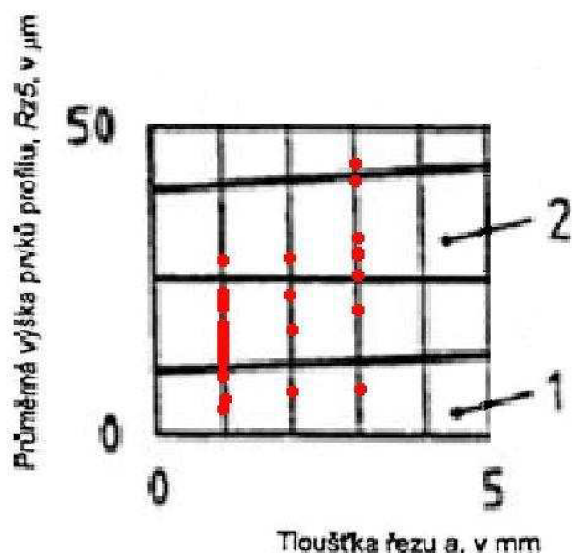
Číslo vzorku	Drsnost Ra [μm]	Drsnost Rz5 [μm]
1	4,6	16,3
2	5,1	16,4
3	5,2	21
4	4,1	16,3
5	5,6	20,6
6	4,1	16,5
7	2,5	9,9
8	5,4	22,3
9	7,5	28,3
10	2,3	9,1
11	3,3	12,6
12	3,3	12,4
13	5,4	20,6
14	7,5	27
15	3,5	15,7
16	5,6	22
17	4,3	17,2
18	7	28,6
19	7,1	25,7
20	8,1	31,1
21	11,3	43,5
22	7,4	27,5
23	12,1	45,7
24	1,3	5,1
25	1,9	7,3
26	1,9	7,8
27	1,8	6,9

Do grafu č.3.1 dle normy ČSN EN ISO 9013 byly vyneseny hodnoty naměřených drsností Rz5(R3z) dle tabulky č.9.1. Z celého grafu je vybraná jen část vzhledem k malým hodnotám naměřené drsnosti a malé tloušťce materiálu.

Vynesené hodnoty naměřených drsností řezných ploch v grafu jsou ve formě červených teček, aby byly dobře viditelné. Tyto hodnoty jsou pro dané materiály a jejich tloušťky.

Z grafu je patrné, že byly vyneseny body pro tři tloušťky materiálu. Kromě dvou vynesených bodů, které se pohybují kolem hranice třetí oblasti tolerančního pole dle tabulky č.3.1. Přes tuhle malou odchylku se většina bodů pohybuje v první a druhé oblasti tolerančního pole, což dle tabulky č.3.1 odpovídá hodnotám $Rz5 \leq 40\mu\text{m}$. Drsnosti Rz5 řezaných vzorků laserem s podporou kyslíku a dusíku se pohybují v oblasti prvního tolerančního pole, kde platí $Rz5 \leq 10\mu\text{m}$.

Graf č.9.1 Průměrná výška prvků profilu Rz5 po vynesení bodů dle naměřených hodnot viz tabulka č.9.1.



10. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Hodnocení nalezení optimálních parametrů oceli 11321

U laserového řezání oceli 11321 s podporou vzduchu nebylo dosaženo dobrých výsledků, protože vzduch obsahuje přibližně 21% kyslíku, který se na exotermické reakci nepodílí v takové míře jako je tomu u oxidačního řezání. Proto se na spodní hraně řezu objevují tvrdé otřepy, které jsou odstranitelné pouze nutnou dodatečnou operací.

Jako optimální řezné parametry pro laserové řezání vzduchem byly vybrány parametry viz tabulka č.7.9. Jedná se o řezaný vzorek č.5 na jehož řezné ploše jsou drobné otřepy do $80 \mu\text{m}$ a naměřená drsnost povrchu řezu se pohybuje kolem $5,6 \mu\text{m}$. Naopak u řezné plochy řezané laserem s podporou kyslíku nejsou viditelné žádné otřepy a drsnost řezané plochy je $1,3 \mu\text{m}$.

V konečném důsledku záleží na tom, k čemu bude vyřezaný díl sloužit a na požadavcích zákazníka.

Hodnocení nalezení optimálních parametrů oceli 17240

U laserového řezání vzduchem ocel 17240 tloušťky 1mm se podařilo najít optimální řezné parametry na poprvé. Optimální řezné parametry jsou uvedeny v tabulce č.7.25. Na obrázku 7.13 je vidět nazelenalá řezná plocha, která vznikla v důsledku reakce kyslíku s roztaveným kovem a tím vznik oxidů chromu. Jedná se pravděpodobně o oxid chromitý, který se vyznačuje svou zelenou barvou. Řezná plocha je bez otřepů na spodní hraně řezaného vzorku, takže je technicky přijatelná bez použití nutné další operace.

Naopak řezaný vzorek z oceli 17240 laserem s podporou dusíku je samozřejmě také bez otřepů. Na řezné ploše nedošlo k tvorbě oxidů chromu, protože dusík dokonale zamezil přístupu kyslíku k roztavenému kovu. Rychlost řezání obou porovnávaných vzorků je podobná $5\text{m}/\text{min}$ u vzduchu a $6\text{m}/\text{min}$ u dusíku. Řez provedený pomocí dusíku má drsnost řezné plochy $1,9 \mu\text{m}$, což je 3x menší v porovnání řezání vzduchem.

Vzniklé oxidy chromu na řezné ploše můžou, ale nemusí vadit funkci dané součásti. Konečné porovnání řezané plochy je závislé na požadavcích zákazníka a na funkci součásti.

U řezané oceli 17240 tloušťky 2mm byly nalezeny optimální parametry viz tabulka č.7.29. Na řezné ploše se opět vytvořily oxidy chromu vlivem reakce kyslíku s roztaveným kovem, které samozřejmě nejsou vadou. Na obrázku 7.15 jsou v malé míře patrné otřepy o velikosti maximálně $20 \mu\text{m}$ na spodní hraně řezaného vzorku, takže je plocha přijatelná a konkurence schopná řezané ploše dusíkem. U řezání laserem s podporou vzduchu se podařilo zhotovit vzorek č.15 vyšší řeznou rychlostí než je tomu u dusíku (vzorek č.26). Drsnost povrchu řezné plochy (vzorek č.15) zhotovené řezáním laserem s podporou vzduchu je $3,5 \mu\text{m}$, čili přibližně 2x větší než je tomu u řezu zhotoveného dusíkem.

Optimální parametry pro řezání oceli 17240 tloušťky 3mm jsou uvedeny v tabulce č.7.39. Na obrázku 7.20 jsou viditelné na spodní hraně řezné plochy otřepy, které dosahují maximálních rozměrů $60 \mu\text{m}$. Vzorek č.20 byl řezán laserem v podporou vzduchu vyšší řeznou rychlostí, avšak drsnost řezné plochy se pohybuje kolem $8,1 \mu\text{m}$, což je 4,5x větší než řez zhotoven laserem s podporou dusíku viz obrázek 7.27.

V konečném zhodnocení je důležité znát, k čemu by byla daná součást využívána. Oxidy chromu vytvořené na řezné ploše by nemusely vadit, pokud by se nejednalo o pohledovou plochu. V případě, že by se svařovaly vzorky řezané laserem s podporou vzduchu oxidy chromu by způsobily mezikrystalickou oxidaci, a tím značné snížení pevnosti spoje.

Lepší výsledky u korozivzdorné oceli řezané vzduchem jsou způsobeny obsahem dusíku ve stlačeném vzduchu, který se pohybuje kolem 78%. Z tohoto důvodu se dalo předpokládat, že bude dosaženo lepších výsledků právě u již zmíněné korozivzdorné oceli, která se běžně řeže laserem s podporou dusíku.

Hodnocení zjištění spotřeby stlačeného vzduchu

Zjištění spotřeby stlačeného vzduchu je důležitý parametr pro zhodnocení vhodnosti této metody laserového řezání s podporou vzduchu. Naměřené hodnoty spotřeby stlačeného vzduchu jsou uvedeny v tabulkách 8.1-8.4. Tyto hodnoty jsou porovnány s odečtenými hodnotami spotřeby kyslíku a dusíku. Porovnání spotřeby plynů pro řezání ocelí 11321 a 17240 jsou znázorněna v grafech 8.1-8.4.

Porovnání spotřeby kyslíku a vzduchu při laserovém řezání oceli 11321 tloušťky 1mm je v grafu č.1. Z tohoto grafu je patrný rozdíl, který je způsoben tlakem použitého plynu při řezání.

Srovnání spotřeby vzduchu a dusíku je zobrazeno v grafech 8.2-8.4. Z těchto grafů je patrný lineární nárůst spotřeby dusíku přibližně o 5Nm^3 se zvýšením tloušťky řezaného materiálu o 1mm.

Hodnocení měření drsnosti řezných ploch

Měření drsnosti slouží k porovnání drsnosti řezných ploch vzorků řezaných laserem s podporou vzduchu se vzorky řezanými dusíkem a kyslíkem. Naměřené hodnoty drsností jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce č.9.1. Po vynesení hodnot drsností $Rz5$ do grafu č.3.1 je zřejmé, že vyjma dvou bodů, které jsou na hranici oblasti třetího tolerančního pole, se drsnosti vzorků řezaných laserem s podporou vzduchu pohybují v oblasti prvního a druhého tolerančního pole. Dle tabulky č.3.1 platí pro vzorky řezané vzduchem $Rz5 \leq 40\mu\text{m}$. Drsnost $Rz5$ řezaných vzorků laserem s podporou kyslíku a dusíku se pohybují v oblasti prvního tolerančního pole, kde platí $Rz5 \leq 10\mu\text{m}$.

11. EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

V ekonomickém hodnocení byla zhodnocena ekonomika provozu laseru s podporou různých plynů při řezání. Ceny jednotlivých použitých plynů jsou smluvní mezi Linde Gas a.s. a Dendera a.s.

Smluvní hodnoty:

Cena 1 kg LOX je 4,65Kč. Z 1 kg LOX vznikne $0,700\text{Nm}^3$ plynného kyslíku (při 0°C a $1013,25\text{mbar}$). Cena byla přepočítána na 1Nm^3 čili $6,64\text{Kč}/\text{Nm}^3$ kyslíku.

Cena 1 kg LIN je 7,38Kč. Z 1 kg LIN vznikne $0,800\text{Nm}^3$ plynného dusíku (při 0°C a $1013,25\text{mbar}$). Cena byla přepočítána na 1Nm^3 čili $9,23\text{Kč}/\text{Nm}^3$ dusíku.

Cena stlačeného vzduchu je $0,63\text{Kč}/\text{Nm}^3$.

Při řezání laserem s podporou kyslíku byla použita tryska o výstupním průměru 1mm, při řezání laserem s podporou dusíku byla využita tryska o výstupním průměru 2mm pro dané tloušťky materiálu. Při výpočtu ekonomiky provozu laserového řezání s podporou různých plynů se vycházelo z tabulek spotřeby plynů 8.1 - 8.4.

Ekonomika provozu byla spočítána dle vzorce:

$$N = C \cdot S$$

kde

N jsou náklady na 1 hodinu provozu laseru [Kč/h]

C - cena za 1Nm^3 plynu [Kč/ Nm^3]

S - spotřeba plynu za 1 hodinu provozu [Nm^3/h]

Ekonomický výpočet a srovnání metod laserového řezání oceli 11321 tloušťky 1mm

Laserové řezání s podporou vzduchu

Naměřena spotřeba vzduchu na průtokoměru: $5,5\text{Nm}^3/\text{h}$

$$N = C \cdot S = 0,63\text{Kč} / \text{Nm}^3 \cdot 5,5\text{Nm}^3 / \text{h} = \underline{3,47\text{Kč} / \text{h}}$$

Laserové řezání s podporou kyslíku

Naměřena spotřeba kyslíku na průtokoměru: $1,7\text{Nm}^3/\text{h}$

$$N = C \cdot S = 6,64\text{Kč} / \text{Nm}^3 \cdot 1,7\text{Nm}^3 / \text{h} = \underline{11,29\text{Kč} / \text{h}}$$

Ekonomické srovnání metod laserového řezání oceli 17240 tloušťky 1mm

Laserové řezání s podporou vzduchu

Naměřena spotřeba vzduchu na průtokoměru: $9,9\text{Nm}^3/\text{h}$

$$N = C \cdot S = 0,63\text{Kč} / \text{Nm}^3 \cdot 9,9\text{Nm}^3 / \text{h} = \underline{6,24\text{Kč} / \text{h}}$$

Laserové řezání s podporou dusíku

Naměřena spotřeba kyslíku na průtokoměru: $18\text{Nm}^3/\text{h}$

$$N = C \cdot S = 9,23\text{Kč} / \text{Nm}^3 \cdot 18\text{Nm}^3 / \text{h} = \underline{166,14\text{Kč} / \text{h}}$$

Ekonomické srovnání metod laserového řezání oceli 17240 tloušťky 2mm

Laserové řezání s podporou vzduchu

Naměřena spotřeba vzduchu na průtokoměru: $9,9\text{Nm}^3/\text{h}$

$$N = C \cdot S = 0,63\text{Kč} / \text{Nm}^3 \cdot 9,9\text{Nm}^3 / \text{h} = \underline{6,24\text{Kč} / \text{h}}$$

Laserové řezání s podporou dusíku

Naměřena spotřeba kyslíku na průtokoměru: $23\text{Nm}^3/\text{h}$

$$N = C \cdot S = 9,23\text{Kč} / \text{Nm}^3 \cdot 23\text{Nm}^3 / \text{h} = \underline{212,29\text{Kč} / \text{h}}$$

Ekonomické srovnání metod laserového řezání oceli 17240 tloušťky 3mm

Laserové řezání s podporou vzduchu

Naměřena spotřeba vzduchu na průtokoměru: $9,9\text{Nm}^3/\text{h}$

$$N = C \cdot S = 0,63\text{Kč} / \text{Nm}^3 \cdot 9,9\text{Nm}^3 / \text{h} = \underline{6,24\text{Kč} / \text{h}}$$

Laserové řezání s podporou dusíku

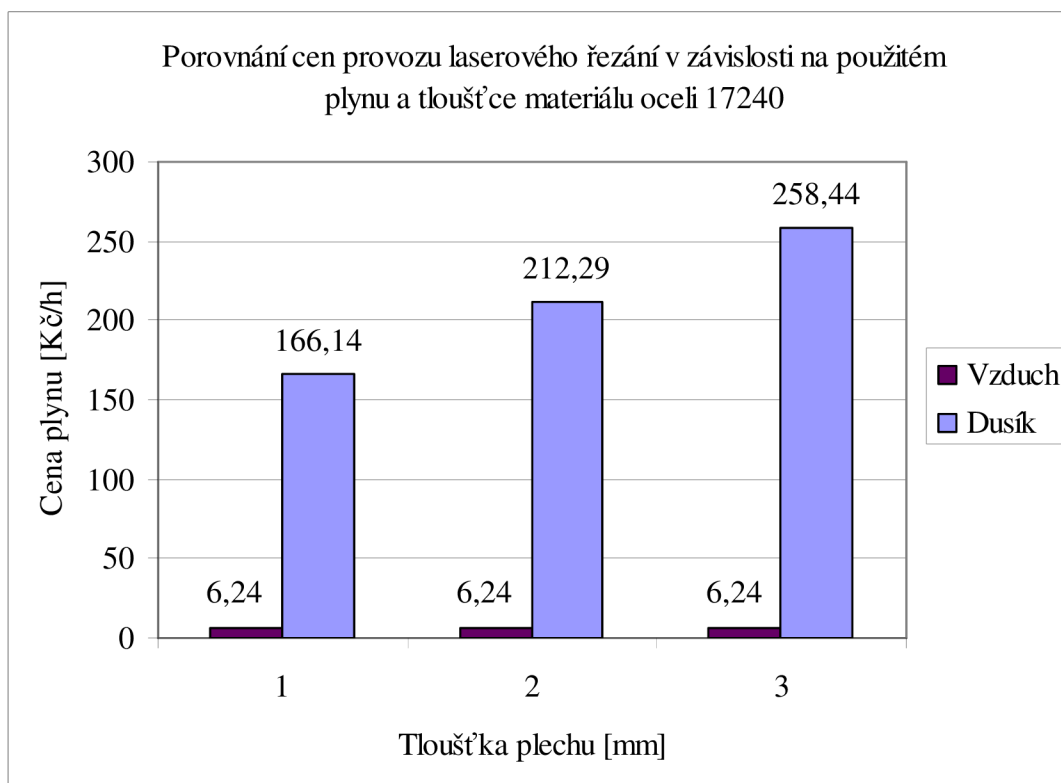
Naměřena spotřeba kyslíku na průtokoměru: $28\text{Nm}^3/\text{h}$

$$N = C \cdot S = 9,23\text{Kč} / \text{Nm}^3 \cdot 28\text{Nm}^3 / \text{h} = \underline{258,44\text{Kč} / \text{h}}$$

Podle výpočtu ekonomiky provozu řezání laserem ocel 11321 tloušťky 1mm vychází řezání vzduchem přibližně 3x levnější ve srovnání s oxidační metodou laserového řezání. Laserové řezání vzduchem je levnější, avšak zdaleka nebylo dosaženo kvality řezné plochy řezané laserem s podporou kyslíku.

Dle ekonomického výpočtu pro řezání oceli 17240 vyšlo řezání vzduchem přibližně 26-41x levnější v závislosti na řezané tloušťce materiálu. Tento velký rozdíl je způsoben tím, že při řezání dusíkem se využívá vyšší tlak plynu a cena 1Nm^3 dusíku je přibližně 15x vyšší než cena vzduchu. Grafické porovnání cen provozu laserového řezání s podporou vzduchu a dusíku pro tři tloušťky materiálu oceli 17240 je vyobrazeno v grafu č.11.1.

Graf č.11.1 Porovnání cen provozu laserového řezání v závislosti na použitém plynu a tloušťce materiálu oceli 17240



12. ZÁVĚRY

V této diplomové práci byla zkoumána možnost praktického využití laserového řezání s podporou vzduchu jako možná náhrada stávajících metod. Dle zadání byl použit materiál oceli 11321 a dále korozivzdorná ocel 17240, oba materiály ve formě plechu. Ocel 17240 byla zvolena, protože se ve firmě často zpracovává a je dostatek plechů této oceli ve formě zbytků. Jako další pohled na volbu této oceli byla snaha zjistit reakci vzduchu jako řezného plynu na korozivzdornou ocel. Experiment byl proveden na CO₂ laseru ve spolupráci s firmou Dendera a.s.

V experimentální části bylo hlavním úkolem nalézt optimální parametry pro řezání zadané a zvolené oceli laserem s podporou vzduchu. Pro možnost porovnání kvality řezné plochy, drsnosti a otřepů byly vyřezány vzorky laserem konvenčními metodami, čili kyslíkem a dusíkem.

U řezání oceli 11321 laserem s podporou vzduchu bylo dosaženo neuspokojivých výsledků. Tato ocel se podařila řezat vzduchem pouze do tloušťky materiálu 1mm s otřepy na spodní hraně do 80 μm a drsnosti řezné plochy Ra kolem 5,6 μm , což je 3krát větší v porovnání s řezem zhotoveným kyslíkem.

U řezání oceli 17240 bylo naopak dosaženo dobrých výsledků. Tuto ocel se podařilo úspěšně řezat vzduchem do tloušťky materiálu 3mm. Na spodní hraně řezné plochy u tloušťek materiálu 1mm a 2mm se nevyskytují téměř žádné otřepy. U tloušťky materiálu 3mm se vyskytují otřepy na spodní hraně do velikosti maximálně 60 μm , což je technicky přijatelné. Na řezné ploše řezané laserem s podporou vzduchu vznikly oxidy chromu, které jsou způsobeny reakcí kyslíku s roztaveným kovem. Pravděpodobně se jedná o oxid chromitý, který se vyznačuje zelenou barvou. Vznik oxidů chromu na řezné ploše nemusí být vadou, pokud by se nejednalo o pohledovou plochu součásti. Dle ekonomiky provozu laseru vychází řezání vzduchem 26-41x levnější ve srovnání s laserovým řezáním dusíkem v závislosti na řezané tloušťce materiálu. Řezané kusy laserem s podporou vzduchu jsou sice mnohem levnější, avšak drsnost řezné plochy je několikanásobně větší.

V konečném důsledku záleží na požadavcích zákazníka a na tom, k čemu bude daná součást využívána. Vzhledem k velice dobrým výsledkům řezání korozivzdorné oceli laserem s podporou vzduchu se vedení firmy Dendera a.s. rozhodlo, že umístí tento proces výroby do své nabídky.

Mezi důležité aspekty využívání technologie laserového řezání s podporou vzduchu patří snaha o zlevnění nabízené služby a snížení závislosti na dodavatelských technických plynech. V dnešní době se na trhu již objevují stanice, které zákazníkovi umožňují přímo výrobu dusíku ze stlačeného vzduchu pomocí speciálních molekulárních filtrů. Zatím je tato technologie výroby dusíku finančně nákladná, ale vývoj jde kupředu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BENKO B., FODEREK P., KOSECEK M., BIELAK R.l: *Laserové technológie*, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
- [2] *Laserart.wbs.cz* [online]. 2009-03-26 [cit. 2010-05-10]. Historie laseru. Dostupné z WWW: <http://www.laserart.wbs.cz/Historie_laseru.html>.
- [3] VOJTA, Filip. *Princip laseru* [online]. [s.l.], 2003. 8 s. Seminárni práce. Pedagogická fakulta Jihočeské univerzity. Dostupné z WWW: <<http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>>.
- [4] *Laser processing : Technical information* [online]. Ditzingen : TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG, 2007-02 [cit. 2010-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.trumpf.com>>.
- [5] SINOR, Milan; DRSKA, Ladislav. *Virtuální katedra fyzikálních věd a infromatické pedagogiky* [online]. 241000. 2001 [cit. 2010-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://vega.fjfi.cvut.cz/vegacont.htm>>.
- [6] HAVRÁNEK, Miroslav. *Aldebaran.cz* [online]. 2009-11-27 [cit. 2010-05-10]. Nejmenší polovodičový laser na světě. Dostupné z WWW: <http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_45_las.php>. ISSN 1214-1674.
- [7] PASCHOTTA, Rüdiger. *Rp-photonics.com* [online]. 2009-07-09 [cit. 2010-05-10]. Encyclopedia of Laser Physics and Technology. Dostupné z WWW: <<http://www.rp-photonics.com/modes.html>>.
- [8] ŠULC, Jan. *Průmyslové aplikace laserových systémů* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2004-07-13 [cit. 2010-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>>.
- [9] *Cs.wikipedia.org* [online]. 1999 [cit. 2010-05-10]. Laser. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>>.
- [10] *Kovoplazma.cz* [online]. 2001-12-04 [cit. 2010-05-10]. Strojní park. Dostupné z WWW: <<http://www.kovoplazma.cz/park.php>>.
- [11] *Laserové a plazmové řezání* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2010-01-12 [cit. 2010-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>>.
- [12] ZATLOUKAL, Petr. *Welding.cz* [online]. Brno : 2007-05-10 [cit. 2010-05-10]. Laserové dělení materiálu. Dostupné z WWW: <<http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>>.
- [13] TURŇA, Milan; KOVAČÓCY, Pavel. *Zváranie laserovým lúčom*. 1. vydanie. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2003. 90 s. ISBN 80-227-1921-8.
- [14] *Laser.zcu.cz* [online]. 2010 [cit. 2010-05-10]. Rozdělení laserů. Dostupné z WWW: <<http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>>.

- [15] SVOBODA, Marek. V popředí stojí aplikace – nikoli laserová technologie. *MMPS* [online]. 2008-07, 080728, [cit. 2010-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/v-popredi-stoji-aplikace-nikoli-laserova-technologie+>>.
- [16] *linde-gas.cz* [online]. 2008 [cit. 2010-05-10]. Dostupné z WWW: <www.linde-gas.cz>.
- [17] ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. *MMPS* [online]. 2008-03, 080304, [cit. 2010-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>>.
- [18] TŘEŠŇÁK, Kamil. *Printing.cz* [online]. 2001-02-09 [cit. 2010-05-10]. Principy laserů a jejich rozdělení. Dostupné z WWW: <http://www.printing.cz/art/ctp/ctp_principy_laseru.html>.
- [19] ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Praha : Český Normalizační Institut, 2003-10. 28 s.
- [20] *Bedienungsanleitung : NC-Laserschneidmaschine FO Serie* [online]. Haan : [s.n.], 2001-03 [cit. 2010-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://amada.de/default.asp?fid=0&sid=147&L=2>>.
- [21] *Nerezy.cz* [online]. 1999 [cit. 2010-05-11]. Charakteristika nerezových ocelí. Dostupné z WWW: <<http://www.nerezy.cz/akfs/index.php?menu=234&PHPSESSID=935b57aa54b5122ed179b6e0aff1f7e0>>.
- [22] ČSN 41 1321. *Československá štátna norma : Ocel 11321*. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, 1988-09-01. 2 s.
- [23] ČSN 41 7240. *NÁVRH ČESKOSLOVENSKÉ STÁTNÍ NORMY : Ocel 17240 Cr Ni*. Praha : Úřad pro normalizaci a měření, 1972-11-29. 5 s.
- [24] *Amada.de* [online]. 1990 [cit. 2010-05-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.amada.de>>.
- [25] *Ifm-electronic.cz* [online]. 1998 [cit. 2010-05-11]. Výrobky. Dostupné z WWW: <<http://www.ifm-electronic.cz/ifmcz/web/dsfs!SD6000.html>>.
- [26] *Laser and laser cutting : Workbook*. Ditzingen : Trumpf GmbH+Co, 1994-02. 126 s.
- [27] *Bedienungsanleitung : Hommelwerke*. Germany : Springer, 1996. 96 s. ID 022942.
- [28] MRŇA, Libor. Vliv optických vlastností paprsku na geometrii řezu : K číslo. In MRŇA, Libor. *Fyzika-dělení*. Brno : [s.n.], 2008. s. 3.
- [29] *Hommel-etamic.cz* [online]. 2002 [cit. 2010-05-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.hommel-etamic.cz/cz/index.asp>>.
- [30] *Jvkompresory.cz* [online]. 2003 [cit. 2010-05-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.jvkompresory.cz/>>.

[31] *Výroba a rozvod stlačeného vzduchu* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2006 [cit. 2010-05-11].
Dostupné z WWW: <www.umt.fme.vutbr.cz/~svechet/main/storage/vp2/cpt02.ppt>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

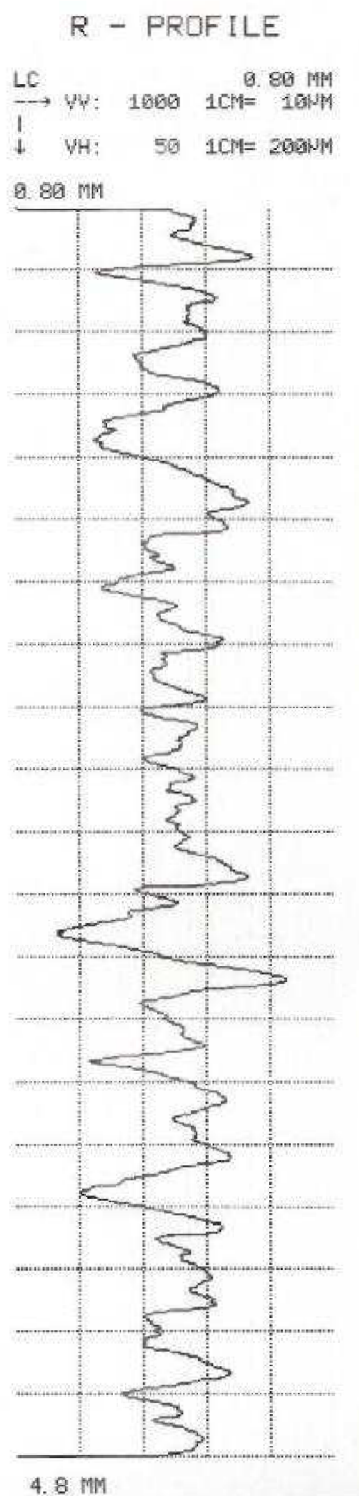
Označení	Legenda	Jednotka
a	Tloušťka řezu	[mm]
A	Tažnost	[%]
C	Cena 1Nm ³ plynu	[Kč / Nm ³]
C	Velikost otřepů	[μm]
d	Průměr trysky	[mm]
D	Průměr vstupního paprsku do čočky	[mm]
e	Základ přirozených logaritmů	[-]
E	Energetický rozdíl mezi hladinami	[J]
f	Ohnisková vzdálenost	[mm]
h	Planckova konstanta	[J · s]
I	Intenzita záření v paprsku	[W · mm ⁻²]
I ₀	Intenzita záření ve středu paprsku	[W · mm ⁻²]
k	Boltzmannova konstanta	[J · K ⁻¹]
K	Odlišení reálného paprsku od teoreticky ideálního gaussova svazku	[-]
L	Vzdálenost zrcadel	[m]
n	Skuz	[μm]
N	Náklady na 1 hodinu provozu laseru	[Kč/h]
N ₁	Počet částic na hladině s nižší energií	[-]
N ₂	Počet částic na hladině s vyšší energií	[-]
P	Tlak plynu	[MPa]
r	Radiální vzdálenost od osy paprsku	[mm]
r ₀	Definovaný poloměr paprsku	[mm]
Ra	Střední hodnota drsnosti	[μm]
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rz5(R3z)	Základní drsnost	[μm]
s	Tloušťka materiálu	[mm]
S	Spotřeba plynu za 1 hodinu provozu	[Nm ³ /h]
SPP	Parametr paprsku	[mm · mrad]
T	Teplota soustavy	[K]
v	Rychlost řezání	[m · min ⁻¹]
V/t	Spotřebovaný objem plynu za čas	[Nm ³ / h]
w ₀	Průměr zaostřeného paprsku	[mm]
λ	vlnová délka	[mm]
θ	úhel divergence	[mrad]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ν	frekvence vyzářeného fotonu	[s ⁻¹]

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č.1 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.1
- Příloha č.2 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.2
- Příloha č.3 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.3
- Příloha č.4 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.4
- Příloha č.5 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.5
- Příloha č.6 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.6
- Příloha č.7 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.7
- Příloha č.8 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.8
- Příloha č.9 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.9
- Příloha č.10 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.10
- Příloha č.11 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.11
- Příloha č.12 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.12
- Příloha č.13 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.13
- Příloha č.14 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.14
- Příloha č.15 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.15
- Příloha č.16 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.16
- Příloha č.17 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.17
- Příloha č.18 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.18
- Příloha č.19 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.19
- Příloha č.20 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.20
- Příloha č.21 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.21
- Příloha č.22 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.22
- Příloha č.23 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.23
- Příloha č.24 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.24
- Příloha č.25 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.25
- Příloha č.26 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.26
- Příloha č.27 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.27
- Příloha č.28 Materiálový list oceli 11321
- Příloha č.29 Materiálový list oceli 17240

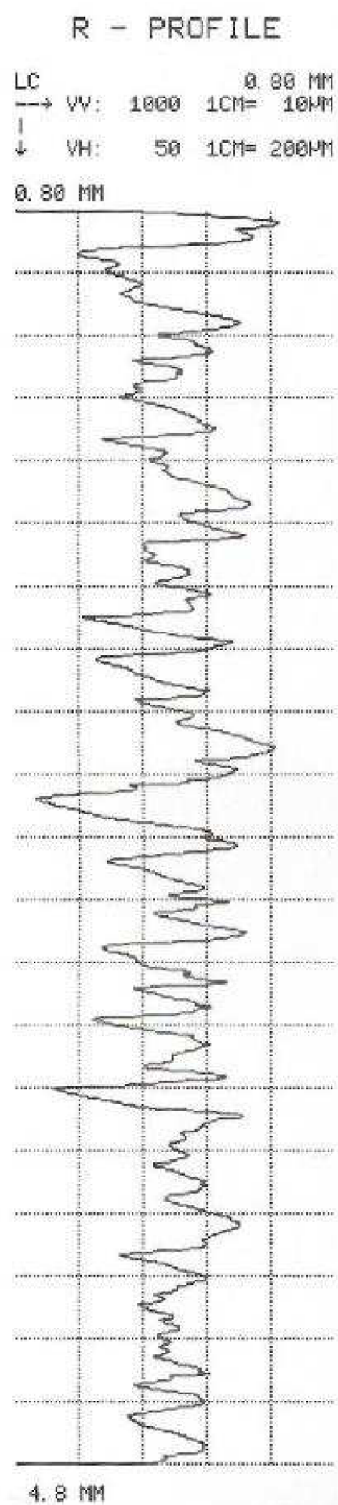
Příloha č.1 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.1

RT	35.9	µM
RMAX	32.2	µM
RZ-D	25.3	µM
RA	4.6	µM
R3Z	16.3	µM
RZ-I	26.5	µM
RQ	5.9	µM
PT'	43.8	µM
WT'	17.2	µM
NR	60	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



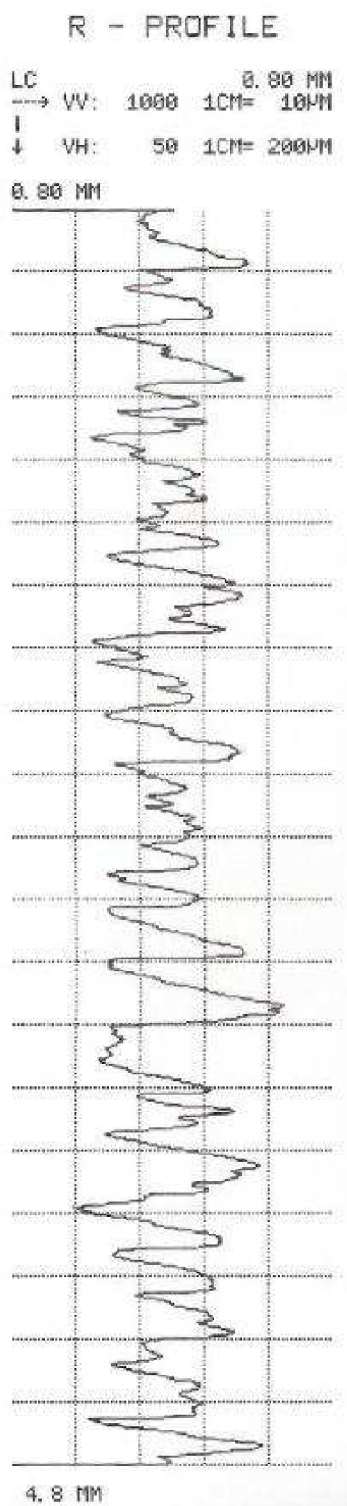
Příloha č.2 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.2

RT	38.0 μM
RMAX	37.4 μM
RZ-D	28.5 μM
RA	5.1 μM
R3Z	16.4 μM
RZ-I	29.8 μM
RQ	6.5 μM
PT'	43.8 μM
WT'	18.0 μM
NR	70/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



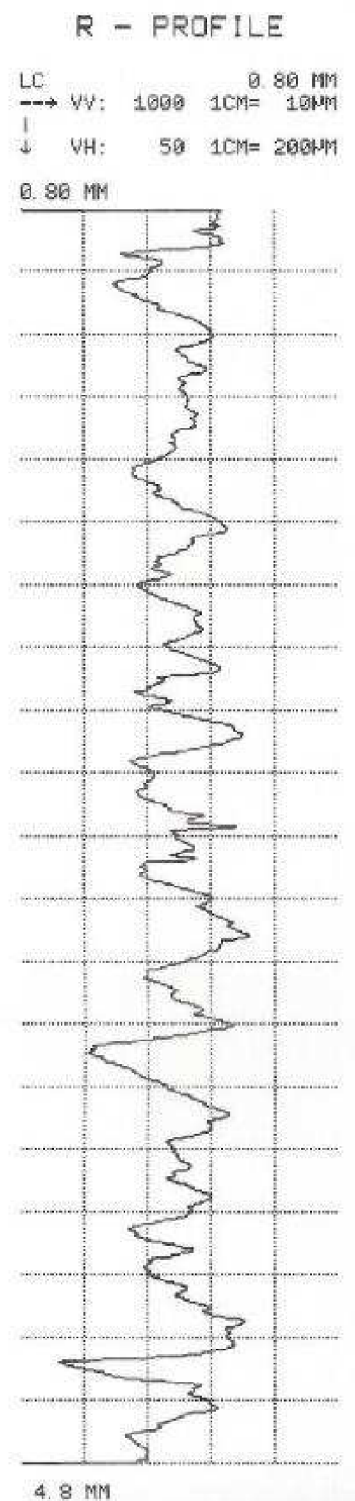
Příloha č.3 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.3

RT	32.6	µM
RMAX	32.6	µM
RZ-D	25.8	µM
RA	5.2	µM
R3Z	21.0	µM
RZ-I	26.6	µM
RQ	6.3	µM
PT'	37.6	µM
WT'	13.0	µM
NR	72	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



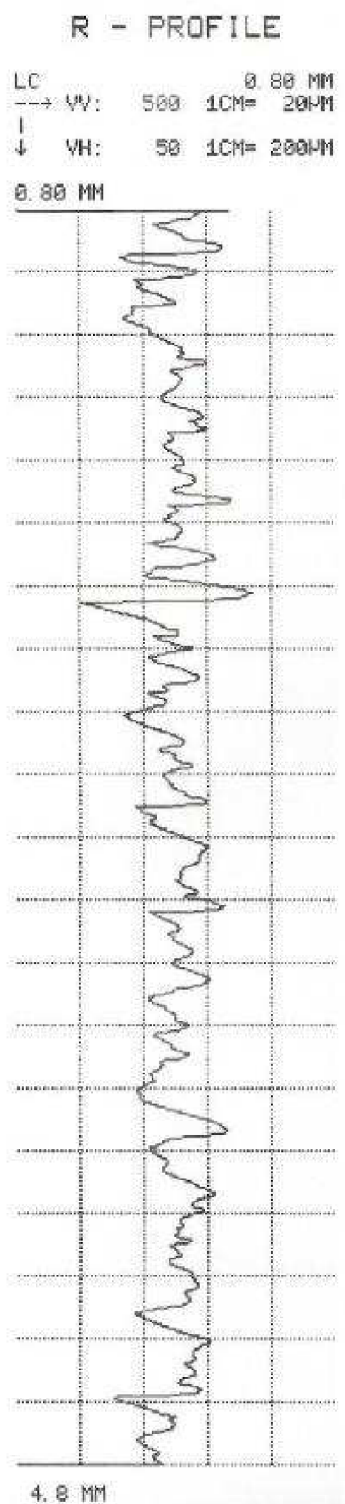
Příloha č.4 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.4

RT	29.5 μM
RMAX	28.9 μM
RZ-D	20.4 μM
RA	4.1 μM
R3Z	16.3 μM
RZ-I	21.4 μM
RQ	5.1 μM
PT'	29.7 μM
WT'	15.0 μM
NR	50/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



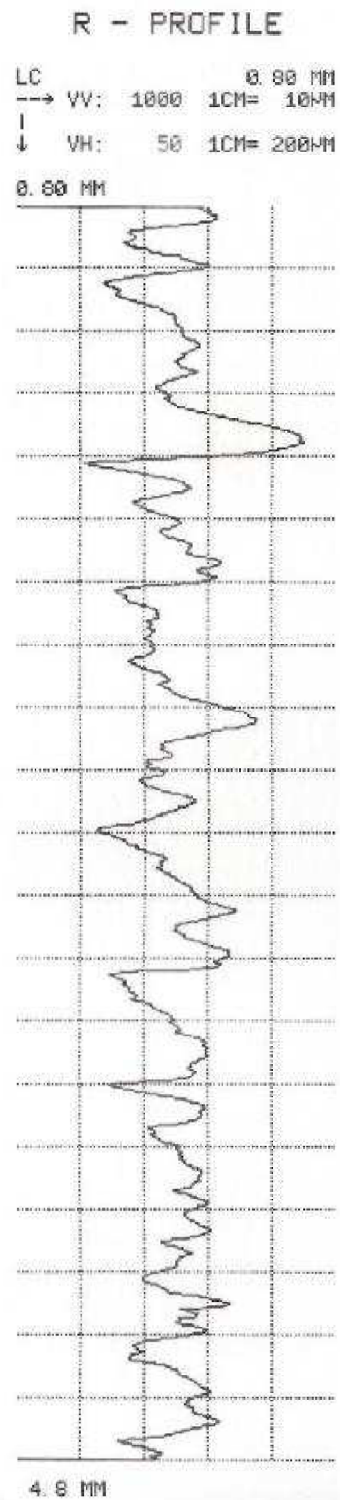
Příloha č.5 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.5

RT	53.3 μM
RMAX	53.3 μM
RZ-D	35.1 μM
RA	5.6 μM
R3Z	20.6 μM
RZ-I	36.7 μM
RQ	7.3 μM
PT'	59.9 μM
WT'	23.8 μM
NR	77/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



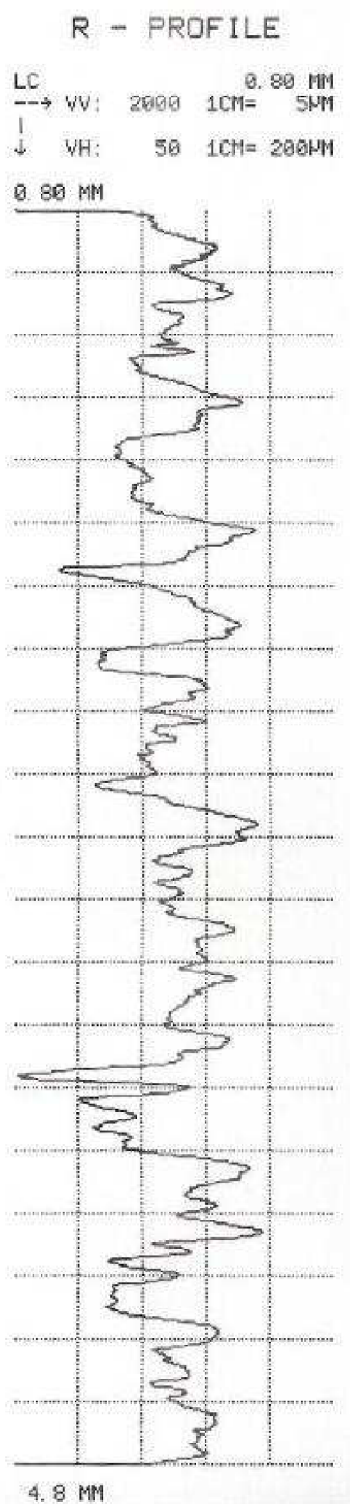
Příloha č.6 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.6

RT	34.2	µM
RMAX	31.2	µM
RZ-D	22.4	µM
RA	4.1	µM
R3Z	16.5	µM
RZ-I	23.5	µM
RQ	5.4	µM
PT'	34.8	µM
WT'	18.2	µM
NR	52	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



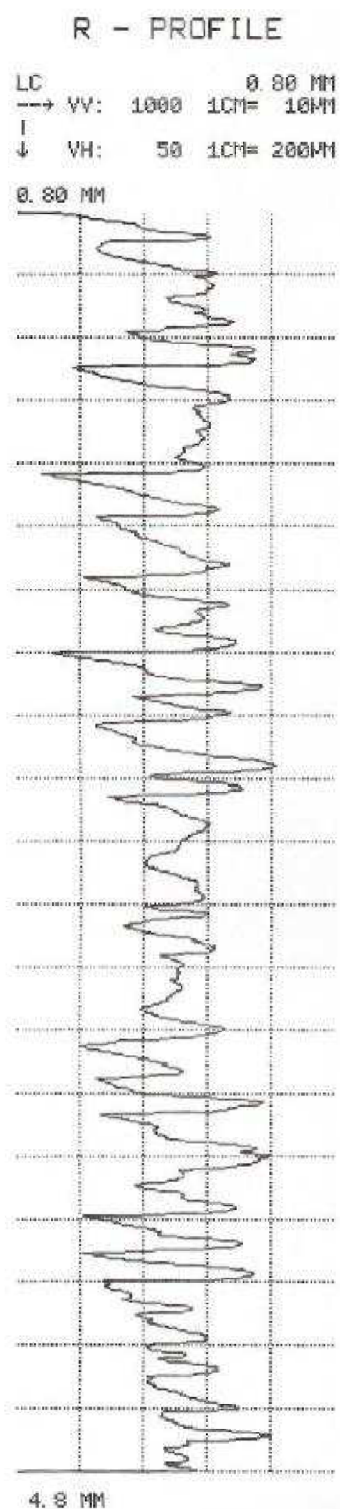
Příloha č.7 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.7

RT	19.1	µM
RMAX	18.0	µM
RZ-D	13.6	µM
RA	2.5	µM
R3Z	9.9	µM
RZ-I	14.1	µM
RQ	3.2	µM
PT'	22.3	µM
WT'	12.2	µM
NR	70	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



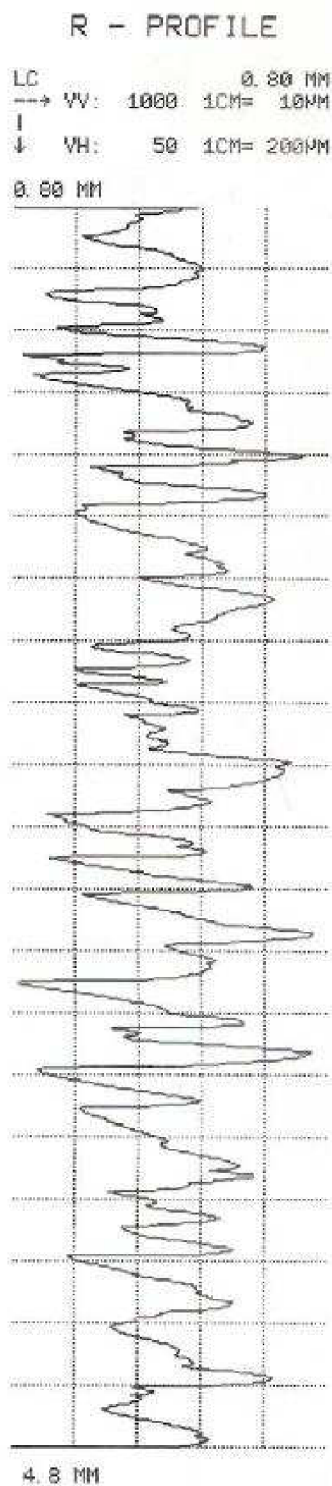
Příloha č.8 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.8

RT	36.7 μM
RMAX	34.8 μM
RZ-D	30.4 μM
RA	5.4 μM
R3Z	22.3 μM
RZ-I	32.4 μM
RQ	6.8 μM
PT'	33.7 μM
WT'	15.3 μM
NR	85/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



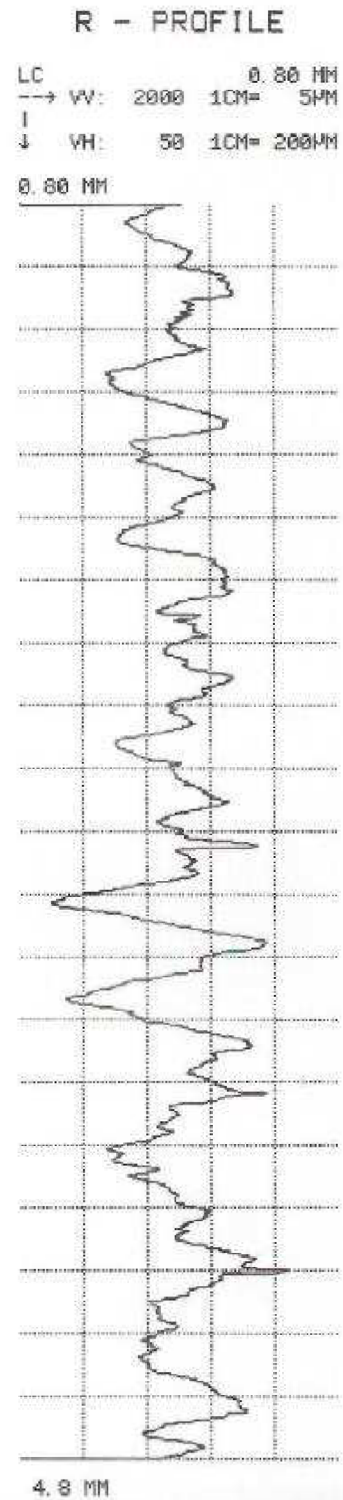
Příloha č.9 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.9

RT	46.9 μM
RMAX	46.5 μM
RZ-D	39.0 μM
RA	7.5 μM
R3Z	28.3 μM
RZ-I	41.8 μM
RQ	9.3 μM
PT'	48.5 μM
WT'	24.0 μM
NR	60/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



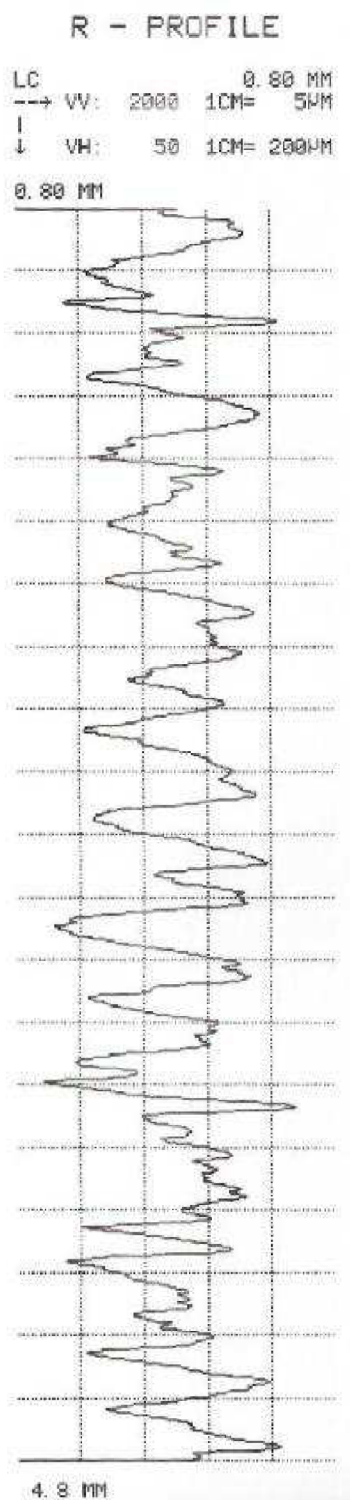
Příloha č.10 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.10

RT	18.6	µM
RMAX	16.8	µM
RZ-D	12.6	µM
RA	2.3	µM
R3Z	9.1	µM
RZ-I	13.9	µM
RQ	3.0	µM
PT'	20.6	µM
WT'	12.3	µM
NR	62	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



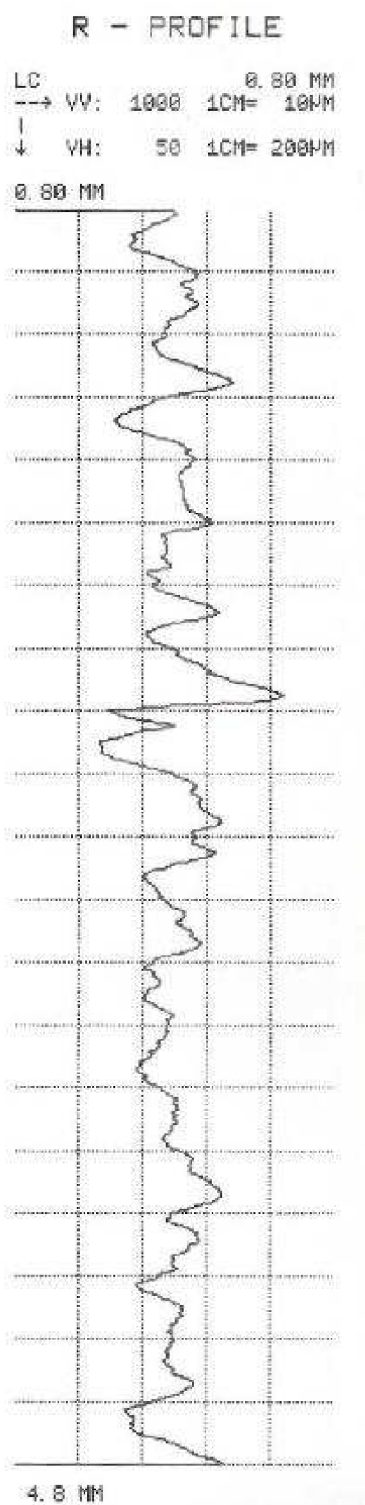
Příloha č.11 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.11

RT	19.7	µM
RMAX	19.7	µM
RZ-D	16.2	µM
RA	3.3	µM
R3Z	12.6	µM
RZ-I	16.5	µM
RQ	3.9	µM
PT'	26.1	µM
WT'	14.4	µM
NR	65	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



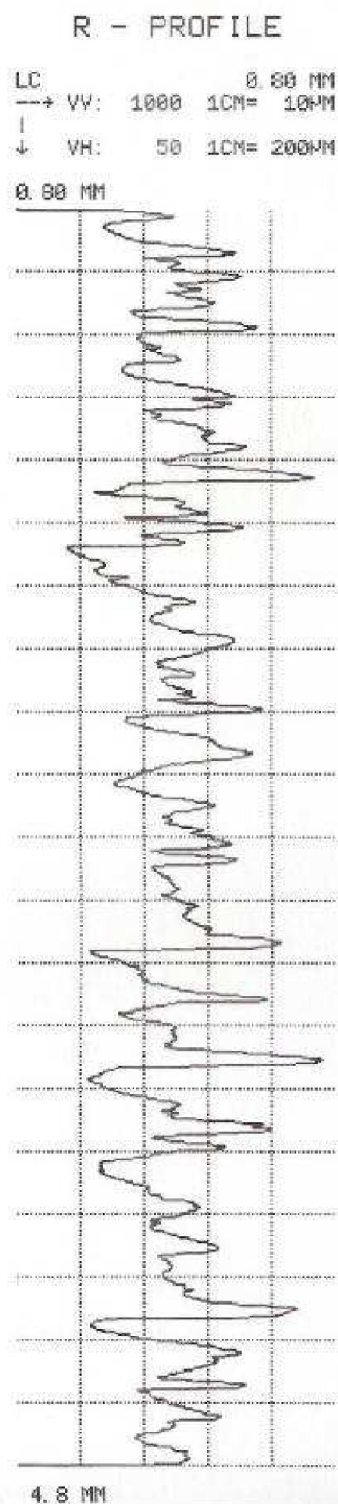
Příloha č.12 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.12

RT	28.7 μM
RMAX	27.3 μM
RZ-D	18.6 μM
RA	3.3 μM
R3Z	12.4 μM
RZ-I	17.8 μM
RQ	4.3 μM
PT'	32.7 μM
WT'	13.6 μM
NR	50/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



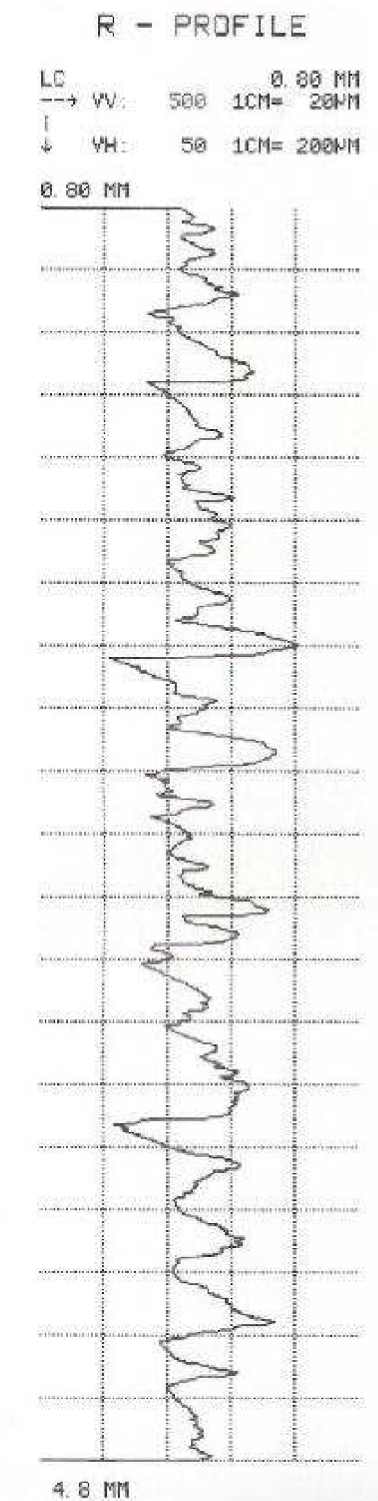
Příloha č.13 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.13

RT	39.9 μM
RMAX	38.7 μM
RZ-D	32.3 μM
RA	5.4 μM
R3Z	20.6 μM
RZ-I	33.1 μM
RQ	6.9 μM
PT'	61.2 μM
WT'	16.9 μM
NR	97/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



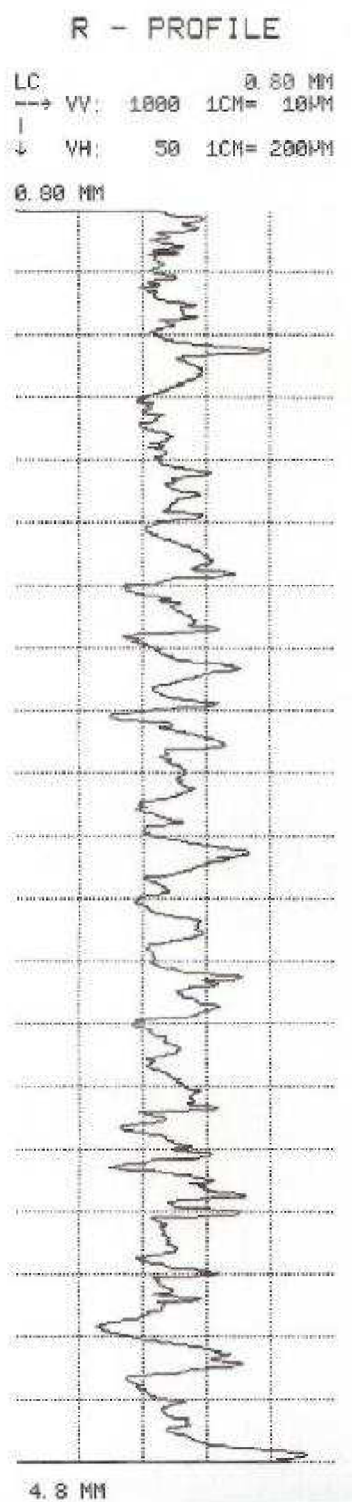
Příloha č.14 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.14

RT	58.1	µM
RMAX	58.1	µM
RZ-D	41.9	µM
RA	7.5	µM
R3Z	27.0	µM
RZ-I	44.2	µM
RQ	9.5	µM
PT'	61.4	µM
WT'	22.2	µM
NR	60	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



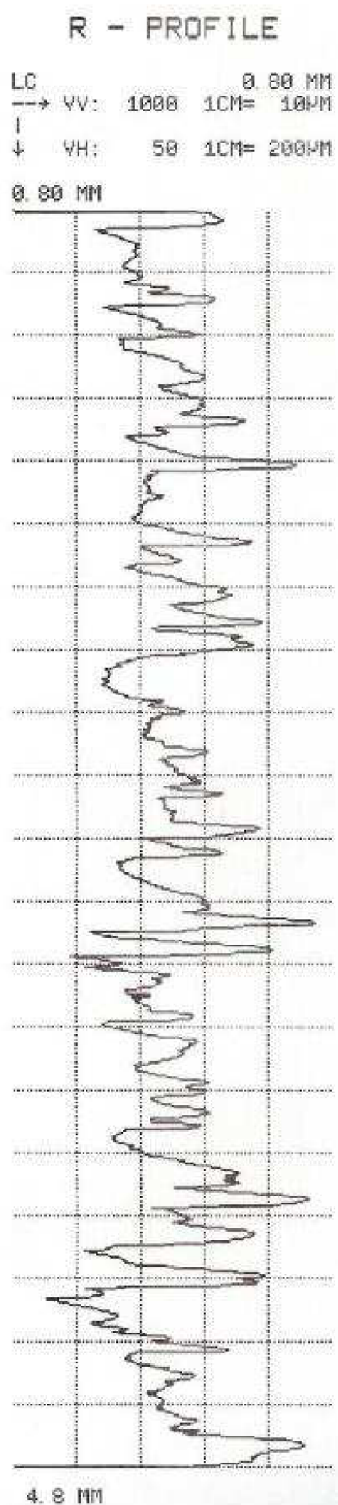
Příloha č.15 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.15

RT	33.1 μM
RMAX	33.1 μM
RZ-D	23.0 μM
RA	3.5 μM
R3Z	15.7 μM
RZ-I	21.6 μM
RQ	4.6 μM
PT'	34.3 μM
WT'	8.2 μM
NR	85/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



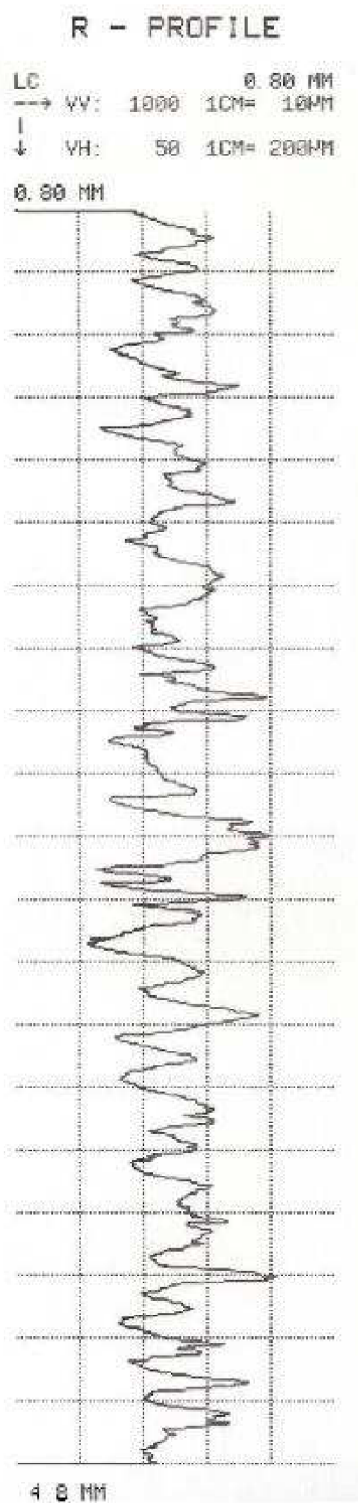
Příloha č.16 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.16

RT	42.1	µM
RMAX	40.2	µM
RZ-D	33.5	µM
RA	5.6	µM
R3Z	22.0	µM
RZ-I	33.5	µM
RQ	7.2	µM
PT'	44.5	µM
WT'	19.3	µM
NR	80	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



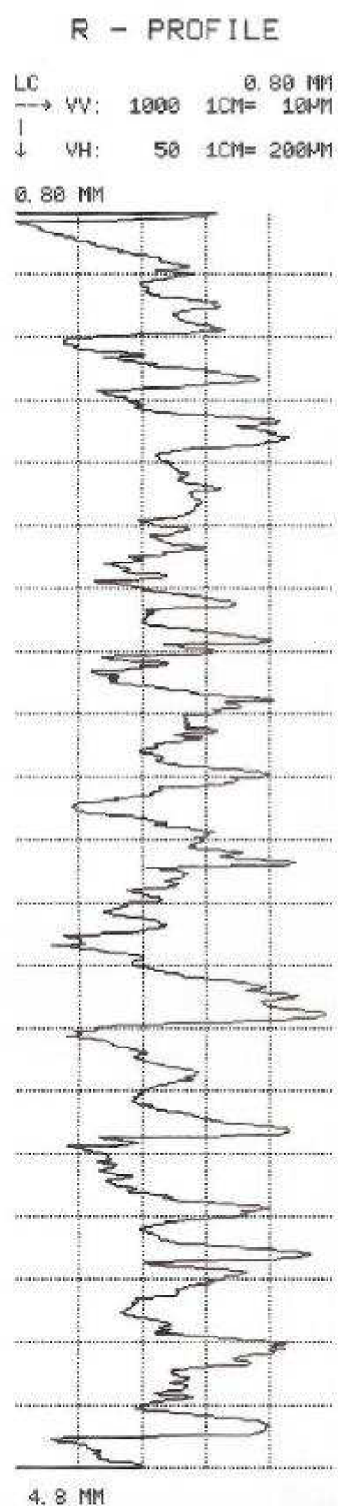
Příloha č.17 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.17

RT	29.5	µM
RMAX	28.6	µM
RZ-D	23.9	µM
RA	4.3	µM
R3Z	17.2	µM
RZ-I	25.5	µM
RQ	5.3	µM
PT'	37.0	µM
WT'	9.6	µM
NR	85	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



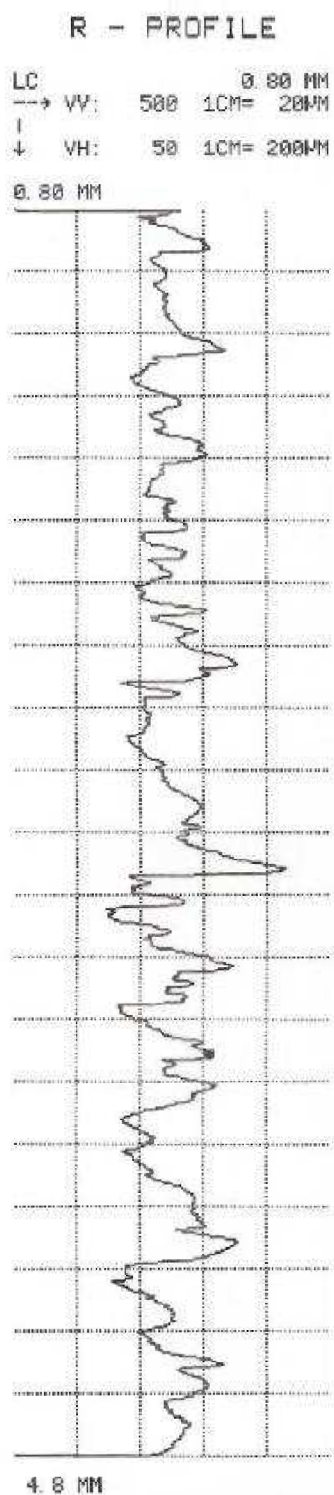
Příloha č.18 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.18

RT	49.6	MM
RMAX	43.7	MM
RZ-D	38.4	MM
RA	7.0	MM
R3Z	28.6	MM
RZ-I	39.3	MM
RQ	8.9	MM
PT'	71.6	MM
WT'	28.6	MM
NR	72	/CM
C1	+000.00	MM
C2	+000.00	MM



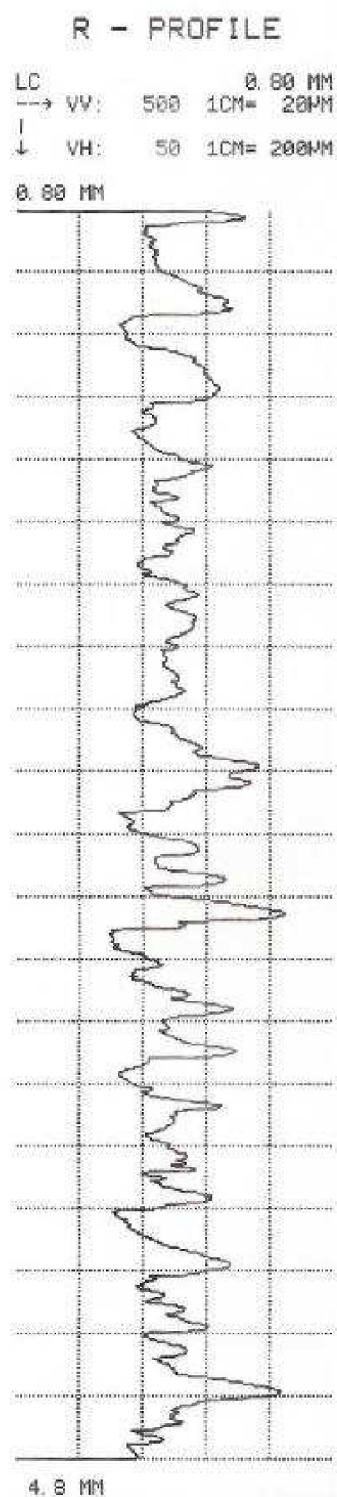
Příloha č.19 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.19

RT	56.5	µM
RMAX	56.5	µM
RZ-D	39.6	µM
RA	7.1	µM
R3Z	25.7	µM
RZ-I	40.2	µM
RQ	8.9	µM
PT'	72.5	µM
WT'	21.0	µM
NR	57	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



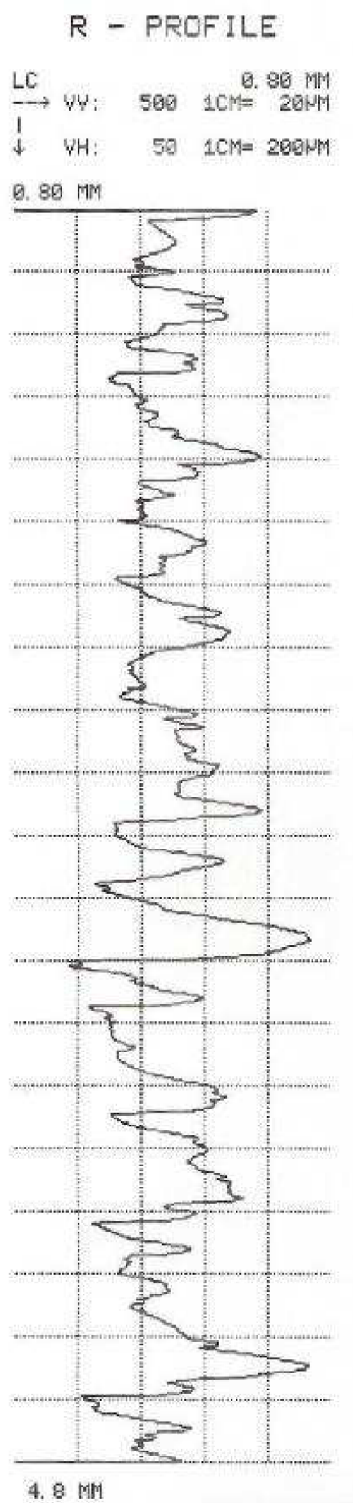
Příloha č.20 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.20

RT	55.8 μM
RMAX	55.8 μM
RZ-D	41.6 μM
RA	8.1 μM
R3Z	31.1 μM
RZ-I	45.7 μM
RQ	10.4 μM
PT'	77.6 μM
WT'	32.1 μM
NR	82/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



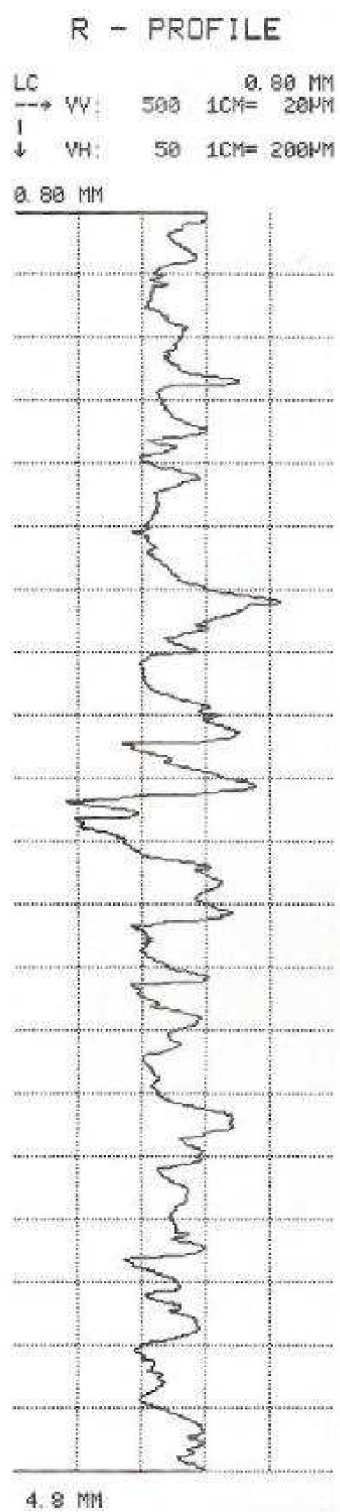
Příloha č.21 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.21

RT	76.4 μM
RMAX	76.4 μM
RZ-D	58.3 μM
RA	11.3 μM
R3Z	43.5 μM
RZ-I	61.5 μM
RQ	14.2 μM
PT'	90.3 μM
WT'	43.4 μM
NR	52/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



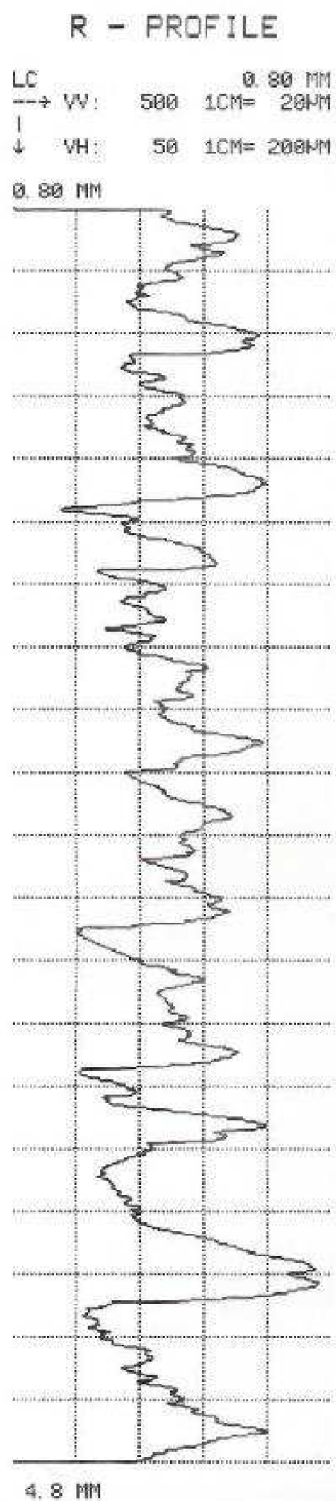
Příloha č.22 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.22

RT	67.0 μM
RMAX	58.8 μM
RZ-D	38.5 μM
RA	7.4 μM
R3Z	27.5 μM
RZ-I	42.0 μM
RQ	9.5 μM
PT'	70.4 μM
WT'	35.8 μM
NR	57/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



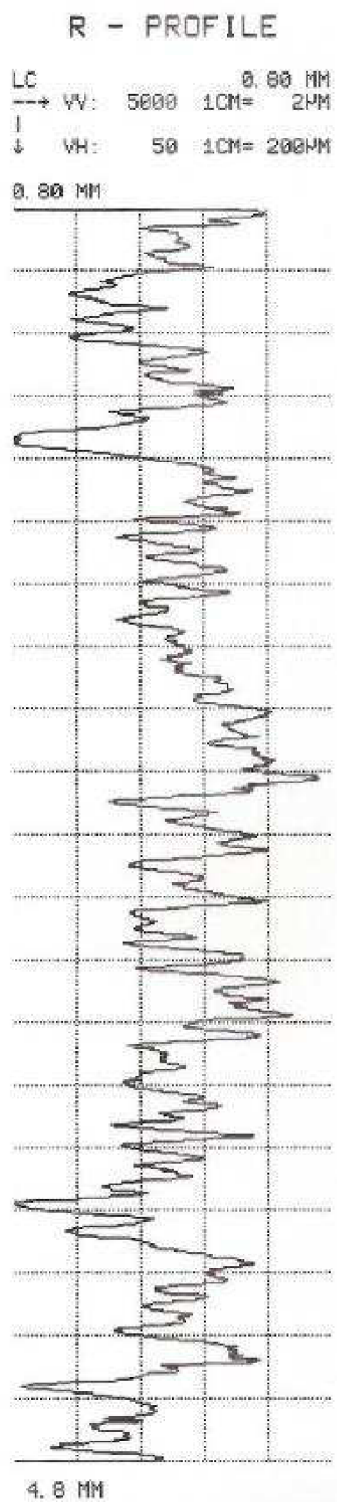
Příloha č.23 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.23

RT	80.6 μM
RMAX	73.6 μM
RZ-D	59.6 μM
RA	12.1 μM
R3Z	45.7 μM
RZ-I	62.5 μM
RQ	15.2 μM
PT'	95.6 μM
WT'	46.2 μM
NR	55/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



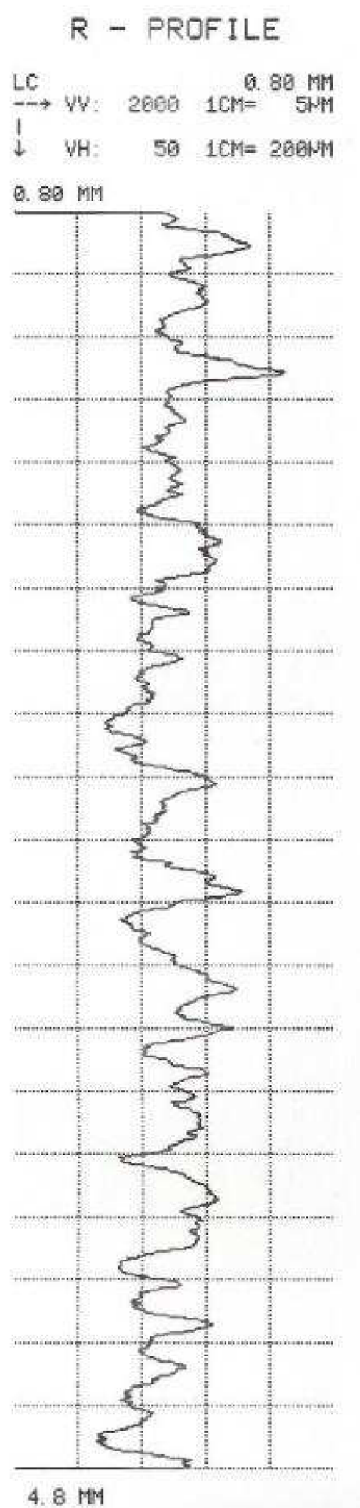
Příloha č.24 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.24

RT	9.7 μM
RMAX	8.9 μM
RZ-D	7.0 μM
RA	1.3 μM
R3Z	5.1 μM
RZ-I	6.9 μM
RQ	1.7 μM
PT'	32.0 μM
WT'	24.1 μM
NR	85/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



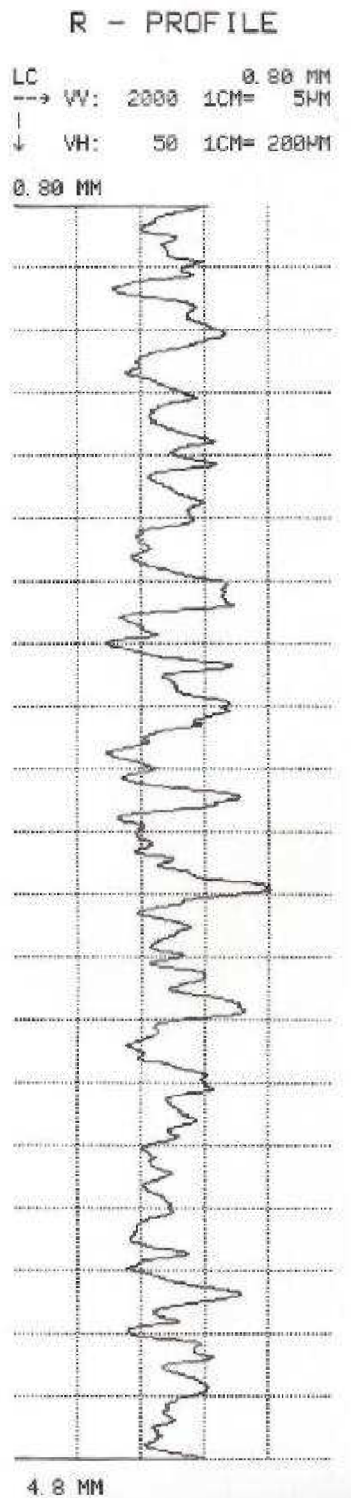
Příloha č.25 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.25

RT	14.6 μM
RMAX	10.9 μM
RZ-D	9.4 μM
RA	1.9 μM
R3Z	7.3 μM
RZ-I	10.7 μM
RQ	2.4 μM
PT'	28.9 μM
WT'	20.6 μM
NR	65/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



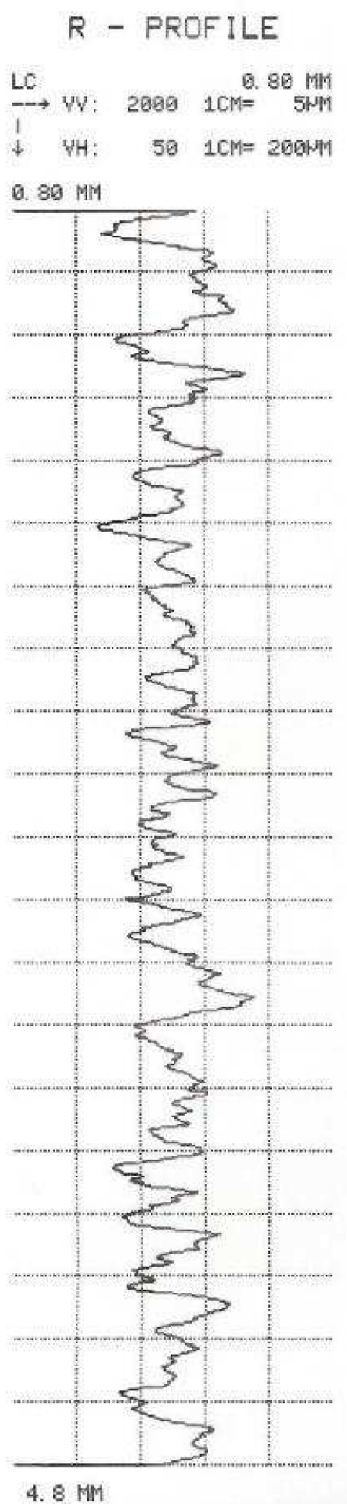
Příloha č.26 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.26

RT	12.8	µM
RMAX	12.8	µM
RZ-D	9.9	µM
RA	1.9	µM
R3Z	7.8	µM
RZ-I	10.6	µM
RO	2.3	µM
PT'	17.3	µM
WT'	6.8	µM
NR	67	/CM
C1	+000.00	µM
C2	+000.00	µM



Příloha č.27 Naměřená data a průběh drsnosti vzorku č.27

RT	12.2 μM
RMAX	11.1 μM
RZ-D	9.6 μM
RA	1.8 μM
R3Z	6.9 μM
RZ-I	10.0 μM
RQ	2.2 μM
PT'	15.1 μM
WT'	6.2 μM
NR	82/CM
C1	+000.00 μM
C2	+000.00 μM



Příloha č.28 Materiálový list oceli 11321

MDT 069.14. 018.202		ČESKOSLOVENSKÁ STÁTNÍ NORMA		Schválená: 17. 8. 1987	
OCEL 11 321		ČSN 41 1321		JK 1254	
Craus 11 321		Steel 11 321			
Skupina ocelí podľa ČSN 42 0074	na fabrikace a tvárnenie za studena				
Chemické zloženie (rozbor tavby)	C	Mn	P	S	
%	max. 0,10	max. 0,45	max. 0,030	max. 0,030	
Trždia odhadu podľa ČSN 42 0030	24. 1-2. 74 X 1				
Posledné označenie podľa ČSN 42 0013	hmedá - zoznámk				
Druh oceli podľa spoločnej výroby	neupokojená - N, alebo upokojená - U				
Výrobok	tenké plechy				
Zhotovenie	válcované za studena				
Stav povrchu	hladký	ČSN 42 0312, +1 alebo ČSN 42 5351, +1			
	mokrý	ČSN 42 0312, +2 alebo ČSN 42 5351, +2			
	zrstený	ČSN 42 0312, +3			
Akčný povrchu	ČSN 42 0312,3 ČSN 42 5351,3				
Rozmery a normy	ČSN 42 0312 ČSN 42 5351				
Technické dodávacie podmienky	ČSN 42 0127 ČSN 42 0108				
Hrúbka	mm	0,20 až 2,00			
Označenie materiálu, stavu a skupiny prevýznamu	11 321.31				
Slav	rekrystalizácia žilavý				
Stupeň protokorozijnosti	Tabuľka prevýznamový za studena (pokračovanie)				
Nahrádza ČSN 41 1321 z 10. 4. 1974		Účinnosť od: 1. 9. 1988			

ČSN 41 1321		235							
Najvyššia medza záťaž R _e	MPa ¹⁾	290 až 380							
Pevnosť v ťahu R _m	MPa ²⁾								
Najnižšia účinnosť A ₅₀ naprieč	%	29							
Skúška ťahom podľa Euriscena (mG) a = hrúbka (mm) b = predĺženie (mm)	a	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34
	b	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7
	a	0,40	0,45	0,50	0,50	0,70	0,80	0,90	1,00
	b	8,0	8,2	8,3	8,8	9,2	9,5	9,9	10,2
	a	1,30	1,50	1,80	2,00				
	b	10,7	11,2	11,7	12,0				
Zväčšenie podľa ČSN 05 1310	pod 0,5 mm pre hrúbky od 0,5 mm	zaručená podmienená							
Charakteristika ocele a vlastnosť použitia	Oceľ na stredné ťahanie. Plechy z tejto oceli sú vhodné na tvárnenie za studena, na ťahanie, potlačenie, pokrývacie a z neupokojenej oceli na anilovanie.								
1) Pre upokojenú oceľ sa zaručuje R _e 0,2 = 245 MPa. 2) Dovoľuje sa protokorozijné hodnoty pevnosti o 10 MPa pri dodržaní ostatných požiadaviek normy.									

DODATOK

Obdobné zahraničné normy

Oceľ 11 321 podľa ČSN 41 1321 odpovedá oceli zn. 08 kp a 08 ps podľa ČUST 9045-S0.

Zmeny oproti predchádzajúcemu vydaniu


Rozšírený druh oceli o upokojenú modifikáciu. Znižovaný obsah P a S z 0,035 % na 0,030 %. Upravený rozsah pevnosti v ťahu. Doplnená hodnota R_e 0,2 pre upokojenú modifikáciu.

Vypracovanie normy

Spracovateľ: Východoslovenské železiarne, n. p., Košice
 Odporové normalizačné stredisko: Výzkumný ústav hutníctví železa, ťažobného priemery, Dobruša
 Pracovník Úradu pro normalizaci a měření: Ing. Vladimír Hošek

U p o z o r n e n i e : Zmeny a doplnky, ako aj správy o novo vydaných normách sú zverejnené vo Vestníku Úradu pro normalizaci a měření.

Návrh * ČSN 41 7240

		OCCEL 17 240 Cr Ni		* ČSN 41 7240 JK 125 <i>Zm a 1</i>			
Číslo 17 240		Steel 17 240		19987 <i>Zm 2 - 2.94</i>			
Tento Návrh se předkládá k přiblížení ověřen, eventuální připomínky zašlete dvojmo Úřadu pro normalizaci a měření nejpozději do 30. 6. 1975. Ustanovení tohoto Návrhu mohou být používána a uplatňována po vzájemné dohodě zájastněných stran.							
Skupina ocelí		korozivzdorná					
Chemické složení (rozbor tabvy)	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
	max. 0,07	max. 2,0	max. 1,0	17,01 až 20,0	9,0 až 11,5	max. 0,045	max. 0,030
Úchytky chemického složení v hotovém výrobku	+ 0,01	+ 0,15	+ 0,05	+ 0,5 — 0,3	+ 0,5 — 0,3		
Třída odpadu podle ČSN 42 0030-026		Barevné značení podle ČSN 42 0010: červená — černá — zelená					
Způsob výroby		elektroocel					
Výrobek		válcová za tepla nebo kováno		plechy			
Provedení		válcová za tepla nebo kováno		válcová za tepla			
Povrch		okoupený a mokrý nebo protřepáný		podle normy technických dodatkých předpisů			
Rozměrová norma		ČSN 42 5516 ČSN 42 5519 ČSN 42 5523		ČSN 42 5515 3			
Technické dodací předpisy		ČSN 42 0221 ČSN 42 0212		ČSN 42 0210			
Označení materiálu a stavu		17 240.4					
Stav		po rozpouštěcím žhání					
Průměr nebo tloušťka mm		nad 100 do 150	do 10	nad 10 do 30			
Nejmenší mez 0,2 $\sigma_{0,2}$ kp/mm ²		19					
Nejmenší mez 1,0 $\sigma_{1,0}$ kp/mm ²		23					
Pevnost v tahu σ_B kp/mm ²		50 až 70					
Nejmenší tažnost δ_5 %		40	37	34			
Nejmenší vrubová houževnatost R3 kp/cm ²	podél	10		14 ^{a)}			
	napříč	7		10 ^{a)}			
Svařitelnost		zaručená					

Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, Praha

ČSN 41 7240

DODATEK

Srovnání s mezinárodním doporučením

* Ocel je srovnatelná se značkou „položka 15“ normalizačního doporučení RVHP RS 4-70. Značka podle doporučení má však nepodstatně odlišný obsah Cr a Ni a obsah P max 0,035 % a S max 0,025 %.

Odhodbné cizí normy (přibližné srovnání)

GOST 5632-61 značka OCr18Ni10
 DIN 17 440 značka Wnr. 1.4301
 AISI značka 304

Použitelnost ocelí

Tuto ocel je možno použít i na tlakové nádoby určené pro práci za zvýšených teplot. V tomto případě je ocel srovnatelná s ocelí 18Cr-8Ni podle návrhu doporučení ISO (dokument ISO/TC 17/WG 10/ETP-SG, May 1969) a je možno počítat s těmito hodnotami žárupevnosti:

Doba do porušení hodin	Mez pevnosti při tečení v tahu při teplotě °C (kp/mm ²) σ_{T1} (střední hodnota)							
	550	560	570	580	590	600	610	620
10 000	17,9	16,7	15,5	14,5	13,4	12,4	11,5	10,6
30 000	15,0	13,8	12,8	11,7	10,7	9,8	9,0	8,2
50 000	13,7	12,5	11,5	10,5	9,6	8,7	8,0	7,3
100 000	11,7	10,7	10,0	9,1	8,3	7,5	6,9	6,2

Pokračování tabulky

Doba do porušení hodin	Mez pevnosti při tečení v tahu při teplotě °C (kp/mm ²) σ_{T1} (střední hodnota)							
	630	640	650	660	670	680	690	700
10 000	9,7	8,9	8,1	7,4	6,8	6,2	5,6	4,9
30 000	7,5	6,8	6,2	5,6	5,1	4,5	(4,1)	(3,6)
50 000	6,6	5,9	5,3	4,8	4,2	(3,7)	(3,3)	(2,8)
100 000	5,6	5,1	4,6	(4,1)	(3,6)	(3,1)	(2,7)	(2,3)

Vypracování normy

Zpracovatel: Výzkumný ústav hutnictví železa, Dobruška, pracoviště Praha — Ing. J. Šorm
 Pracovník Úřadu pro normalizaci a měření: Ing. J. Sedláč

Příloha č.29 Materiálový list oceli 17240 - pokračování


Doporučené teploty pro tváření a tepelné zpracování	
Způsob	Teplota °C
Tváření za tepla	1150 až 850 na vzduchu
Rezpouštěcí žhání	1020 až 1080 podle tloušťky buň na vzduchu nebo ve vodě
Další vlastnosti, které nejsou předmětem ověřování jakosti dělávk	
Teplota °C	20 50 100 150 200 250 300 350 400 500
Nejmenší mez 0,2 $\sigma_{0,2}$ kp/mm ²	19 16 14,5 13 12 11 10,5 10
Nejmenší mez 1,0 $\sigma_{1,0}$ kp/mm ²	23 21,5 19,5 17,5 16 15 14 13,5 13
Modul pružnosti E kp/mm ²	20300 19750 19000 18250 17500 16750
Teplotní součinitel délkové roztažnosti $\alpha \cdot 10^6$ v rozmezí teplot od 20 °C do úvodně 1/K	16 17 17 17
Tepelná vodivost při 20 °C W/mK	14,7
Měrné teplo při 20 °C J/gK	0,50
Elektrický nízný odpor $\Omega \cdot \text{mm}^2$ při 20 °C m	0,73
Měrná hmotnost kg/dm ³	7,9
Zkouška hloubením podle Erichsen na 1 mm plechu mm	13

Foamánky:

- 1) 2% dohodě je možno dodat ocel s obsahem C: 18 až 20 %.
- 2) Vrubové hmožviratost platí pro plochy tloušťky od 12 mm. Pro plechy tloušťky pod 12 mm se lze dohodnout na stanovení RT.
- 3) Trubky tvářené za studena lze dodat s povrchem leště žháným.
- 4) Do revize ČSN 42 6750 je možné zahrnout dodávku trubek větších rozměrů také podle požadavků rovněž VT 42 6751.

Způsob výroby	elektronocel
Výrobek	trubky bezešvé
Provedení	tvářeno za tepla
Povrch	mořený ¹⁾
Rozměrová norma	ČSN 42 5750
Technické dodací předpisy	ČSN 42 0252
Označení materiálu a stavu	17 240.4
Stav	po respouštěcím žhání
Vnější průměr	do 89
Nejmenší mez 0,2 $\sigma_{0,2}$ kp/mm ²	19
Nejmenší mez 1,0 $\sigma_{1,0}$ kp/mm ²	23
Pevnost v tahu σ_{Tl} kp/mm ²	50 až 75
Nejmenší tažnost δ_5 %	40
Nejmenší vrubová houževnatost R ₂₇ kp/cm ²	—
Svařitelnost:	zaručená
Doporučené přídatné materiály	elektroda: VÚS — A3J
Odolnost proti mezikrystalové korozi	Ocel je odolná proti mezikrystalové korozi u svařených plechů do tloušťky asi 5 mm, přičemž musí vyhovět zkoušce podle ČSN 03 8169 ve stavu po svaření bez dalšího ztrhávání
Charakteristika oceli	Austenitická, svařitelná, nestabilizovaná, korozivzdorná ocel
Vhodnost použití	Ocel je vhodná pro stavbu chemických zařízení včetně tlakových nádob podle ČSN 69 0016, je vhodná pro prostředí oxidizační povahy, pro silně inorganické kyseliny (např. sírová) jen při velmi nízkých koncentracích a v blízkosti kořenní normálních teplot. Je vhodná pro slabě organické kyseliny do středních koncentrací a středních teplot při soustavném provozování. Lze ji použít též pro prostředí, kde je koroze zanedbatelná, ale vyžaduje se vysoká čistota produkce (farmaceutický, potravinářský průmysl) a na současný zímotvorných zařízeních mimo použití prostředí solanky.

Příloha č.29 Materiálový list oceli 17240 – pokračování

		Návrh Československé technické normy 2/1982 ČSN 17 240 ČFN I	
Homogenizace		Amendement	
Výrobek		tlusté plechy	
Provedení		vzhledem na to, že	
Povrch		technických dodacích příloh	
Rozměrová norma		ČSN 42 5810	
Technické dodací přílohy		ČSN, 42 0310	
Označení materiálu a stavu		17 240.4	
Stav		rozpracován žládní	
Tloušťka		nad 30 do 80	
Nejvyšší mez		185	
Nejvyšší mez		225	
Povinnost v tahu R_m		400 až 685	
Nejvyšší tažnost A_5 napříč		37	
Nejvyšší sítňová vrtbová houževnatost KCU3		135	
Nejvyšší sítňová vrtbová houževnatost KCU3		100	
Nejvyšší sítňová vrtbová houževnatost KCU3		90	
Nejvyšší sítňová vrtbová houževnatost KCU3		50	
Svařitelnost (materiálová) 9)		vhodná	
9) Podmínky svačování se stanoví podle podmínek použití svařovacího materiálu		stejným předpisem a příslušným předpisem rozpracování žládní	
Na str. 2 v řádku „Ocelnost“ je uvedeno „Ocel“ je ocelná prut		se nahrazení ocelí uvedeného předpisem ČSN 08 8169 (čl. 8b)	

ČSN 41740 – Změna 4

Vydavatelství Dřevu pro normalizaci a měření, Praha