

Studium strukturálních změn při laserovém obrábění ocelí

Bc. Martin Petrůj

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Petrůj**
Osobní číslo: **T14313**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Studium strukturálních změn při laserovém obrábění ocelí**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Experimentální obrábění vybraných materiálů
3. Modelování transientního teplotního pole kovů
4. Laboratorní zkoušky za účelem posouzení strukturálních změn v materiálu
5. Vyhodnocení získaných dat a statistické zpracování

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

dle doporučení vedoucí práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

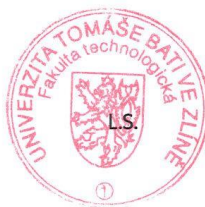
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 9.5.2016

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je objektivně shrnout problematiku nekonvenčního způsobu obrábění ocelových materiálů pomocí laserové techniky. Literární rešerše vysvětluje fyzikální principy vzniku laserového záření, poskytuje přehled používaných přístrojů a přibližuje interakci záření s materiálem. Ve druhé části je pozornost věnována ocelovým materiálům, jejich tepelnému zpracování a metalografickým změnám.

V praktická části byly vypáleny ocelové vzorky laserovým paprskem a hodtila se jeho účinnost. Tepelně ovlivněná oblast vzorků byla podrobena zkouškám tvrdosti a tyto zkoušky se pak dále vyhodnocovaly.

Klíčová slova: Laser, tepelné namáhání, metalografické změny, ocel

ABSTRACT

The goal of this master thesis is to objectively sum up a topic of an unconventional machining of steel materials with the help of a laser technique. The literary research explains physical principles of the development of laser radiation, it provides an overview of the instruments which are used and it describes the interaction between radiation and the material. Second part is focused on steel materials, its thermal insulation and metallurgical changes.

In a practical part, steel samples were burned by the laser lightning and its effectiveness was evaluated. An area which was thermally influenced was put to the tests of hardness and these test were further evaluated.

Keywords: Laser, heat strain, metallurgical changes, steel

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Libuši Sýkrové PhD. za vynaložený čas, odborné rady a profesionální vedení.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně: 5.5.2016

.....

OBSAH

ÚVOD.....	12
TEORETICKÁ ČÁST.....	13
1 LASEROVÁ TECHNOLOGIE	14
1.1 HISTORICKÝ VÝVOJ	14
1.2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP LASERU	16
1.2.1 ENERGIE ATOMU	16
1.2.2 STIMULOVANÁ EMISE ZÁŘENÍ	17
1.3 ROZDĚLENÍ LASERŮ	20
1.3.1 LASERY S PEVNOU FÁZÍ.....	20
1.3.1.1 Rubínový laser	21
1.3.1.2 Laser s neodýmovým sklem.....	23
1.3.1.3 Nd: YAG laser.....	24
1.3.2 LASERY S PLYNNOU FÁZÍ.....	25
1.3.2.1 CO ₂ laser	25
1.3.2.2 CO ₂ laser s pomalým axiálním prouděním	26
1.3.2.3 CO ₂ laser s rychlým axiálním prouděním	27
1.3.2.4 CO ₂ laser s příčným prouděním	28
1.3.2.5 Laser He – Ne.....	29
1.3.2.6 Plynový dynamický laser (GDL)	31
1.3.3 POLOVODIČOVÉ LASERY.....	32
1.3.4 VLÁKNOVÉ LASERY.....	33
1.3.5 KAPALINOVÉ (BARVIVOVÉ LASERY).....	34
1.3.6 EXCIMERNÍ LASERY.....	34
1.4 PRACOVNÍ REŽIM.....	36
1.4.1 IMPULSNÍ REŽIM	36
1.4.2 KONTINUÁLNÍ REŽIM.....	36
1.4.2.1 Režim volné generace	37
1.4.2.2 Režim modulace kvality.....	37
1.4.2.3 Režim synchronizace modů	38
1.5 BEZPEČNOST PRÁCE	39
1.5.1 LASEROVÉ ZÁŘENÍ TŘÍDY 1	39
1.5.2 LASEROVÉ ZÁŘENÍ TŘÍDY 1M.....	39
1.5.3 LASEROVÉ ZÁŘENÍ TŘÍDY 2	40
1.5.4 LASEROVÉ ZÁŘENÍ TŘÍDY 2M.....	40
1.5.5 LASEROVÉ ZÁŘENÍ TŘÍDY 3R	40
1.5.6 LASEROVÉ ZÁŘENÍ TŘÍDY 3B	41
1.5.7 LASEROVÉ ZÁŘENÍ TŘÍDY 4	41
1.5.8 BIOLOGICKÉ ÚČINKY ZÁŘENÍ LASERŮ	41
2 OCELOVÉ MATERIÁLY	43
2.1 TECHNICKÉ SLITINY ŽELEZA	43

2.1.1	SUROVÁ ŽELEZA.....	43
2.1.2	OCELI.....	43
2.1.2.1	Značení a rozdělení ocelí k tváření	45
2.1.2.2	Novodobé značení ocelí dle evropských norem.....	49
2.2	METALOGRAFICKÉ ZMĚNY V OCELI PŘI TEPELNÉM NAMÁHÁNÍ	51
2.2.1	METASTABILNÍ SOUSTAVA FE - Fe ₃ C	51
2.3	ZMĚNY PŘI RYCHLÉM OHŘEVU	53
2.3.1	AUSTENITIZACE	53
2.4	ZMĚNY PŘI RYCHLÉM OCHLAZENÍ.....	54
2.4.1	IRA – IZOTERMICKÝ ROZPAD AUSTENITU.....	54
2.4.2	ARA – ANIZOTERMICKÝ ROZPAD AUSTENITU	57
	PRAKTICKÁ ČÁST	59
3	EXPERIMENTÁLNÍ ŘEZÁNÍ LASEREM.....	60
3.1	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	60
3.2	VLASTNOSTI OVLIVŇUJÍCÍ ZMĚNU STRUKTURY MATERIÁLU PŘI OBRÁBĚNÍ.....	60
3.2.1	VLIV ABSORPCE.....	60
3.2.2	VLIV TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU.....	62
3.2.3	VLIV NA ODPAŘOVÁNÍ MATERIÁLU	62
3.2.4	VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ.....	62
3.3	CHARAKTERISTIKA ZVOLENÝCH MATERIÁLŮ	62
3.3.1	KONSTRUKČNÍ OCEL 11 600 (EN 1.0060)	63
3.3.2	KONSTRUKČNÍ OCEL 12 060 (EN 1.1219)	64
3.3.3	KONSTRUKČNÍ OCEL 14 109.3 (EN 1.3505)	64
3.3.4	NÁSTROJOVÁ OCEL 19 824.1 (EN 1.3355)	65
3.4	KONSTRUKCE A TVAR EXPERIMENTÁLNÍCH VZORKŮ.....	66
3.5	POPIS PRŮBĚHU ŘEZÁNÍ DRÁŽEK	68
3.6	VOLBA ŘEZNÝCH PARAMETRŮ	69
3.7	STROJNÍ ZAŘÍZENÍ.....	69
3.7.1	HLAVNÍ ZNAKY STROJE PLATINO 1530.....	70
3.8	MĚŘENÍ HLOUBKY A ŠÍŘKY DRÁŽEK	71
3.8.1	HLOUBKY A ŠÍŘKY DRÁŽEK MATERIÁLU 11 600.....	72
3.9	MĚŘENÍ TLOUŠTKY A TVRDOSTI TEPELNĚ OVLIVNĚNÉ VRSTVY.....	75
3.9.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO MATERIÁL 11 600	76
3.9.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO MATERIÁL 12 060.1	79
3.9.3	NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO MATERIÁL 14 109.3	83
3.9.4	NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO MATERIÁL 19 824.1	86
3.10	METALOGRAFICKÉ VÝBRUSY	89

3.10.1 SNÍMKY METALOGRAFICKÝCH VÝBRUSŮ MATERIÁLU 11 600	89
3.10.2 SNÍMKY METALOGRAFICKÝCH VÝBRUSŮ MATERIÁLU 12 060.1	91
3.10.3 SNÍMKY METALOGRAFICKÝCH VÝBRUSŮ MATERIÁLU 14 109.3	92
3.10.4 SNÍMKY METALOGRAFICKÝCH VÝBRUSŮ MATERIÁLU 19 824.1	93
3.10.5 SNÍMKY TVARU DRÁŽEK.....	95
4 HODNOCENÍ KVALITY LASEROVÉHO ŘEZU	97
4.1 TLOUŠŤKA TEPELNĚ OVLIVNĚNÉ VRSTVY	97
4.2 STRUKTURNÍ ZMĚNY V MATERIÁLU.....	98
4.3 MAKRO A MIKROGEOMETRIE POVRCHU DRÁŽKY	98
4.3.1 MAKROGEOMETRIE POVRCHU DRÁŽKY	99
4.3.2 MIKROGEOMETRIE POVRCHU DRÁŽKY	100
4.4 VÝKON LASERU A RYCHLOST ŘEZÁNÍ.....	100
4.5 ÚPRAVA POVRCHU VZORKŮ	100
4.6 CHLAZENÍ OKOLÍ MÍSTA LASEROVÉHO ŘEZU.....	101
ZÁVĚR	102
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	105
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	107
SEZNAM OBRÁZKŮ	110
SEZNAM TABULEK.....	114
SEZNAM PŘÍLOH.....	115

ÚVOD

Fyzikální princip laseru je znám již od roku 1917, kdy ho představil celosvětově uznávaný fyzik Albert Einstein. První funkční laser byl však vytvořen až v roce 1960 kdy ho předvedl Theodore H. Maiman v USA. Chyběla mu však kontinuálnost a proto byl pro praxi takřka nepoužitelný. O tři roky později sovětsí fyzici N. Basov a A. Prochorov vyřešili problém nepřetržitého výstupu záření tím, že použili více než dvě energetické hladiny a umožnili tím ustanovení populační inverze. Za tento objev, který později vedl k velkému rozvoji konstrukcí oscilátorů a zesilovačů založených na principu laserů, dostali v roce 1964 Nobelovu cenu za fyziku.

V současné době jsou laserové technologie zastoupeny snad ve všech odvětvích lidské činnosti od lékařství, měřicí a výpočetní technice, kosmetice a ve velké míře také strojírenském průmyslu. Naprosto běžně se dnes setkáváme s aplikacemi laseru ve výrobní činnosti strojírenské sféry. Nejčastější operace jsou pak svařování, řezání, obrábění a značení výrobků (gravírování). Tyto laserové činnosti se řadí do nekonvenčních metod obrábění, kde se úběr materiálu uskutečňuje za pomoci fyzikálního nebo chemického principu. Jedná se o bezsilové působení na obráběný materiál, bez vzniku klasických třísek, které známe z obrábění reznými nástroji.

V dnešní době se stále více klade důraz na kvalitu, přesnost, rychlost a ekonomičnost výroby a právě proto se stávající technologie mnohdy nahrazují novými, které jsou přesnější, rychlejší a také ekonomičtější.

Tato práce je zaměřena na problematiku obrábění kovových materiálů pomocí laseru. Zkoumání a hodnocení kvality drsnosti a struktury povrchu po průchodu paprsku s definovanými parametry.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LASEROVÁ TECHNOLOGIE

1.1 Historický vývoj

Vše začalo v roce 1917, kdy Albert Einstein předpověděl jev indukované (stimulované) emise, na které jsou kvantové generátory (Lasery, Masery) založeny. První kvantový generátor na světě (Maser) sestrojili pánové Charles Townes, James Power Gordon a Herbert Zieger v roce 1954. Maser je zkratka z anglického spojení slov „**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ - zesilovač mikrovln pomocí stimulované emise záření. Základem byla malá komora se čpavkovou náplní vložena do silného elektrického pole. Molekuly čpavku získaly v dutině energii potřebnou ke vzniku stimulované emise. Masery sloužily k zesilování velmi slabých mikrovlnných signálů nebo ke generování mikrovln. Hlavními výhodami maseru byla především nízká úroveň šumu a vysoká stabilita kmitočtu. [11]

Již v roce 1940 fyzik Valentin Alexandr Fabrikant ve své doktorské práci nastínil možnost existence prostředí s inverzní populací, které může zesilovat procházející záření v důsledku tzv. stimulované emise. V roce 1951 V. A. Fabrikant přihlásil vynález nového způsobu zesilování světla. V přihlášce bylo uvedeno, že při průchodu světla prostředím s inverzní populací jeho intenzita exponenciálně vzrůstá. Byl zde také uveden způsob získání inverzní populace čerpáním pomocí impulsního výboje. Tím byl položen základ pro konstrukci laseru. Od čpavkového maseru, který byl stěžejní pro kvantové zesilování mikrovln, vedla již krátká cesta k sestrojení Laseru. Laser „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ – zesilování světla stimulovanou emisí záření. Je to generátor koherentního a většinou přísně monochromatického světla. Jako prvním se to povedlo Teodoru Maimanovi z Hughes Laboratory v roce 1960. [11]



Obr. 1 – První funkční laser v rezonačním optickém poli

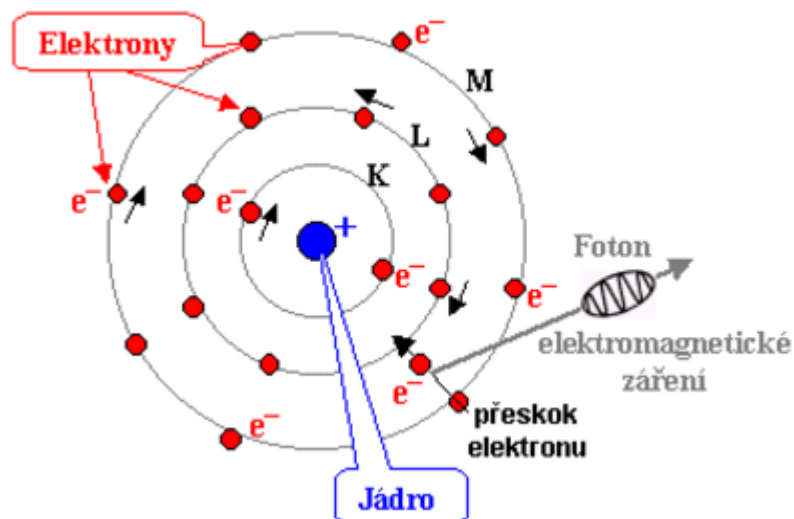
Tento laser využíval rubín a výbojku. Jako aktivní prostředí byla použita krychlička ze syntetického rubínu o hraně 1 cm s využitím tří energetických hladin a vyzařoval impuls světla s výkonem 1 kW a délka impulsu byla asi 1ms, ovšem mohl pracovat pouze v pulsním režimu. Sovětští fyzici N. G. Bassov a A. M. Prochorov, pracovali nezávisle na problematice kvantového oscilátoru a vyřešili důležitý problém nepřetržitého výstupu záření tím, že použil více než dvě energetické hladiny a umožnili tím ustálení populační inverze. Hned po rubínovém laseru navrhl první kontinuální laser Ali Javan, který byl dříve studentem Ch. Townese, v „Bell Telephone Labs“. Byl to velmi dobrý systém, na čerpání sloužil doutnavý výboj v aktivním prostředí směsi plynů He-Ne, výstupní výkon však nedosahoval ani 1 mW.

V roce 1964 obdrželi sověti N. G. Bassov a A. M. Prochorov z moskevského fyzikálního ústavu akademie věd, společně s američanem Ch. Townesem, pracujícím na Kolumbijské univerzitě v New Yorku, Nobelovu cenu za fyziku „za zásadní výzkum v oboru kvantové elektroniky, který vedl ke konstrukci oscilátorů a zesilovačů založených na principu maserů a laserů“. Objev laseru je tak významný, že jej lze srovnávat s největšími objevy v historii lidstva. Za více než padesát let od zkonstruování prvního laseru, prošla kvantová elektronika bouřlivým rozvojem. V průběhu let se podařilo zvětšit výkon koherentního světla laserů 10^{10} – krát. Tak rychlý růst výkonu bylo možné dosáhnout díky objevu a využití různých typů a režimů práce laserů. Zesílení impulsu v kaskádovém zesilovači zvýšilo energii na 100J a výkon na $10^{11} - 10^{12}$ W. Nakonec použití laserových diskových zesilovačů velkého průměru (do 30cm) a paralelních kaskádových zesilovačů, umožnilo generovat impulsy s energií 1 – 10 kJ a výkonem $10^{12} - 10^{13}$ W. Současné výkonové lasery odkrývají nové možnosti a aplikace v soudobé fyzice a technice. Doposud dosažené výsledky vývoje laserů jsou zárukou toho, že další pokrok kvantové elektroniky umožní v nejbližší době využití mnohých aplikací laserového záření v daleko větší míře, jak v základním výzkumu, tak i v průmyslové výrobě. V současné době laser neodmyslitelně patří do mnoha oborů lidské činnosti. Je nepostradatelným nástrojem nejen vědy a výzkumu, ale především řady odvětví průmyslu, medicíny, ale i běžného života většiny členů moderní společnosti. [11]

1.2 Fyzikální princip laseru

1.2.1 Energie atomu

Pojmy kvantové fyziky nám umožňují objasnit princip funkce laseru. Všeobecně známý je zjednodušený model atomu. V tomto modelu okolo kladně nabitého jádra – protonu – krouží na uzavřených drahách elektrony, které podléhají přitažlivým elektrostatickým silám. Každé jednotlivé dráze náleží přesně určené množství energie, která se nazývá energetická hladina. Vzdálenější dráze elektronu náleží větší množství energie, protože na překonání přitažlivé síly protonu potřebuje vykonat větší práci. Naopak čím je dráha elektronu blíže k jádru, tím je jeho energie menší. Za normálních podmínek se atom nachází v kvantovém stavu s nejmenší energií a tento stav se nazývá stavem základním. Pokud je atom v základním stavu, tak všechny elektrony zaujímají nejnižší energetické hladiny a jejich dráhy mají nejmenší poloměry. Kvantový charakter modelu atomu spočívá v tom, že energie elektronu v atomu může nabývat pouze určité diskrétní hodnoty, a tedy elektron se může nacházet pouze na vymezených energetických hladinách. To znamená, že změny energie elektronu nemohou probíhat plynule, ale jen po skocích. Skoky odpovídají drahám, na kterých se může elektron nacházet. Neexistuje nic podobného, jako přechodná dráha, to značí, že se elektron nemůže nacházet ve střední poloze, mezi vymezenými drahami. [1,13]



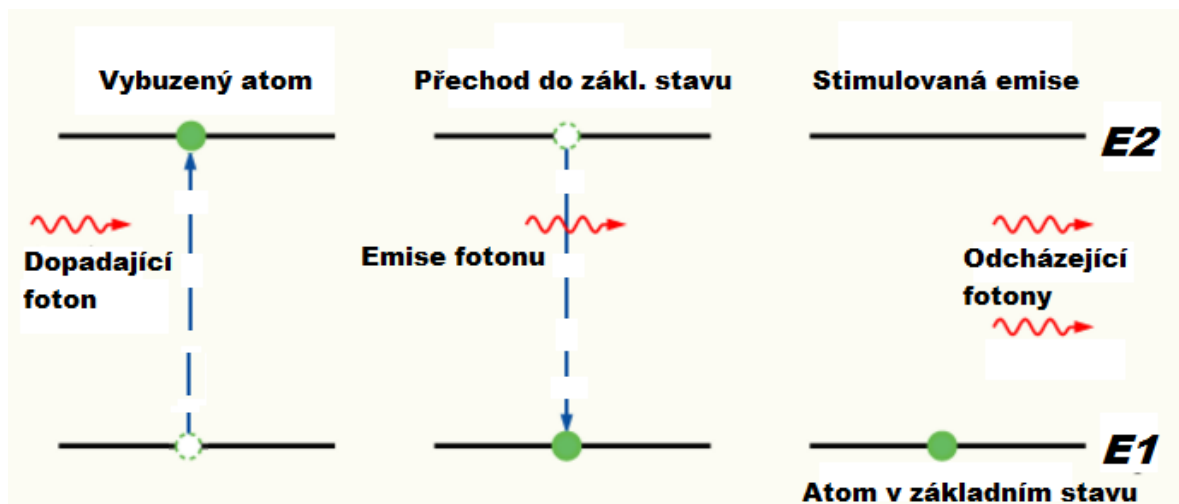
Obr. 2 – Bohrov model schématického znázornění atomu [13]

Přechod elektronu z energetické hladiny E_0 na vyšší energetickou hladinu E je doprovázen absorpcí a přechod z vyšší energetické hladiny na nižší – emisí přesně určené hodnoty energie. Tato energie se nazývá kvantum a je rovna rozdílu mezi sousedními hladinami neboli rozdílu energetických hladin. Ve své podstatě je to elektromagnetické záření

o určité frekvenci. Na obr. 3 jsou znázorněny uvedené pochody v atomu, který z vnějšku pohltil kvantovou energii (elektromagnetickou vlnu o frekvenci příslušné této energii), následkem toho přejde do stavu o vyšší energii. Takto energeticky povýšený atom se nazývá atomem vybuzeným. Vybuzený atom se může vrátit do původního stavu tím, že odevzdá přebytečnou energii. Jedním ze způsobů odevzdání přebytečné energie je spontánní emise ve formě elektromagnetického záření. Snahu elektronu vrátit se do základního stavu doprovází uvolnění energie ve formě fotonu (částice světla). Vlnová délka (barva) emitovaného fotonu závisí na stavu energie elektronu, při uvolnění tohoto fotonu.

1.2.2 Stimulovaná emise záření

Na obr. 3 vpravo je atom v excitovaném stavu. V tomto stavu setrvává soustava jen po velmi krátkou dobu, řádově $10^{-3} - 10^{-7}$ s. Následně přechází do stavu základního za současného vyzáření fotonu. V případě zářivého přechodu se jedná o se jedná o tzv. spontánní emisi, kdy je foton o vlnové délce odpovídající rozdílu energetických hladin vyzářen náhodným směrem s náhodnou fází a polarizací. Ke stimulované emisi dochází tehdy, přijde-li do excitované soustavy foton o energii rovné rozdílu energetických hladin. [1]



Obr. 3 – Schéma stimulované emise

$$E = h \cdot f = E_2 - E_1 \quad (1)$$

h - Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [J.s])

$E_2 - E_1$ - rozdíl energií hladin, mezi kterými nastal přechod

f - frekvence záření

Z frekvence záření lze vyjádřit jeho vlnovou délku ze vztahu:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

c - rychlost světla [1]

Tento foton stimuluje přechod soustavy do základního stavu a je vyzářen další foton, jež má stejnou vlnovou délku (energii), polarizaci a směr jako foton stimulující. Nutnou podmínkou pro praktické použití stimulované emise je vytvoření tzv. inverzní populace. Atomy se zpravidla snaží zaujmout stav s nejmenší možnou energií, nacházejí se tedy v základním stavu schopné absorpce. Proto se za normálních okolností intenzita světla při průchodu látkou snižuje, protože je počet atomů v základním stavu mnohem vyšší, než počet atomů v excitovaném stavu (tzv. rovnovážná populace) a dopadající fotony jsou absorbovány atomy látky. Pro stimulovanou emisi je nutné dostat kvantovou soustavu do excitovaného stavu. Je-li navíc požadováno zesílení záření v aktivním prostředí, je nutné, aby počet excitovaných prvků kvantové soustavy schopných emise byl větší, než počet prvků v základním stavu (schopných absorpce). Převažuje-li počet elektronů na vyšší energetické hladině (E_2) nad počtem elektronů na nižší hladině (E_1), nazýváme tento stav inverzní populací. Taková kvantová soustava potom zesiluje procházející záření. Inverzní populace můžeme dosáhnout tzv. čerpáním (buzením) např. Světelným zářením, elektrickým výbojem nebo chemickou reakcí a tím dochází k excitaci elektronů na vyšší energetické hladiny. [13]

Pravděpodobnost vynuceného přechodu závisí na hustotě výkonu záření μ_m , jehož frekvence odpovídá přechodu z hladiny n na hladinu m

$$P_{f_{nm}} = \mu_{nm} \cdot B_{nm} \quad (3)$$

B_{nm} - konstanta daná atomovým systémem.

Charakteristickými znaky vynucené emise jsou shodnost frekvence, fáze a směru vynuceného záření se zářením stimulujícím. Jev stimulované emise tvoří základ činnosti lase-

rů. Za podmínek tepelné rovnováhy mají atomy silně obsazené hladiny o nižší energii. Počet elektronů na jednotlivých drahách je závislý na teplotě, přičemž podle Boltzmanovy rovnice platí

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1) / k\Theta} \quad (4)$$

- $N_1; N_2$ - počátek elektronů na hladinách 1 a 2
 k - Boltzmanova konstanta $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
 Θ - teplota ve stupních Kelvina.

Když do uvedeného výrazu dosadíme za výraz mezní teploty $\Theta = 0$ a $\Theta = \infty$, dostaneme rozsah, ve kterém se může měnit poměr N_2/N_1 . Při teplotě blízké absolutní nule je tento poměr rovněž blízký nule, tedy všechny elektrony jsou soustředěné na základní energetické hladině. Při teplotě blízké nekonečnu se poměr blíží jedné. To ukazuje, že počet elektronů na libovolné hladině je stejný. Za uvedených podmínek při konečné teplotě T je poměr $N_2/N_1 < 1$, jak již bylo uvedeno, více se obsazují hladiny o nižších energiích.

První podmínka, která musí být dodržena pro funkci laseru, tj. pro získání vynucené emise užitečného záření. Je jím čerpání, neboli vybudení laseru. Záření, které slouží k tomuto účelu, se nazývá čerpací výbojka nebo budící výbojka. Velikost energie, kterou musí dodat budící výbojka laserovému materiálu, musí být vyšší než minimální úroveň, tzv. práh vybudení. [1]

Druhou podmínkou pro získání užitečného záření je vhodný aktivní materiál. Tento materiál musí splňovat:

- Široké absorpční pásy, umožňující získání účinné inverze obsazení energetických hladin při optickém čerpání,
- Výhodnou soustavu energetických hladin, umožňující získání potřebné frekvence emitované vlny,
- Vhodné doby života vybuděných elektronů, krátké na absorpčních hladinách a poměrně dlouhé na metastabilních hladinách,
- Úzkou střední (metastabilní) hladinu čili velký stupeň monochromatickosti,
- Vhodnou hustotu aktivních iontů, která zajišťuje emisi co největší energie,
- Velkou tepelnou vodivost, která zajišťuje dobrý odvod tepla během funkce

1.3 Rozdělení laserů

I když všechny lasery pracují na základě stimulované emise, liší se poměrně výrazně svou konstrukcí i vlastnostmi. Existuje mnoho kritérií, pro dělení laserů. Z globálního hlediska použití a výroby se dají dělit podle materiálu aktivního prostředí, podle režimu práce (kontinuální, pulsní emise záření), podle výkonu, podle konstrukce, dále podle vlnové délky, podle excitace (buzení), podle počtu energetických hladin a podle použití.



Obr. 4 – Schéma rozdělení laserů podle aktivního prostředí [11]

V této kapitole budou popsána konstrukční provedení jednotlivých typů laserů, lišících se aktivní látkou a způsoby čerpání.

1.3.1 Lasery s pevnou fází

Tímto pojmem rozumíme typ laserů, jejichž aktivní prostředí je tvořeno ionty skupiny železa (např. Cr^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} apod.), nebo ionty vzácných zemin (např. Nd^{3+} , Sm^{2+} , Eu^{3+} , Gd^{3+} atd.), případně jiných prvků. Tyto ionty tvoří v podstatě nečistoty v hostitelském krystalu (nosném materiálu) a jsou zdrojem stimulovaného záření. [11]

K čerpání aktivních iontů na výchozí energetickou hladinu laseru se používá většinou impulsových výbojek (podobných fotobleskům), nebo speciálních žárovek. Při zapálení elektrického výboje jsou výbojky zdrojem intenzivního záření se spektrem spadajícím do pásma ultrafialové a viditelné oblasti spektra. Pro impulsový provoz se nejčastěji používá xenonové výbojky.

Pevnolátkové lasery se umísťují do odrazivé komory (dutiny) s kruhovým, lépe eliptickým průřezem. Do jednoho ohniska se umístí krystal, do druhého budicí lampa (výbojka). Odrazivost dutiny by měla být co možná největší. Celková účinnost těchto laserů je však velmi malá (0,1-2%). Je to dáno hlavně kvalitou odrazivé dutiny a také značným zahříváním krystalu. Zástupci této skupiny – Nb: YAG, Yb: YAG. [1,11]

Laser s pevnou fází pracující v trvalém provozu je nutno chladit, poněvadž se v aktivní látce rozptyluje tak velký výkon, že nedokonale chlazený krystal by se mohl úplně roztavit. Jako chladicí kapaliny se ojediněle používá tekuté hélium (4,2 K), častěji však tekutý dusík (77 K); např. laser s aktivní látkou $\text{CaF}_2:\text{Sm}^{2+}$ pracuje na vlnové délce 0,703 μm při teplotě 20 K.

1.3.1.1 Rubínový laser

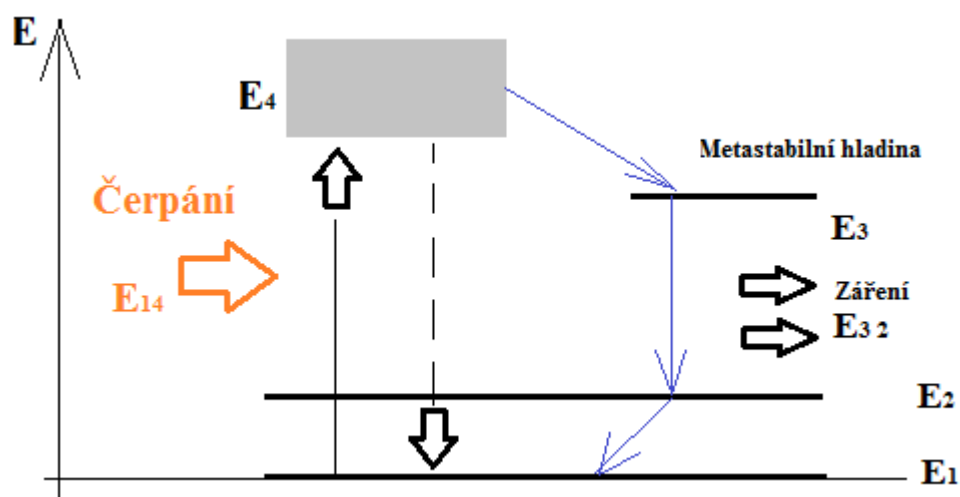
První laser, který byl realizován, pracoval s rubínem jako aktivní látkou. Pro své výhodné vlastnosti je rubínu jako aktivní látky používáno dodnes. Může pracovat v impulsovém provozu za pokojové teploty a při trvalém provozu za teploty tekutého dusíku (77K). Aktivní ionty Cr^{3+} tvoří nečistoty v krystalu Al_2O_3 (safír). Safír Al_2O_3 je bílý a po aktivování ionty chromu se změní na rubín zbarvený růžově. Typická koncentrace je 0,05% váhového množství Cr_2O_3 v Al_2O_3 , což odpovídá asi 10^{19} iontů na cm^3 . Rubín se vybrousí do tvaru válečku s osou rovnoběžnou nebo kolmou na optickou osu krystalu. Váleček bývá dlouhý 5÷10cm a jeho průměr se pohybuje v mezích 6÷10mm. Čela válečku jsou vybroušena s velkou přesností do planparalelních ploch. Po vybroušení jsou čela válečku pokryta vysoce odrazným materiálem, buď stříbrem, nebo tenkými dielektrickými vrstvami. Jedna s odrazných ploch je částečně propustná a z ní vystupuje záření vzniklé indukovanou emisí. Takto upravená čela rubínového válečku tvoří Fabryho-Perotův rezonátor. [1,3]

Na obr. 6 je znázorněno schéma energetických hladin. Horní laserová hladina je rozštěpena na dvě, jejichž vzdálenost je 29 cm^{-1} . Tím získáváme záření o vlnových délkách 694,3 a 692,9 nm. Také základní hladina vykazuje jemné štěpené $0,38 \text{ cm}^{-1}$, které se však při pokojové teplotě díky rozšíření laserových přechodů ($0,1 \text{ cm}^{-1}$) neuplatní a vynikne až při ochlazení krystalu. Laser při buzení Xe lampou emituje puls záření s relaxační strukturou krátkých píků dlouhých až 10^{-3} s. Zastaralý laser s nevýhodnou tří hladinovou strukturou je dosud používán především v medicínských aplikacích, kde se ukazuje výhodná dobrá průchodnost červeného záření tkání. Lze se s ním setkat i v jiných oblastech kde může sloužit například jako relativně levný zdroj energetických pulsů při generaci mikroplazmy pro mikroanalytické účely. [1]

s dokonalou odrazivostí. V tomto uspořádání bylo dosaženo snížení budící prahové energie na hodnotu 100÷150 J. Kromě tohoto způsobu existuje ještě celá řada jiných zlepšení ke zvýšení účinnosti čerpání.

1.3.1.2 Laser s neodýmovým sklem

V tomto zařízení jsou aktivními částicemi ionty neodýmu Nd^{3+} . Tuto přísadu v množství několika procent obsahuje základní matrice z optického skla. Impulsní laser s neodýmovým sklem emituje záření o vlnové délce 1 060 nm, ležící v blízkosti infračervené oblasti. V porovnání s rubínem vykazuje lepší energetické vlastnosti, nižší prahovou energii, výhodnou amorfni stavbu a nižší cenu. Nevýhodou je širší spektrum emitovaného záření, vyšší křehkost a slabší tepelná vodivost. Neodýmové sklo je čtyřhladinovým aktivním materiálem (obr. 7).



Obr. 7 – Schéma energetických hladin v neodýmovém laseru

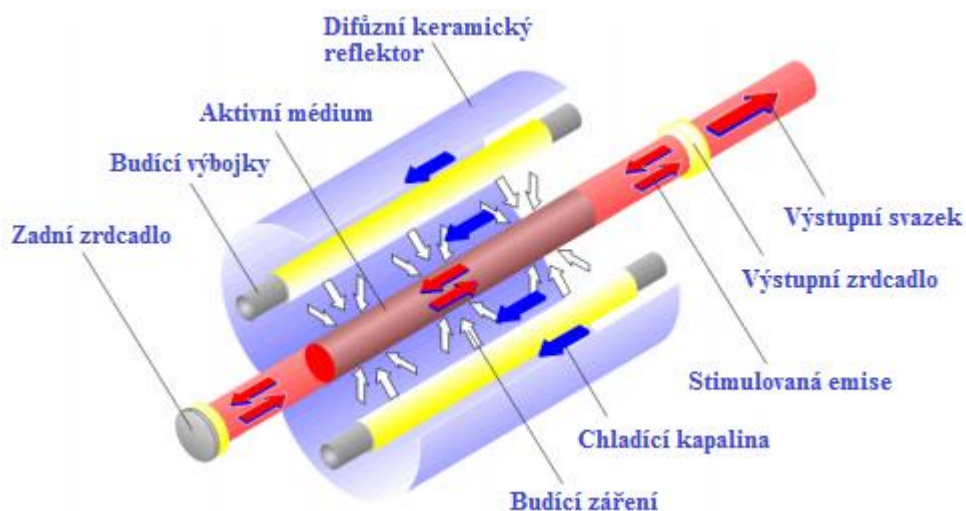
Využívaná stimulovaná emise odpovídá přechodům mezi hladinami 3 a 2, naproti tomu přechody z 3 na 1 nejsou žádoucí, protože snižují monochromaticnost. Pro správnou funkci musí převažovat spontální, nezářivé přechody mezi hladinami 4 na 3. Vybuzení a nahromadění neodýmových iontů umožňuje optické čerpání výkonnou výbojkou. Ze záření výbojky absorbují ionty neodýmu fotony s vlnovou délkou 500 – 900 nm. Při intenzivním čerpání lze nahromadit energii o velikosti asi $0,5 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$. Zesílení a obsazení hladin trvá přibližně 0,3 ms. Značnou nevýhodou neodýmových laserů je malá účinnost (menší než 0,2%). [20]

1.3.1.3 Nd:YAG laser

Nd:YAG je v dnešní době nejpoužívanější typ pevnovláknového laseru. Aktivní prostředí tvoří izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ($Y_3Al_5O_{12}$) dopovaný ionty neodýmu (Nd^{3+}), jeho čerpání se provádí opticky nejčastěji xenonovou výbojkou nebo laserovou diodou. Výbojky se neustále zahřívají, proto musejí být spolu s krystalem chlazeny deionizovanou vodou. Jsou uzavřeny v dutině rezonátoru, která je vždy zvolena tak, aby byla většina světla odražena zpět do krystalu. Laser pracuje jak v pulzním, tak i v kontinuálním režimu. Maximálního výkonu přístroj dosahuje právě v kontinuálním režimu a činí až několika stovek W. V impulsním režimu se může délka impulsu v závislosti na druhu modulace pohybovat v rozmezí milisekund až pikosekund (při použití Q spínání). [20]

Nd:YAG má díky vysokému výkonu a vhodné vlnové délce řadu uplatnění. Hojně je používám v technologii například pro vrtání, svařování, žihání, řezání apod. Dále se uplatňuje v medicíně, vědě, biologii a vojenských aplikacích.

Laser s pevnou fází pracující v trvalém provozu je nutno chladit, poněvadž se v aktivní látce rozptyluje tak velký výkon, že nedokonale chlazený krystal by se mohl úplně roztavit. Jako chladicí kapaliny se ojediněle používá tekuté hélium (4,2 K), častěji však tekutý dusík (77 K); např. laser s aktivní látkou $CaF_2:Sm^{2+}$ pracuje na vlnové délce 0,703 μm při teplotě 20 K. [1]



Obr. 8 – Výbojkami buzený Nd:YAG laser

1.3.2 Lasery s plynnou fází

Plynové lasery se používají především jako zdroje trvalého stimulovaného záření. Tyto lasery se vyskytují v mnoha různých provedeních. K jejich buzení se používá vysokonapěťový doutnavý elektrický výboj. U vyjímek také elektrický proud s malým napětím. Jelikož jsou v trubici velké proudové intenzity, musejí být elektrody velmi odolné proti opotřebení. Jako aktivní látky se používají buď směsi inertních plynů (He-Ne), nebo samotné inertní plyny Ne, Ar, Kr, Xe. Elektrický proud předává svoji energii neexcitovaným atomům. Velmi rozšířené jsou CO₂ lasery. V trubici tohoto laseru slouží jako aktivní prostředí směs plynů, a to CO₂, He a N v různých poměrech dle užití. Trubice musí být z křemenného skla, protože se aktivní prostředí velmi zahřívá. Chlazení je nezbytné. Jako chladicí médium se používá voda, olej, nebo jiné roztoky. [11]

Další zástupci laserů v této skupině se liší především v použití aktivního plynu nebo směsi plynů. Například známý HeNe, Argonový, Dusíkový, Jódový a mnoho dalších. Plynové lasery lze rozdělit na fotodisociační, atomové, iontové, molekulární, excimerní, elektroizolační, plynové – dynamické a chemické.

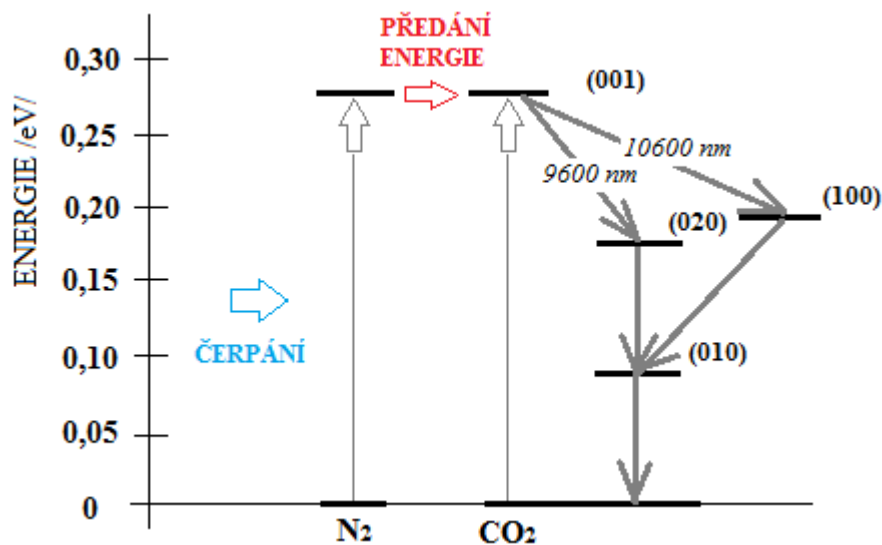
V současné době jsou tyto lasery nejvýkonnějšími, spolehlivými a nejčastěji používanými průmyslovými lasery. Dosahují účinnosti až 20%. Mohou pracovat jak v pulsním, tak i kontinuálním režimu.

1.3.2.1 CO₂ laser

V molekulárním laseru CO₂ se využívá k přechodům energetických hladin, vzniklých vibračním pohybem atomů v molekule a rotačním pohybem molekuly jako celku. Vzdálenosti vibračních hladin spadají do infračervené oblasti, zatímco rotační do milimetrových a submilimetrových vln. Čerpání milimetrových laserů se uskutečňuje nejčastěji pomocí vysokofrekvenčního elektrického výboje přímo v trubici s aktivním plynem nebo směsí plynů. CO₂ lasery dosahují vysokých výkonů i v kontinuálním provozu, řádově (kW). V impulzním provozu dokonce několik desítek (TW). [11]

Inverze obsazení nastává mezi hladinami (001) a (100). Horní hladina CO₂ se obsazuje přímým elektronovým buzením a dále pomocí rezonačního přechodu energie z metastabilní hladiny N₂. Tato hladina má poměrně dlouhou dobu života, proto slouží jako zásobník energie. Energie vybuzení N₂ je přibližně rovna energii vybuzení molekuly CO₂, proto dochází k předání energie od N₂ k CO₂. Po předání energie se molekula N₂ vrací na

základní hladinu. Molekula CO_2 má možnost přejít na hladinu (100) nebo (020). Při těchto přechodech uvolňuje infračervené záření s vlnovou délkou 10 600 nm nebo 9 600 nm.



Obr. 9 – Schéma energetických hladin CO_2 laseru

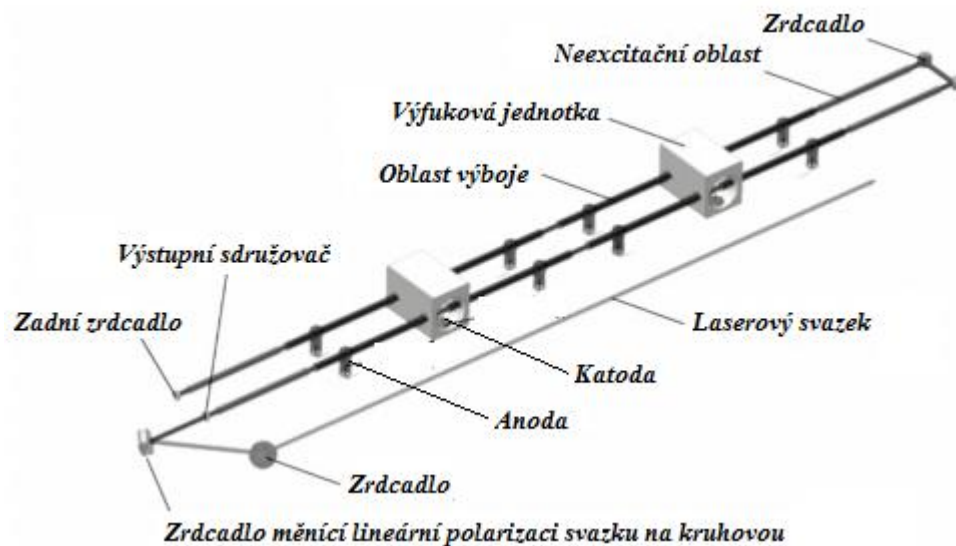
Zdrojem energie pro čerpání aktivního prostředí na vyšší energetické hladiny je stejnosměrný nebo vysokofrekvenční výboj, který hoří v trubici naplněné aktivním plynem. Některé uspořádání nejvýkonějších laserů mají čerpání založeno na základě vzájemných srážek částic aktivního prostředí. K těmto srážkám dochází v důsledku turbulence aktivního prostředí po expanzi. Protože je koncentrace aktivních částic v plynné fázi menší než u pevných aktivních prostředí, je získaný výkon plynových laserů na jednotky délky trubice s aktivním prostředím menší. Vysokých výkonů se dosahuje prodloužením dráhy záření v aktivním prostředí a také výkonným chlazením tohoto prostředí. [1]

V současnosti existují tři základní druhy CO_2 laserů o středním a vysokém rozsahu výkonu: lasery s pomalým axiálně souměrným prouděním (výstupní výkon je v rozmezí 80 – 1500 W), lasery s rychlým axiálně souměrným prouděním (výstupní výkon 500 – 3000 W), a lasery s příčným prouděním (výstupní výkon 1000 – 12000 W).

1.3.2.2 CO_2 laser s pomalým axiálním prouděním

Tento typ je tradičně nejstarší CO_2 laser s pomalým prouděním plynu rezonátorem. Prostřednictvím stejnosměrného nebo střídavého elektrického výboje se přivádí energie aktivnímu prostředí. Výboj má shodný směr s osou rezonátoru i svazku vystupujícího záření. Tyto lasery dosahují výkonu cca 50 W na jeden metr délky výbojové trubice v rezonátoru.

Výstupní výkon na metr délky trubice rezonátoru je limitován možností chlazení. Tyto lasery vykazují stabilní výstupní výkon a dobrou modovou charakteristiku svazku záření. Využívá se přibližně do 1 000 W výstupního výkonu. Provoz může být jak pulsní, tak i kontinuální. [1,3]



Obr. 10 – Schéma podélně čerpaného CO₂ laseru

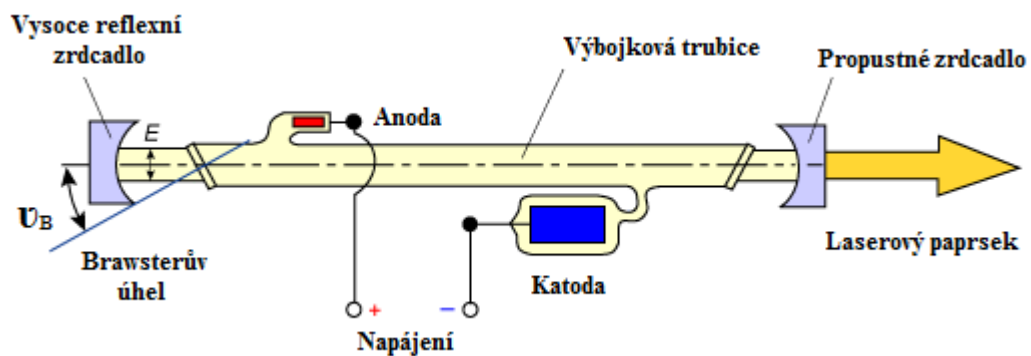
1.3.2.3 CO₂ laser s rychlým axiálním prouděním

Základní stavba a princip činnosti tohoto laseru jsou obdobné, jako u CO₂ laseru s pomalým axiálním prouděním. Hlavním rozdílem je však rychlost proudění aktivního plynu. Plyn se v optickém rezonátoru uvádí do cirkulace převážně rotačním pístovým čerpadlem. Plyn proudící téměř rychlostí zvuku podél stěn rezonátoru předává teplo cestou samočinné konvekce chladicímu výměníku. [20]

Axiální CO₂ lasery s rychlým prouděním dosahují výkonu 500 až 1 000 W na jeden metr délky rezonátoru a v porovnání s axiálním CO₂ laserem vyniká kompaktnější konstrukcí. Výsledná modová struktura svazku záření je obecně poměrně dobrá, často však dochází k rychlým fluktuacím modu, což může vést ke zhoršení kvality řezu. Tyto lasery mohou pracovat také v pulsním provozu a to v širokých mezích, ale pomíjející fluktuace mohou způsobit horší stabilitu pulsů. [20]

Proud aktivního plynu protéká příčně vzhledem k optickému rezonátoru. Rezonátor je tvořen zadním zrcadlem, které má 100% odrazivost, výstupním zrcadlem s odrazivostí 50%, kde záření vystupuje z rezonátoru. Mezi těmito je paprsek mnohonásobně odražen zrcadly uvnitř. Energie čerpání se aktivními plyny při průchodu systémem segmentových elektrod, kde hoří výboj vysokého napětí. Po průchodu plynu rezonátorem následuje konvekční chlazení ve výměníku tepla. Oběh plynu zajišťuje ventilátor.

1.3.2.5 Laser He – Ne

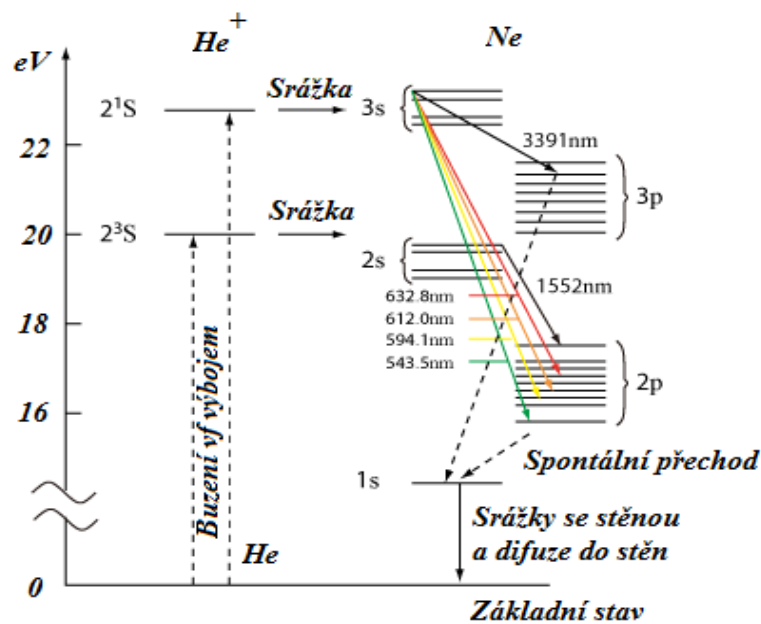


Obr. 13 – Schéma laseru He – Ne

Plynový laser se skládá ze tří hlavních částí: aktivního plynu (směs He-Ne), Fabry-Perotova rezonátoru a čerpacího zdroje. Schéma tohoto laseru je na obr. 13. Směs plynů v poměru přibližně He:Ne = 10:1, s tlakem přibližně 1 torru je uzavřen ve skleněné nebo křemenné trubici. Koncentrace aktivních atomů v plynu je o několik řádů nižší než např. v rubínu, a to $10^{15} \div 10^{17}$ částic na 1 cm^3 . Z tohoto důvodu musí být délka aktivního prostředí dostatečně delší než u rubínového laseru. Délka trubice se pohybuje okolo 1 m. Průměr trubice bývá menší než 1m. Na oba konce trubice jsou natavena okénka. Normála k ploše okénka svírá s osou trubice Brawsterův úhel U_B , čímž jsou zabezpečeny minimální ztráty pro světlo polarizované v rovině nákresu. Na trubici jsou navléknuty prstencové elektrody pro buzení vf. výboje a plynové směsi. Budicí generátor s kmitočtem přibližně 27MHz dodává výkon asi 100W. Impedanční přizpůsobení je upraveno laděným obvodem. Při stejnosměrném buzení by bylo potřeba napětí asi 2kV, proud 40mA a zatavení elektrod do trubice. Z tohoto důvodu je vf. buzení výhodnější. Fabry-Perotův resonátor u dnešních typů je tvořen konfokálními reflektory vně aktivního prostředí. Konfokální reflektory nejsou tak náročné na opracování a nastavení. U planparalelních zrcadel se vyžaduje lepší opracování než $\lambda/20$. Na mechanickém stavu optického systému velmi závisí kmitočtová stabilita. Vysokého koeficientu odrazu a tím i vysokého Q lze dosáhnout napařením větší-

ho počtu (až 13) dielektrických vrstev z materiálů o střídavě malém a velkém indexu lomu. Vhodnou volbou tloušťek těchto vrstev lze dosáhnout vysokého koeficientu odrazu (99%) a značné selektivity. Výstup je umožněn částečnou propustností jednoho zrcadla nebo malým otvorem umístěným v ose optického systému. Kmitočtové stabilitě laseru He-Ne byla věnována celá řada experimentů. Bylo dosaženo krátkodobých stabilit až 10^{-13} , zatímco dlouhodobé stability se pohybovaly řádově $10^{-9}+10^{-10}$.

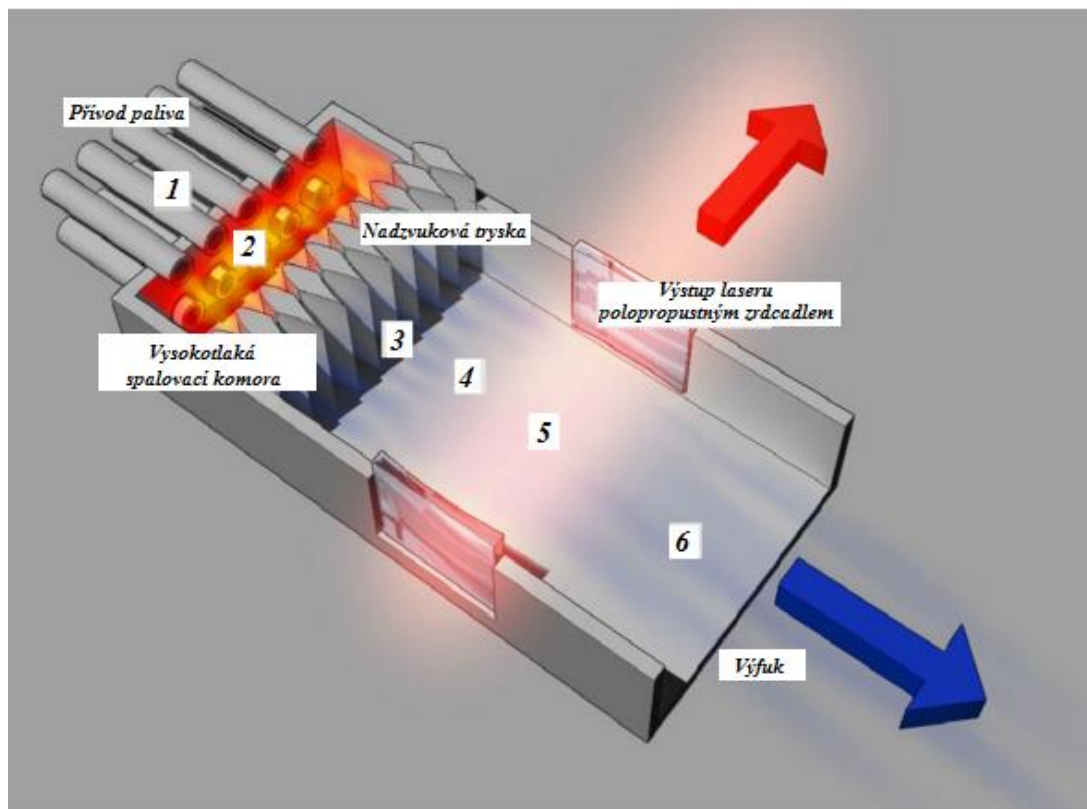
Energetická úroveň a používané přechody v laseru He-Ne jsou na obr. 14. Volné elektrony předají svou kinetickou energii získanou výbojem atomů He, čímž se tyto atomy dostanou do metastabilních stavů 2^3S a 2^1S . Nepružnými srážkami nastane výměna energií s atomy Ne, takže invertované obsazení vznikne na úrovních 3S a 2S neonu. Všimneme si, že zmíněné hladiny He a Ne jsou velmi blízké. Úroveň 3S a 2S jsou rovněž metastabilní (τ je cirká 0,1 μ s) a jsou výchozími hladinami pro stimulovanou emisi. Konečné stavy jsou 3p a 2p. Tyto úrovně se vyprazdňují spontánní emisí (doba jejich života je τ cirká 0,01 μ s) na úroveň 1S a odtud srážkami se stěnami trubice (tepelná výměna) do základního stavu. Na čáře $\lambda = 0,63 \mu$ m přechodu multipletních úrovní $3S_2 \rightarrow 2P_4$ bylo dosaženo stimulovaného záření o výkonu přibližně 100mW. Přechod $3S_2 \rightarrow 3P_4$ s $\lambda = 3,39 \mu$ m spadá do infračervené části spektra. Při vyprazdňování úrovně 1S srážkami se stěnami trubice difunduje Ne také do stěn trubice a tím omezuje její životnost.



Obr. 14 – Úrovně energií a přechody v laseru He – Ne
(čísla u multipletních úrovní udávají pořadí čáry)

1.3.2.6 Plynový dynamický laser (GDL)

Tak zvaný gazodynamický laser s tepelným buzením patří do skupiny molekulárních kontinuálních plynových laserů, u kterých dochází k vibrační excitaci molekul v silně zahřátém plynu a zesílení vzniká na úkor relaxačních dějů vybuzení molekul při rychlém proudění plynu nadzvukovou tryskou. GDL tedy přímo transformuje tepelnou energii na koherentní záření.



Obr. 15 – Schéma GDL laseru

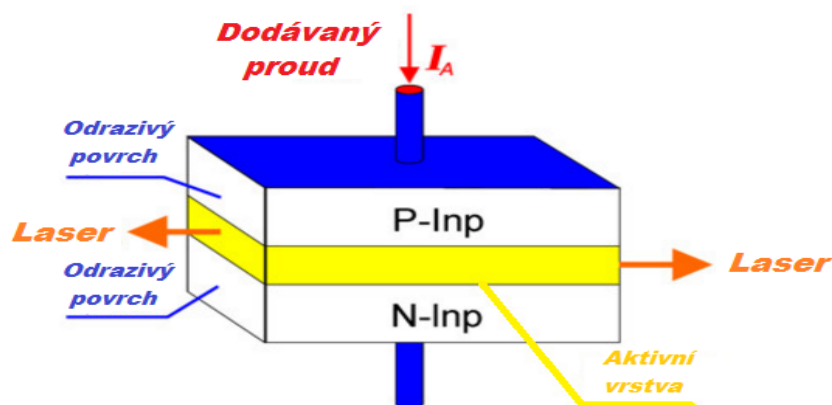
Princip GDL laseru ukazuje obrázek č. 15. Palivo je přiváděno potrubím (1), zde se v komoře generuje horký stlačený plyn (2), trojsložková plynová směs $N_2 + CO_2 + H_2O$ zahřátá na teplotu zhruba 1 500 K se rozpíná přes nadzvukovou expanzní trysku (3), Před tryskou se plynná směs nachází ve stavu termodynamické rovnováhy. Základní složkou směsi (do 80 – 90%) jsou molekuly N_2 . Tyto molekuly jsou zásobníkem tepelné energie, protože v důsledku velké vibrační relaxace jsou schopné setrvat dlouho ve stavu vibrační excitace v komoře za tryskou (4). Expanzi plynu provází transformace energie chaotického pohybu molekul na energii usměrněného proudění plynu. Děj probíhá adiabaticky, bez výměny tepla s okolím. Proto se energie molekul zmenšuje a při nadzvukovém proudění se ustálí nízká teplota (300 K) charakterizující postupný a rotační pohyb molekul. Avšak

v důsledku dlouhé vibrační relaxace molekul N_2 zůstanou zahřátými. Tak vznikne termodynamicky nerovnovážný stav. Molekuly zahřáté svou vibrační energií efektivně tuto energii odevzdávají molekulám CO_2 . V důsledku toho vzniká mezi hladinami molekuly CO_2 inverze obsazení a dochází k zesílení stimulované emise záření (5). Malá příměs H_2O umožňuje rychlou deexcitaci CO_2 na základní hladinu. Použitý plyn na základní hladině je poté odváděn výfukem (6). GLD lasery mají vysoký výstupní výkon 60 – 100 kW s účinností asi 1 – 2%.

1.3.3 Polovodičové lasery

Aktivním materiálem je vlastní polovodič nebo příměsové polovodiče. Podle buzení je lze dělit na lasery s elektronovým svazkem nebo buzené elektrickým proudem. Aktivním prostředím je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, to znamená volné nosiče náboje, které lze injektovat. Vyznačují se kompaktností a velkou účinností dosahující až 50%. Nevýhodou je rozbíhavost generovaného paprsku a to hlavně na teplotě aktivního polovodičového materiálu. Představitelem této skupiny je laser buzený svazkem elektronů – nazývaný diodový laser, kde je aktivní prostředí tvořeno blokem polovodičů. Aktivními prostředními jsou galium arsenid (GaAs), kadmium sulfid (CdS), kadmium selen (CdSe). Výstupní paprsek diodových laserů je obdelníkového průřezu.

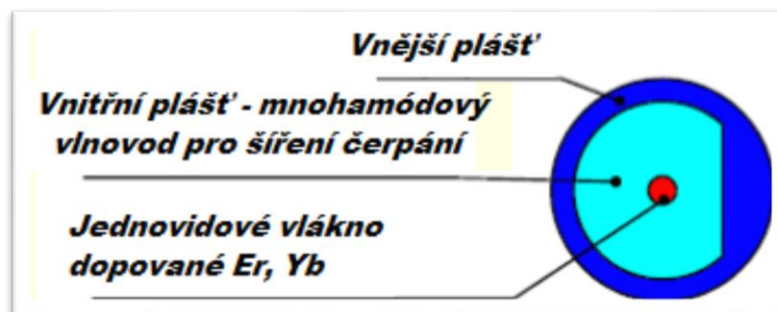
Do této skupiny patří i injekční polovodičový laser, kde je aktivním materiálem polovodič P a N. Rezonátor je tvořen vybroušenými stranami polovodičového materiálu. Odrazem od zrcadel otevřeného rezonátoru a mnohonásobným přechodem oblastí přechodu vzniká laserové záření. Nejznámější je GaAs polovodičový laser.



Obr. 16 – Schéma GaAs polovodičového laseru.

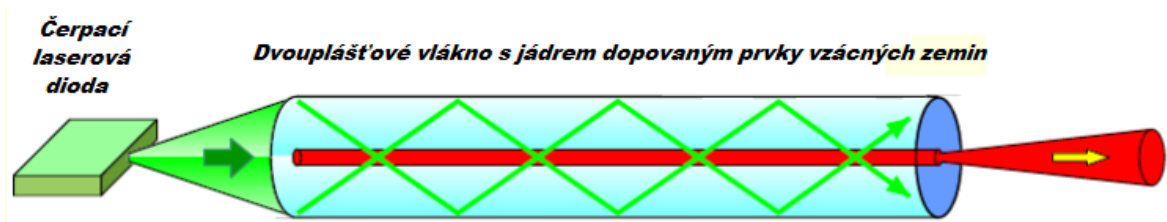
1.3.4 Vlákňové lasery

Budící diody jsou z polovodičového materiálu, velkoplošné multi mode čerpací diody, které emitují výkon (malým optickým vláknem) na stranu optického multi mode vlákna (složeného vlákna s větším průměrem) a vytváří budící světlo, které je absorbováno v atomech ytterbia v single mode optického vlákna – tzv. aktivní optické vlákno. V praxi si lze představit středové optické vlákno, které je obklopeno druhým optickým vláknem. Budící diody svítí do velkého optického vlákna a světelný tok působí na vlákno, které je umístěno uvnitř tohoto velkého vlákna. Vnitřní vlákno obsahuje aktivní prvek, kterým je ytterbium. Budící optické diody mají jinou vlnovou délku, než je výsledný paprsek laseru, který vznikne v aktivním středovém vlákně. Více diod dokáže dodat vysokou energii v optickém vlákně s perfektní kvalitou paprsku. Je zde ještě jeden velmi důležitý princip pro získání laserového paprsku a tím je vysoce výkonný optický zesilovač. Tento zesilovač konvertuje malý světelný signál z budících diod do výkonného paprsku, často tisíckrát silnější, ale identický jako originál. Zvětšením výkonu se také dosáhne použitím více diod.



Obr. 17 – Uspořádání vláken

Teplu, které se generuje v optickém vlákně je odváděno velkou plochou a proto není potřeba aktivního chlazení. Protože aktivní vlákno může pouze podporovat přenos laseru, kvalita paprsku není závislá na pracovním výkonu. Laser může mít stejnou vlnovou délku, ale charakteristika paprsku může být zcela jiná. Všeobecně krátká délka pulzu generuje vyšší výkon laserového paprsku a „silnější“ energii pulzu. Krátký pulz je chladnější, nezažívá tak povrch a neničí materiál. Přitom střední výkon laseru je stejný.



Obr. 18 – Schéma vláknového laseru

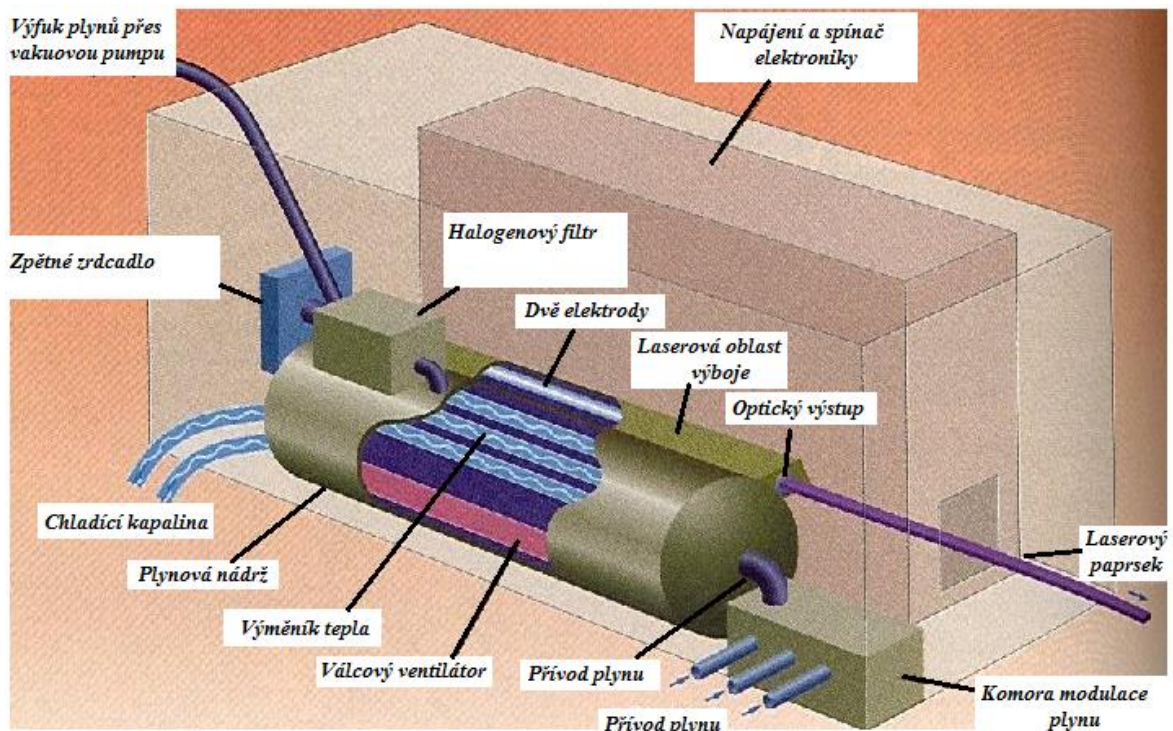
1.3.5 Kapalinové (barvivové lasery)

Jako aktivní prostředí zde slouží různá barviva, např. Rhodamin 6G, Rhodamin B, Fluorescein, Alizarin a další, rozpouštěné například v lihu, destilované vodě. K jejich buzení se dá využít světlo jiného laseru, velmi často se využívá laseru dusíkového, který generuje vlnové délky v oblasti UV záření. Rovněž se dá použít světlo z výbojky. V případě použití výbojky se podobně jako u pevnolátkových laserů umísťují do odrazné dutiny. V případě buzení jiným laserem je uspořádání trochu jiné, to slouží především pro vědecké účely. Ladění těchto laserů probíhá buď umístěním difrakční mřížky do rezonátoru, jejím otáčením se pak mění barva výsledného světla, a nebo se paprsek jednoduše rozloží za pomoci spektro-hranolu, kdy se vybere vhodná vlnová délka.

1.3.6 Excimerní lasery

Excimer je zkratka slov „excitovaný dimér“, takto je označovaná molekula sestavená ze stejných atomů, jako je například He^2 nebo Xe^2 které existují pouze ve vybuzeném stavu. Výraz „excimér“ se začal používat pro pojmenování všech dvouatomových molekul, které existují pouze ve vybuzeném stavu. V excimerních laserech je poměrně jednoduché dosáhnout inverzního obsazení energetických hladin, jakýkoli počet malých molekul znamená zesílení laserového záření jednoduše z toho důvodu, že molekuly v základním stavu neexistují. Vzhledem k energii vazeb v molekulách excimerů tyto lasery využívají v UV části spektra. Nejpoužívanější excimerní prvky jsou inertní plyny a halové prvků, například ArF, KrF, XeF a XeCl. Aktivní plyny jsou v laserové komoře v malých koncentracích, zhruba kolem 5%, zbytek je nárazníkový plyn He, nebo Ne. Celkový tlak plynů je 100 – 500 kPa. Excimerní lasery jsou buzeny příčným elektrickým výbojem při atmosférickém tlaku. Čerpací výboj musí mít charakter doutnavého výboje, proto je laserová komora vybavena systémem předionizace prostoru mezi elektrodami hlavního výboje. Předionizace se uskutečňuje zpravidla UV zářením z pomocných elektrických výbojů. Tyto lasery pra-

cují pouze v pulsním režimu. Excimerní molekuly mají dobu života přibližně 10 ns, to určuje i dobu trvání laserových impulsů.



Obr. 19 – Schéma excimerního laseru

Na obr. 19 je konstrukce excimerního laseru. Přístroj musí mít zabezpečenou výměnu směsi pracovních plynů, protože je omezená její životnost. Navíc používané plyny Cl_2 a F_2 jsou agresivní, což vyžaduje příslušné bezpečnostní opatření a odpovídající konstrukci laserové komory. Laser je vybavený systémem cirkulace pracovní směsi, chlazením, vysokonapěťovým zdrojem a obvody na vytvoření vysokonapěťového budicího impulsu.

Excimerní lasery mají energii impulsů od 1 do 500 mJ. Střední výkon od 1 do několika 100 W. Špičkové výkony od 1 do 20 MW. Celková účinnost bývá kolem 2,5%. Na dosažení kratších vlnových délek jako 157 nm je perspektivně použit generování 2. a 3. harmonických excimerních laserů. Jelikož tyto lasery vyzařují v oblasti UV části spektra, využívají se většinou v medicíně a fotolitografii.

1.4 Pracovní režim

Pracovním režimem laseru se rozumí, v jakém časovém stavu energie paprskem vychází. Rozlišujeme výstup impulzivní, kde zesílené světlo vychází v určitých časových intervalech a výstup stálý (kontinuální).

1.4.1 Impulsní režim

Impulsní laser je zdrojem mohutných světelných záblesků, trvajících někdy pouze stomiliontinu sekundy. Jedním ze základních parametrů impulsního laseru, zvláště z hlediska jeho technologických aplikací, je výkon impulsu. Důkazem o rapidním pokroku v této technologii je fakt, že impulsní lasery stavěné před několika lety dosahovaly výkonů desítek kW, dnes se dosahuje výkonů kolem desítek tisíc kW a energie impulsů vzrostla z 0,1 do 10 000 J. Impulsní laser vyzařuje impuls světla v důsledku impulsního buzení. Hlavním představitelem impulsních laserů je rubínový laser viz. kapitola 1.3.1.1. Žádný ze současných laserů nevyhovuje celkovým požadavkům na generátor produkující impulsy nanosekundové délky s energií desítek až stovek kJ a potřebnou opakující se frekvencí impulsů, stabilitou, účinností aj.

Neodýmové sklo, jakožto aktivní prostředí se nejvíce blíží těmto požadavkům, avšak ani zdaleka je nesplňuje. Dalším kandidátem na využití ve výkonných impulsních zařízeních je jódový fotodisociační laser. Čerpání atomů jódu na metastabilní hladinu se uskutečňuje fotodisociací, např. molekul CF_3I nebo $\text{C}_2\text{F}_5\text{I}$ ultrafialovým zářením výkonné výbojky. Absorpční čára těchto molekul má dostatečnou šířku a umožňuje absorpci značné části energie výbojky. Akumulovaná energie ve vybuzených atomech jódu dosahuje 25 J/l a inverze trvá přibližně 1 ms.

1.4.2 Kontinuální režim

Pro činnost ve spojitém (kontinuálním) režimu se od kvantového systému (atom, molekula nebo iont) vyžaduje splnění velmi náročné podmínky: inverze obsazení hladin musí existovat dlouhý čas a ne pouze po dobu krátkých časových intervalů. K tomu je zapotřebí, aby se spodní hladina pracovního přechodu kvantového systému rychle vyprazdňovala. Tímto jsou ohraničené možnosti výběru aktivních prostředí, které mohou pracovat ve spojitém režimu. I přesto však mnohá důležitá aktivní prostředí, například směs plynů $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$, v kontinuálním režimu pracují dobře. Nejnáročnější podmínky však vznikají tehdy, kdy se od laseru vyžaduje, aby aktivní prostředí generovalo spojitě záření

s dostatečně velkým výkonem. Největším problémem je odvod tepla z aktivního prostředí. Dokonce i u laserů s velkou účinností (10%) při výstupním výkonu 1 kW se na teplo mění až 9 kW čerpacího výkonu. Zahřívání značně komplikuje činnost laseru.

- Při zahřátí dochází k tepelnému vybuzení dolních kvantových hladin kvantového systému, což porušuje inverzi obsazení pracovních hladin.
- Velkým zahřátím se zhoršuje optická homogenita aktivního prostředí v rezonátoru.
- Velkým zvýšením teploty se dokonce může zničit vlastní aktivní prostředí – tepelně disociovat molekulový plyn, roztavit sklo nebo krystal.

Proto získání vysokého výkonu při kontinuálním režimu je nejen složitým vědeckým problémem, ale vyžaduje i řešení celé řady praktických úloh. I když se podaří najít vhodný kvantový systém s konstantní inverzí obsazení hladin, zůstává klíčovým problémem rychlý odvod tepla.

Při použití krystalů nebo skle ve funkci aktivního prostředí omezuje generovaný výkon malá tepelná vodivost těchto materiálů. Například aktivované sklo není vhodné pro kontinuální režim ani při malých výkonech. Při použití krystalů je tepelná vodivost o něco větší a je možné získat kontinuální záření o výkonu asi 300 W. Na generaci s výkonem 1 kW a větší jsou vhodné zásadně plynná aktivní prostředí nezávisle na způsobu čerpání. Plynnou směs zahřátou v průběhu čerpání a generace je možno rychle vyměnit a to rychlostí vyšší než je rychlost zvuku. Proto je rychlá výměna plynné směsi základem činnosti většiny kontinuálních laserů.

1.4.2.1 Režim volné generace

Laserová činnost, kterou kromě zdroje neovlivňují žádné další prvky, pracuje v režimu volné generace. Vyzářený světelný impuls má v tomto režimu dokonce menší výkon, jako je výkon výbojky, protože laser generuje impuls přibližně dvojnásobné délky, než je impuls výbojky. Navíc účinnost laseru má hodnotu řádově 0,1%. To znamená, že energie laserového impulsu je přibližně stokrát menší, než energie impulsu výbojky.

1.4.2.2 Režim modulace kvality

Laser, pracující v režimu modulace kvality dosahuje v porovnání s režimem volné generace výrazně vyšších výkonů. Podstatou je akumulace energie v aktivním prostředí, vybuzením iontů na metastabilní hladiny a následném vyzáření takto nahromaděné energie ve tvaru velmi krátkého impulsu v trvání desítek ns. To je doba, které je $10^4 - 10^5$ krát

menší, než je délka čerpacího impulsu. Proto se do laserového rezonátoru ukládá rychlá optická uzávěrka založena na Kerrově, Pockelsonově nebo na jiných efektech. Po dobu čerpání je optická uzávěrka zavřená a tak brání vícenásobnému odrazu světla na zrcadlech rezonátoru a tím i generaci záření. Tím je umožněno nashromáždění velkého množství částic ve vybuzeném stavu.

Jakmile se závěrka laseru rychle otevře, začíná pracovat ve stavu se silnou inverzí, protože zesílení aktivního prostředí značně převyšuje ztráty světla v rezonátoru s otevřenou uzávěrkou. Intenzita záření za krátký čas lavinově naroste a většina energie obsažená v aktivním prostředí se vyzáří už v průběhu několika průchodů světla rezonátorem.

Rezonátorem o délce $L = 0,6$ m projde světlo za čas $T = 2L/c = 4$ ns, a proto typická délka impulsu výkonného laseru pracujícího v režimu modulace kvality má hodnotu $\tau_i = (10 - 20)$ ns. Při celkové energii impulsu záření 1 J se takto dosahuje špičkový výkon 50 – 100 MW. Další zvyšování výkonu zvyšováním energie generovaného impulsu je neefektivnější vzhledem na těžkosti vznikající při formování krátkého laserového impulsu s velkou energií.

1.4.2.3 Režim synchronizace modů

Při tomto režimu činnosti vícemodového laseru se dosahují mnohem kratší impulsy délky trvání několika pikosekund. Tato délka trvání je značně menší než čas průchodu světla rezonátorem. Lasery, které vyzářují světlo v široké frekvenční oblasti (například lasery s neodýmovým sklem viz. kapitola 1.3.1.2) pracují současně na mnoha axiálních modech frekvence, kterých se navzájem liší o $\Delta f = c/2L$. Fáze světelných vlnění axiálních modů navzájem nesouvisí. Vícemodové záření připomíná “světelný šum“, vyvolaný interferencí světelných vlnění s různými frekvencemi.

Pokud do prostoru rezonátoru vložíme “prosvětlující“ lineární absorbér, dostaneme režim činnosti, ve kterém se přednostně zesilují impulsy fluktací intenzity ultrakrátké délky. Nakonec vzniká jediný impuls ultrakrátké délky, ve kterém se nahromaděná energie vyzáří v aktivním prostředí. Při každém odrazu od polopropustného zrcadla se část energie dostává ven z rezonátoru. Právě proto vycházející záření z laseru pracujícího v režimu synchronizace modů představuje skupinu impulsů, jejichž celková délka $T = 2L/c$ leží v nanosekundové oblasti. Rychlá elektrooptická uzávěrka umožňuje z této skupiny vyčlenit jediný ultrakrátký impuls.

Energie tohoto impulsu má malou hodnotu (několik mJ). Další zvýšení energie pikosekundového impulsu je možno dosáhnout v laserovém kaskádovém zesilovači, který se skládá z řady laserových zesilovačů. Takto se díky velkému průměru koncových zesilovacích kaskád může zvýšit energie impulsu na 100 – 1000 J, přitom se zachová malá rozbíhavost záření. Dále však zvyšovat energii v jednom laserovém paprsku nelze, protože nemůžeme zvětšit průřez zesilovače nad daný průměr, jelikož vznikají nežádoucí kmity v příčném směru. Na další zvýšení energie se používá zesílení impulsu v několika (10 – 100) paralelních zesilovacích stupních s následným sčítáním energie impulsů na jednom terči. Ve vícekanálových zesilovačích se dá zvýšit energie na 10 kJ, je dokonce možné dosáhnout až 100 kJ.

1.5 Bezpečnost práce

Maximální přípustná dávka ozáření (MPE) je úroveň laserového záření, jemuž může být za normálních okolností vystaven člověk, aniž by ozáření na něm zanechalo nepříznivé následky. Úrovně MPE odpovídají maximální úrovni záření, které může být vystaveno oko nebo pokožka bez okamžitého nebo pozdějšího poranění, a vztahují se k vlnové délce laserového záření, délce impulsu nebo době trvání ozáření, typu ozářené tkáně, a pro viditelné světlo a infračervené záření v blízké oblasti v rozsahu vlnových délek od 400 do 1400 nm také k rozměru obrazu na sítnici. [14]

1.5.1 Laserové záření třídy 1

Neumožní během provozu přístup lidské obsluhy k záření přesahujícímu limit přístupné emise třídy 1 pro použitelné vlnové délky a doby trvání vyzařování. Tato zařízení jsou bezpečná během používání, včetně dlouhodobého přímého sledování svazku i v případě sledování pomocí optických pomůcek (oční lupy a dalekohledy). Vztahuje se na celý rozsah vlnových délek. Pohled do svazku viditelného záření může způsobit oslňující optické efekty. Jsou bezpečné za přiměřeně předvídatelných okolností. Patří sem rovněž vysokovýkonové lasery, které jsou zcela zakrytovány tak, že potenciálně nebezpečné záření není během jejich používání přístupné (zapouzdrěná laserová zařízení), při otevření krytu se laserové zařízení vypne. [17]

1.5.2 Laserové záření třídy 1M

Emituje záření v rozsahu vlnových délek od 302,5 nm do 4 000 nm, které neumožní během provozu přístup lidské obsluhy k záření přesahujícímu limit přístupné emise třídy 1

pro použitelné vlnové délky a doby trvání vyzařování v místě, kde se úroveň záření měří. Tato zařízení jsou bezpečná během používání, včetně dlouhodobého přímého sledování svazku nechráněnými očima. K poškození zraku může dojít následkem ozáření v případě sledování svazku pomocí dvou kategorií optických pomůcek (lupy a dalekohledy) za definovaných podmínek. Pohled do svazku viditelného záření může způsobit oslňující optické efekty.

1.5.3 Laserové záření třídy 2

V rozsahu vlnových délek viditelného záření od 400 nm do 700 nm, které neumožní během provozu přístup lidské obsluhy k záření přesahujícímu limit přístupné emise třídy 2 pro použitelné vlnové délky a doby trvání vyzařování. Tato zařízení jsou bezpečná pro chvilková ozáření, ale mohou být nebezpečná při záměrném pohledu do svazku. Aktivní ochranná reakce, jako zavření očí nebo otočení hlavy, dostatečně chrání oko před nepříznivým působením laserového záření, pokud trvá po dobu max. 0,25 s. Tato doba odpovídá času, za který stačí člověk po zásahu oka intenzivním světlem mrknout a případně odvrátit hlavu. Uživatelé jsou informováni pomocí výstražných štítků, aby se nedívali upřeně do svazku. Chvilkové ozáření může nicméně způsobit oslnění, zábleskovou slepotu a přetrvávající zrakové vjemy, tedy dočasné narušení vidění, což může mít negativní vliv na bezpečnost prováděné práce.

1.5.4 Laserové záření třídy 2M

V rozsahu vlnových délek viditelného záření od 400 nm do 700 nm, které neumožní během provozu přístup lidské obsluhy k záření přesahujícímu limit přístupné emise třídy 2 pro použitelné vlnové délky a doby trvání vyzařování. Jsou bezpečná pro krátkodobá ozáření pouze pro oči bez optických pomůcek. Poškození oka může nastat po ozáření s jednou ze dvou kategorií optických pomůcek (oční lupy nebo dalekohledy) za určených podmínek. Chvilkové ozáření může nicméně způsobit oslnění, zábleskovou slepotu a přetrvávající zrakové vjemy, tedy dočasné narušení vidění, což může mít negativní vliv na bezpečnost prováděné práce. [17]

1.5.5 Laserové záření třídy 3R

Vyzařují záření, které může překročit MPE při přímém sledování uvnitř svazku, ale riziko poškození je ve většině případů relativně nízké, protože AEL pro třídu 3R je pětinašobek AEL pro třídu 2 (viditelné svazky laseru) nebo AEL pro třídu 1 (pro neviditelné

svazky). Nebezpečí poškození se zvyšuje s délkou ozáření a ozáření je nebezpečnější pro úmyslné ozáření zraku. Tato zařízení by měla být použita pouze tam, kde je přímý pohled do svazku nepravděpodobný. Chvilkové ozáření ve viditelném vlnovém pásmu záření může nicméně způsobit oslnění, zábleskovou slepotu a přetrvávající zrakové vjemy, tedy dočasné narušení vidění, což může mít negativní vliv na bezpečnost prováděné práce.

1.5.6 Laserové záření třídy 3B

Jsou běžně při pohledu do svazku nebezpečná, včetně nahodilých krátkodobých ozáření. Sledování difuzních odrazů je běžně bezpečné. Lasery třídy 3B, které dosahují AEL pro tuto třídu, mohou vytvářet malá poškození pokožky a představovat riziko zapálení hořlavých materiálů (v případech, kdy má svazek malý průměr nebo je zaostřen).

1.5.7 Laserové záření třídy 4

Umožní přístup lidské obsluhy k laserovému záření překračujícímu limit přístupné emise pro třídu 3B. Pohled do svazku i ozáření pokožky jsou nebezpečné, může být nebezpečné i pozorování rozptýlených odrazů. Tyto lasery představují i nebezpečí vzniku požáru. [17]

1.5.8 Biologické účinky záření laserů

Laserové záření obecně působí na biologické tkáně mechanismem, který může zahrnovat působení tepla, fotochemických procesů a nelineárních účinků. Poškození tkáně je vázáno na fyzikální parametry zdroje záření, zejména vlnovou délku záření, dobu trvání impulsu záření, velikost obrazu, intenzitu ozařování a dávku ozáření. Příčinou všech typů poškození biologické tkáně je absorpce záření touto tkání. Probíhá na úrovni atomů nebo molekul a je to proces závislý na vlnové délce absorbovaného záření. Vlnová délka tedy určuje, kterou tkáň je určitý laser schopen poškodit. [16]

Tepelné účinky jsou spojovány s dobou trvání ozáření od 1 ms do několika sekund. Molekuly po absorbování energie zrychlí kmitání, dojde ke zvýšení teploty ve tkáni. Buňky v této oblasti jsou spálené, poškození tkáně plyne především z rozložení proteinů. Tento typ poškození je běžnější u laserů pracujících v kontinuálním režimu nebo u laserů s dlouhými pulsy, vyskytuje se však i u laserů s krátkými pulsy. Působením vodivosti se tepelná vlna šíří a dochází ke zvětšení plochy poškození. [16]

Fotochemické účinky jsou vyvolány absorpcí dané energie světla, spíše než uvolňování energie začnou probíhat chemické reakce. Tyto reakce jsou schopny vyvolat poškození již při nízkých úrovních ozáření. Pokožka, čočka oka a částečně i sítnice mohou vykazovat nevratné změny způsobené dlouhým ozářením nízkými úrovněmi UV záření a také viditelného světla s krátkou vlnovou délkou. K poškození dochází, pokud doba ozáření je nadměrná nebo se po dlouhou dobu opakují kratší ozáření.

Nelineární účinky jsou vyvolány lasery s vysokými špičkovými výkony a krátkými pulsy. Cílová tkáň je ve velmi krátkém čase vystavena velmi intenzivnímu ozáření, dochází v ní k rychlému nárůstu teploty, při které se kapalné složky buněk přemění v plyn. Při této změně skupenství dojde k explozi a prasknutí buňky. Může dojít k mechanickému poškození tkáně vzdálené od absorbující vrstvy působením posunu tkání vůči sobě. [16]

Lasery vyzařující UV a vzdálené infračervené záření jsou nebezpečné pro rohovku. Lasery vyzařující viditelné a blízké infračervené záření jsou nebezpečné pro sítnici; mezi rohovkou a sítnicí dochází ke zvýšení intenzity ozáření. Poranění nebo spálení sítnice se hojí jizvou, jejíž umístění určuje závažnost poškození. Může vést ke zhoršení vidění, ale i ke ztrátě zraku. Na pokožce se vlivem viditelného a infračerveného záření může objevit zčervenání, puchýře, pigmentace, zanícení a následně zjizvení pokožky. [14, 15]



Obr. 20 – Varovná značka na laserové záření

2 OCELOVÉ MATERIÁLY

2.1 Technické slitiny železa

Téměř 80% prvků v periodické soustavě tvoří kovy. Nejdůležitější a v průmyslu nejpoužívanější jsou technické slitiny, v nichž převládá železo. Je to slitina železa s uhlíkem a jinými prvky, používaná v technické praxi. Dělíme ji na surová železa a oceli.

2.1.1 Surová železa

Železná ruda se nejčastěji zpracovává hutnickým způsobem. Při tomto zpracování nezískáme přímo čistý kov, ale materiál technický, tj. surové železo. Toto surové železo je složitá slitina železa s uhlíkem (nad 2%), která obsahuje další prvky: mangan ($\leq 30\%$), křemík ($\leq 8\%$), fosfor ($\leq 3\%$), chrom ($\leq 18\%$) a jiné legury s obsahem menším než 10%. Při překročení těchto obsahů jde o tzv. feroslitiny. Podle chemického složení se surové železo dělí na nelegované (ocelářské, slévárenské), legované. [4]

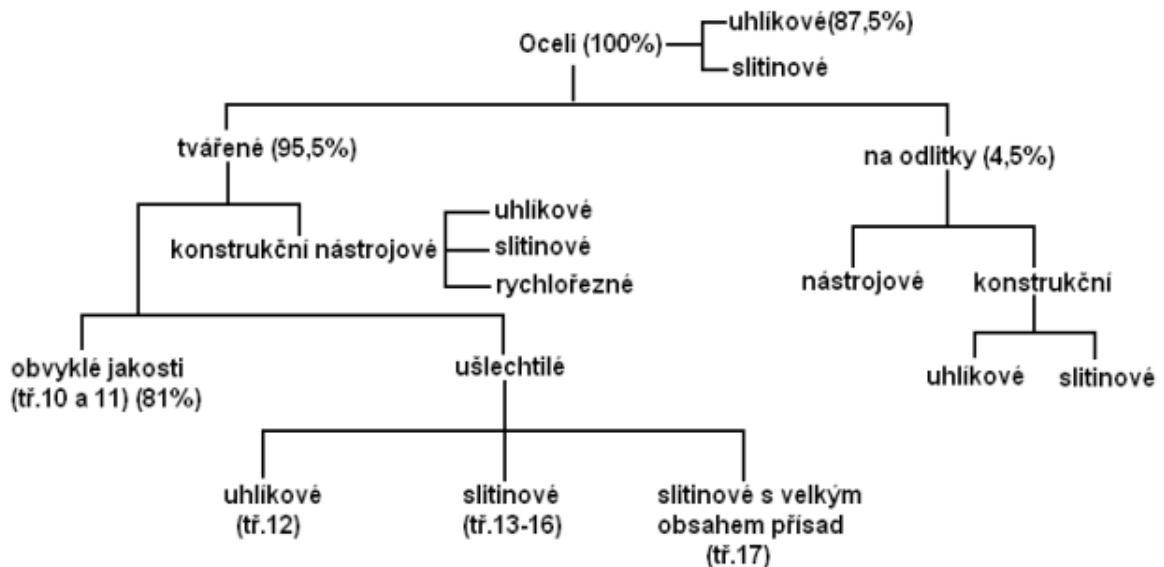
Surové železo se nehodí přímo k výrobě součástí. Ve slévárnách se z nich po přetavení zhotovují odlitky nebo z nich v ocelárnách vyrábí ocel. Feroslitiny mají hlavní uplatnění jako přísady (legury) při výrobě ocelí (oceli legované). Odlitky jsou již konečným produktem sléváren. Dále se pak strojírensky zpracovávají např. obráběním. Ocel vyrobená zkujňováním v některé ocelářské peci (konvertor, martinská pec, elektrická pec, kyslíkový konvertor) se odlije do kovových forem – kokil. V nich ocel ztuhne na ingoty, které se dále zpracovávají tvářením na hotové tovary (kolejnice, tyče, dráty, plechy, trubky), nebo na polotovary, z nichž se dalšími výrobními postupy zhotovují žádané předměty. [5]

2.1.2 Oceli

Pro své mechanické a technologické vlastnosti je ocel dodnes nejdůležitějším technickým materiálem. Její všestrannost jako materiálu pro stavbu strojů, zařízení, nástrojů apod. vede k výrobě oceli o nejrůznějších vlastnostech. [4]

Ocel je slitina železa s uhlíkem (do 2,14%C) s doprovodnými prvky (Mn, Si, P, Cr), které se do oceli dostaly při výrobě. Kromě doprovodných prvků obsahují některé oceli záměrně přidané prvky, pro dosažení požadovaných vlastností. Tyto prvky se nazývají legury a jsou to např. Cr, W, Mo, V, Ni a jiné. Všestrannost oceli vede k vývoji a výrobě ocelí o nejrůznějších mechanických a technologických vlastnostech. Přitom se některé z nich od sebe nijak zvlášť neliší a uvádějí se na trh z konkurenčních důvodů. Přehled ocelí

se zřetelem na způsob výroby, na použití a na chemické složení je uveden na Obr.21. Jsou zde uvedeny i některé údaje o podílu určitých skupin a celkové výrobě u nás.



Obr. 21 – Rozdělení ocelí [18]

Surová ocel – podle ČSN 42 002 název zahrnující veškerou ocel odlitou na ingoty, plynule odlévanou ocel na lité předvalky a všechny druhy tekuté oceli na odlitky. Surová ocel je dále tvářena za tepla válcováním nebo kováním.

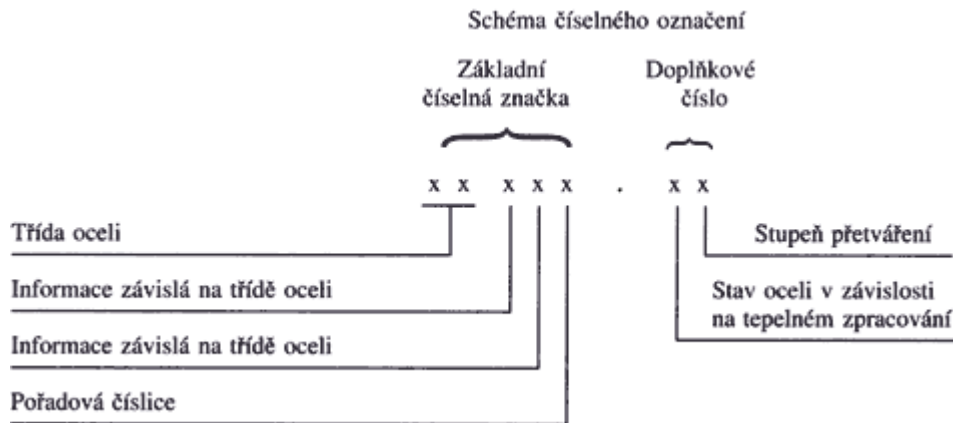
Ocel k tváření – kujné železo vyrobené ve stavu tekutém. Podle použití se dělí na konstrukční a nástrojové, podle chemického složení na oceli uhlíkové a slitinové.

Oceli uhlíkové – vlastnosti jsou dány především obsahem uhlíku. Dělí se na nízkouhlíkové (obsah uhlíku do 0,25%), středně uhlíkové (od 0,25 do 0,6%C) a vysokouhlíkové (nad 0,6%C).

Oceli slitinové - vlastnosti jsou dány druhem a množstvím legujících prvků. Dělí se na nízkolegované (do 2,5% legujících přísad), střednělegované (od 2,5% do 5% legur) a vysokolegované (se součtem legujících přísad nad 10%).

2.1.2.1 Značení a rozdělení ocelí k tváření

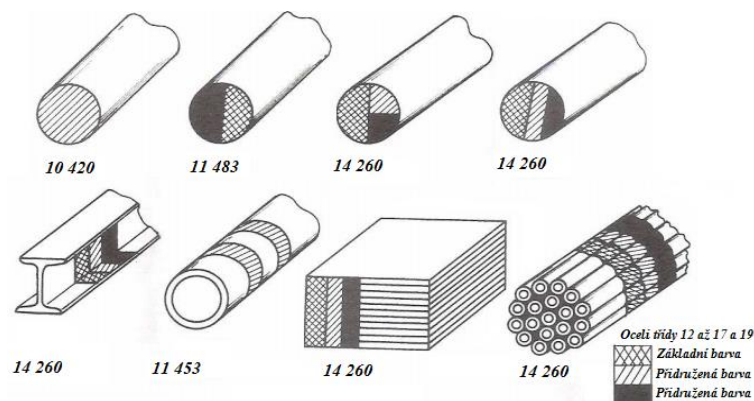
Podle normy ČSN 42 0002:1976 se oceli k tváření označují číselně a toto značení se skládá ze základní číselné značky a doplňkového čísla odděleného tečkou.



Obr. 22 – Schéma číselného značení ocelí k tváření

Základní číselná značka je pětimístné číslo, označující základní materiál. První číslice v základní značce je 1 a označuje tvářenou ocel. Druhá číslice ve spojení s první označuje třídu oceli. Význam doplňkových číslic je v tab. 4.

Mimo číselné značení se normalizované hutní výrobky z ocelí tříd 10 až 19 značí také barevně a to jedním až třemi barevnými pruhy. Norma rozeznává dva způsoby označování. První pro oceli třídy 10 a 11 a pro oceli tříd 12 až 17 a 19. U ocelí tříd 10 a 11 je použito jednoho, nejvýše dvou barevných odstínů. U ocelí tříd 12 až 17 a 19 je použito tři barevných odstínů. Jednotlivé druhy ocelí téže třídy mají další dvě různé přidružené barvy. Barevných odstínů je 13. Barevné označení je uvedeno v normě ČSN 42 0010, význam značení viz. příloha P I. Jednotlivé hutní materiály se barevně označují na čele nebo na konci polotovaru viz. Obr. 23.



Obr. 23 – Ukázka barevného značení hutních materiálů

Oceli k tváření jsou rozděleny do devíti tříd jakosti podle chemického složení. Jsou to třídy 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 19. Rozdělení ocelí do tříd a jejich chemické složení je v tabulce 1.

Třída oceli	Oceli podle		Charakteristika ocelí	
	použití	stupně legování		
10	Konstrukční	Nelegované	Předepsané hodnoty mechanických vlastností, chemické složení není předepsáno	
11			Předepsané hodnoty mechanických vlastností a obsah C, P, S popř. (P+S) i dalších prvků	
12			Předepsaný obsah C, Mn, Si, P popř. (P+S) i dalších prvků	
13		Legované	Nízkolegované	Legovací prvky: Mn, Si, Mn - Si, Mn - V
14				Legovací prvky: Cr, Cr - Al, Cr - Mn, Cr - Si, Cr - Mn - Si
15				Legovací prvky: Mo, Mn - Mo, Cr - Mo, Cr - V, Cr - W, Mn - Cr - V, Cr - Mo - V, Cr - Si - Mo - V, Cr - Mo - V - W
16				Legovací prvky: Ni, Cr - Ni, Ni - V, Cr - Ni - Mn, Cr - Ni - V, Cr - Ni - W, Cr - Ni - Mo, Cr - V - W, Cr - Mo - V - W
17	Středně legované a vysokolegované	Legovací prvky: Cr, Ni, Cr - Ni, Cr - Mo, Cr - V, Cr - Al, Cr - Ni - Mo, Cr - Ni - Ti, Cr - Mo - V, Mn - Cr - Ni, Mn - Cr - Ti, Mn - Cr - V, Cr - Ni - Mo - V, Cr - Ni - Mo - W, Cr - Ni - Mo - Ti, Cr - Ni - V - W, Cr - Ni - W - Ti atd.		
19	Nástrojové	Nelegované	Předepsaný obsah C, Mn, Si, P, S	
		Legované (nízko, středně, vysoko)	Legovací prvky: Cr, V, Cr - Ni, Cr - Mo, Cr - Si, Cr - V, Cr - W, Cr - Al, Cr - Ni - W, Cr - Si - V, Cr - Mo - V, Cr - V - W, Cr - Ni - Mo - V, Cr - V - W - Co, Cr - Ni - Mo - W, Cr - Ni - V - W atd.	

Tab. 1 – Rozdělení ocelí do tříd

Význam třetí a čtvrté číslice v základní číselné značce ocelí:

Třída 10 - Dvojcíslicí dané třetí a čtvrtou číslicí v číselné značce oceli vyjadřuje u konstrukčních ocelí nejmenší pevnost v tahu v 10 MPa s těmito výjimkami:

- oceli obchodní jakosti: třetí a čtvrtá číslice je 0 (např. 10 000, 10 004)
- betonářské oceli: dvojcíslicí udává nejmenší mez kluzu v 10 Mpa.

Třída 11 - Dvojcíslicí dané třetí a čtvrtou číslicí v číselné značce oceli vyjadřuje u konstrukčních ocelí nejmenší pevnost v tahu v 10 MPa s výjimkou automatových ocelí, kde třetí číslice - 1 - označuje ocel obzvlášť vhodnou k obrábění a čtvrtá číslice charakterizuje střední obsah uhlíku v desetínách procenta, zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. Je-li střední obsah uhlíku menší než 0,1 %, používá se číslice 0.

Třída 12-16 - U ocelí třídy 12 je třetí číslice v číselné značce oceli většinou 0. U ocelí tříd 13 až 16 vyjadřuje třetí číslice součet středních obsahů legovacích prvků v procentech, zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. Čtvrtá číslice vyjadřuje střední obsah uhlíku v desetínách procenta se zaokrouhlením setin od 3 na vyšší desetinné číslo. Příklad: Průměrný obsah C 0,23 % se zaokrouhlí na 0,3; čtvrtá číslice bude 3.

Třída 17 - Třetí číslice v základní číselné značce ocelí třídy 17 vyjadřuje typ legování ocelí jednotlivými legovacími prvky nebo skupinou hlavních legovacích prvků dle Tab. 2. Čtvrtá číslice pak vyjadřuje obsah hlavních legovacích prvků Cr, Mn a Ni v jednotlivých druzích ocelí podle typu legování.

Číselná značka	Význam třetí číslice
17 0 xx	Oceli chromové
17 1 xx	Oceli chromové s dalšími přísadovými prvky (Al, Mo, Ni)
17 2 xx	Oceli chromniklové, popř. stabilizované (Ti, Nb)
17 3 xx	Oceli chromniklové, popř. stabilizované (Ti, Nb) a s dalšími přísadovými prvky (Mo, V, W, aj.)
17 4 xx	Oceli manganochromové, manganochromniklové
17 5 xx	Oceli niklové
17 6 xx	Oceli manganové
17 7 xx	Volné
17 8 xx	
17 9 xx	

Tab. 2 – Význam třetí číslice

Třída 19 - Třetí číslice v základní číselné značce ocelí třídy 19 vyjadřuje jednak nelegované oceli, jednak typ legování oceli jednotlivými legovacími prvky nebo skupinou hlavních legovacích prvků dle tabulky 3.

Číselná značka	Význam třetí číslice	
19 0 X X	Dvojcísli ze 3. a 4. číslice vyjadřuje u nelegovaných ocelí střední obsah uhlíku	Nástrojové oceli uhlíkové
19 1 X X		
19 2 X X		
19 3 X X	Oceli manganové, křemíkové, vanadové	Nástrojové oceli legované
19 4 X X	Oceli chromové	
19 5 X X	Oceli chrommolybdenové	
19 6 X X	Oceli niklové	
19 7 X X	Oceli wolframové	
19 8 X X	Oceli rychlořezné	
19 9 X X	Speciální oceli	

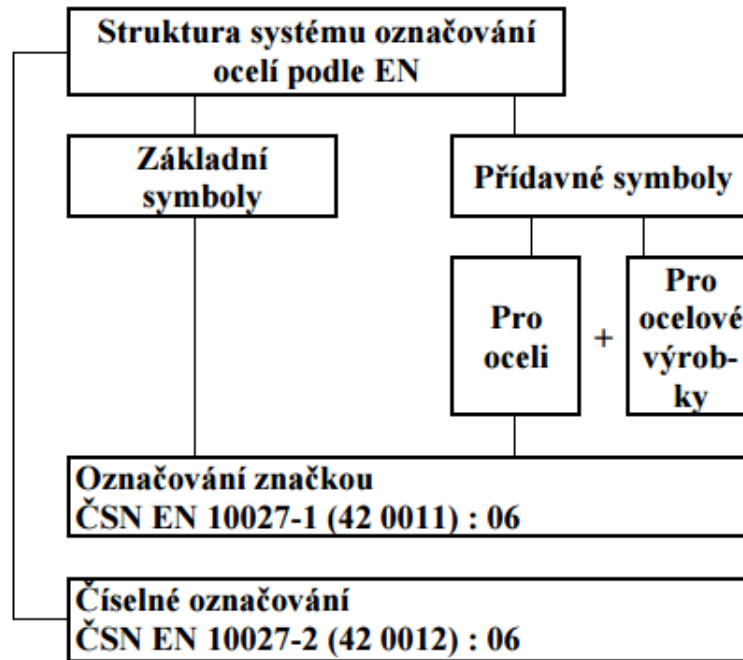
Tab. 3 – Význam třetí číslice u nástrojových ocelí

První doplňková číslice	Stav oceli	Druhá doplňková číslice	Stupeň přetváření		
			pásky válcované zastudena	plechy válcované	
				zatepla	zastudena
1xxxx.0	Tepelně nezpracovaný	1xxxx.x0	Dále nepřeválcováno	Dále nepřeválcováno	
1xxxx.1	Normalizačně žíhaný	1xxxx.x1	Lehce převálcováno		
1xxxx.2	Žíhaný (s uvedením způsobu žíhání)	1xxxx.x2	1/4 tvrdý		
1xxxx.3	Žíhaný na měkko	1xxxx.x3	1/2 tvrdý		
1xxxx.4	Kalený nebo kalený a popouštěný při nízkých teplotách, po rozpouštěcím žíhání (jen u austenitických ocelí)	1xxxx.x4	3/4 tvrdý		
1xxxx.5	Normalizačně žíhaný a popouštěný	1xxxx.x5	4/4 tvrdý		
1xxxx.6	Zušlechťený na dolní pevnost obvyklou u příslušné oceli	1xxxx.x6	5/4 tvrdý		
1xxxx.7	Zušlechťený na střední pevnost obvyklou u příslušné oceli	1xxxx.x7	Netvoří se při něm čtyřlístky (pásky jsou zpracovány se zřetelem na omezení anizotropie mechanických vlastností materiálů - omezení tvorby cípů); mechanické vlastnosti jako u měkce žíhaného materiálu		
1xxxx.8	Zušlechťený na horní pevnost obvyklou u příslušné oceli	1xxxx.x8	Zpracováno podle zvláštního předpisu		
1xxxx.9	Stavy, které nelze označit číslicemi 0 až 8	1xxxx.x9	Zpracování podle dohodnutého předpisu		

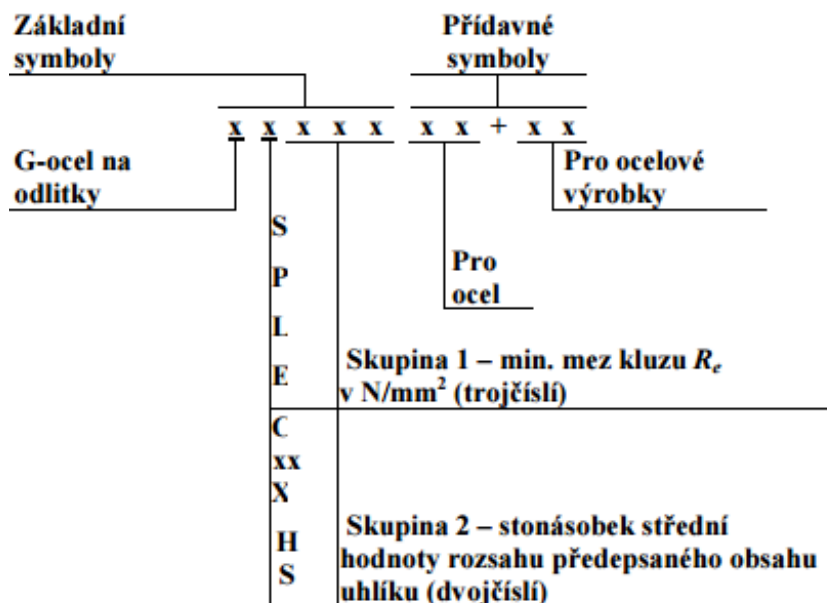
Tab. 4 – Významy první a druhé doplňkové číslice

2.1.2.2 Novodobé značení ocelí dle evropských norem

Značky se rozdělují do dvou skupin. Skupina 1 viz Obr. 24 značí oceli vytvořené podle jejich použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností. Skupina 2 označuje oceli podle jejich chemického složení viz. Obr. 25.



Obr. 24 – Označování ocelí podle ČSN EN 10027



Obr. 25 – Označování značkou podle ČSN EN 10027-1 (42 0011): 06

Legenda:

S – všeobecné oceli pro ocelové konstrukce

L – oceli pro potrubí

P – oceli pro tlakové nádoby

E – oceli pro strojní součásti

C – nelegované oceli (s výjimkou automatových) se středním obsahem Mn <1%;

xx – nelegované oceli se středním obsahem Mn > 1%, nelegované automatové oceli a legované oceli (kromě rychlořezných) s obsahem jednotlivých legujících prvků <5% - dvojcísle odpovídá stonásobku střední hodnoty rozsahu předepsaného pro obsah uhlíku;

X – legované oceli (kromě rychlořezných) s obsahem minimálně jednoho leg. prvku >5%;

HS – rychlořezné oceli.

Třída oceli 11	ČSN EN 10025-2 (42 0904) Výrobky válcované za tepla z nelegovaných konstrukčních ocelí		ČSN EN 10087 (42 0926) Oceli automatové. Tyče a dráty válcované za tepla		ČSN EN 10210-1 (42 1051) Duté profily tvářené za tepla z nelegovaných a jemnozrnných ocelí		
	ČSN	Značka	Číselné označení	Značka	Číselné označení	Značka	Číselné označení
10 000	S185	1.0035					
10 004	S185	1.0035					
11 109			11SMn30	1.0715			
11 110			10S20	1.0721			
11 120			15SMn13	1.0725			
11 140			35S20	1.0726			
11 373	S235JRG1	1.0036					
11 375	S235JR	1.0038			S235JRH	1.0039	
11 378	S235J0	1.0114					
11 443	S275JR	1.0044			S275J0H	1.0149	
11 448	S275J2	1.0144			S275J2H	1.0138	
11 500	E295	1.0050					
11 503	S355J2	1.0577			S355J2H	1.0576	
11 523	S355J0	1.0553			S355J0H	1.0547	
11 600	E335	1.0060					
11 700	E360	1.0070					

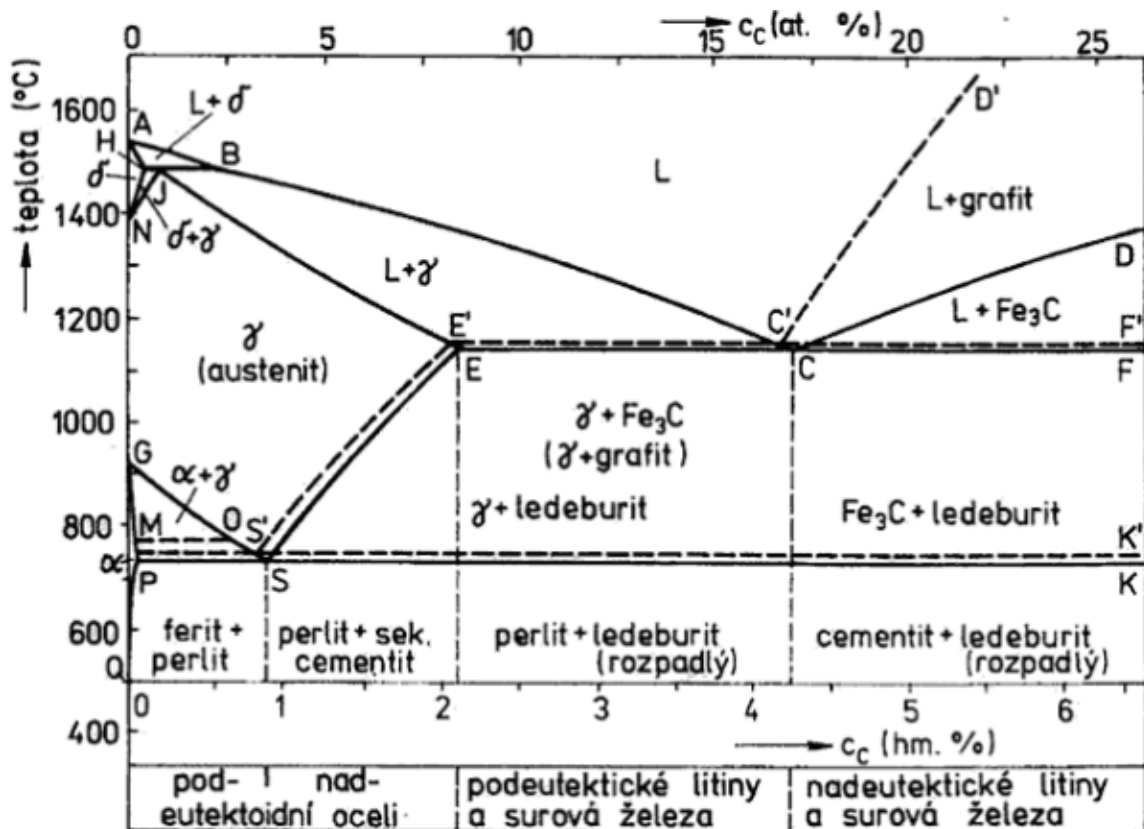
Třída oceli 12 až 16	ČSN EN 10083-1+A1 (42 0931) Oceli k zušlechťování. Technické dodací podmínky pro ušlechtilé oceli		ČSN EN 10083-2+A1 (42 0932) Oceli k zušlechťování. Technické dodací podmínky pro nelegované jakostní oceli		ČSN EN 10084 (42 0025) Oceli k cementování. Technické dodací podmínky		
	ČSN	Značka	Číselné označení	Značka	Číselné označení	Značka	Číselné označení
12 010					C10E	1.1121	
12 020					C16E	1.1148	
12 023					C15E	1.1141	
12 024	C22E	1.1151	C22	1.0402			
12 030	C25E	1.1158	C25	1.0406			
12 031	C30E	1.1178	C30	1.0528			
12 040	C35E	1.1181	C35	1.0501			
12 041	C40E	1.1186	C40	1.0511			
12 050	C45E	1.1191	C45	1.0503			
12 051	C50E	1.1206	C50	1.0540			
12 060	C55E	1.1203	C55	1.0535			
12 061	C60E	1.1221	C60	1.0601			
13 141	28Mn6	1.1170					
14 140	37Cr6	1.7034					
15 130	25CrMo4	1.7218					
15 142	42CrMo4	1.7225					
15 260	51CrV4	1.8159					

Tab. 5,6 – Přirazení značek ocelí ČSN ke značkám EN

2.2 Metalografické změny v oceli při tepelném namáhání

2.2.1 Metastabilní soustava Fe - Fe₃C

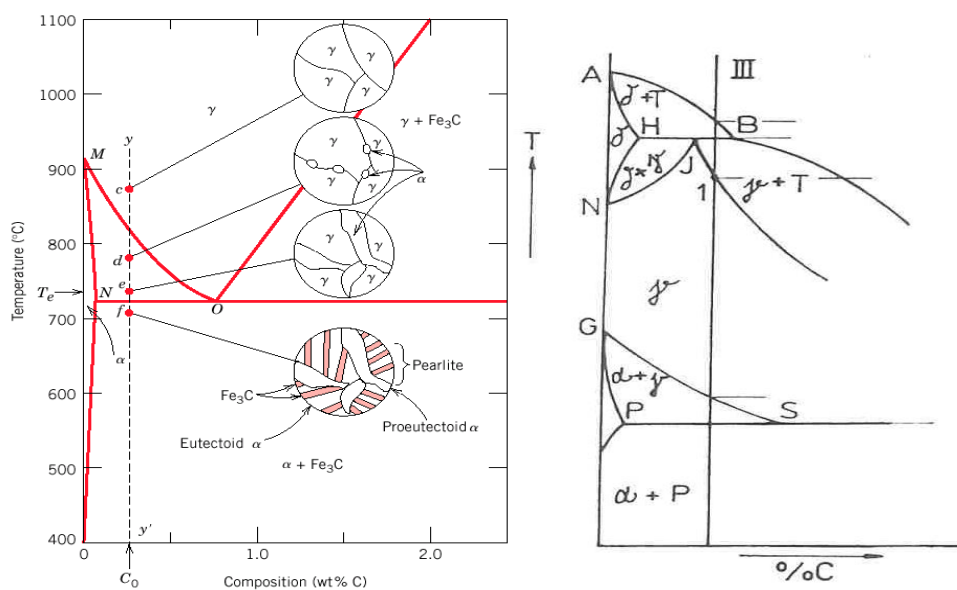
Ve slitinách železa je hlavním příměsovým prvkem uhlík, ten ovlivňuje důležité vlastnosti slitiny. Oceli tuhnou a chladnou zejména podle metastabilní soustavy Fe-Fe₃C, kde je uhlík vyloučen jako sloučenina Fe₃C (cementit), tato sloučenina není stabilní a může se rozkládat na grafit a železo. Litiny a surová železa většinou tuhnou a chladnou podle stabilní soustavy Fe-C, kde je uhlík vyloučen jako grafit. Oceli obsahují do 2,11% uhlíku, více uhlíku mají litiny a surová železa. Na obr. 26 je znázorněn rovnovážný diagram železo-uhlík stabilní soustavy přerušovanými čarami a metastabilní soustavy plnými čarami. Z diagramu lze v závislosti na teplotě a obsahu uhlíku odečíst fázové a strukturní změny v ocelích a litinách a to za předpokladu velmi pozvolného ochlazování slitiny. Rovnovážný diagram je důležitý pouze při pomalém ochlazování slitiny. Při vyšších rychlostech ochlazování se volí diagramy izotermického rozpadu austenitu - IRA nebo anizotermického rozpadu austenitu - ARA.



Obr. 26 – Rovnovážný diagram Fe – Fe₃C

Podeutektoidní oceli mají méně než 0,765 % uhlíku. Při tuhnutí oceli s obsahem 0,4% uhlíku existuje nad křivkou likvidu pouze jediná fáze - homogenní tavenina. Slitina začíná tuhnout za teploty dané bodem a1, z taveniny se začínají vylučovat první krystaly δ -feritu. Složení δ -feritu se mění podle čáry AH a složení zbylé taveniny podle AB, toto probíhá až do teploty dané bodem a2, peritektické teploty. Zde jsou v rovnováze 3 fáze: δ -ferit, který má obsah uhlíku daný bodem H (0,08 %), austenit o složení dané bodem J (0,08 %) a tavenina s obsahem uhlíku dané bodem B (0,53 %). Probíhá zde na přímce HJB peritektická přeměna za přebytku taveniny, která se v určitém množství zachová i pod teplotou a2.

V rozmezí teplot a2 – a3 se ze zbylé taveniny vylučuje austenit, jeho složení se mění podle křivky JE a složení taveniny podle BC. Pod křivkou solidu se ocel skládá pouze z krystalů tuhého roztoku austenitu s obsahem uhlíku odpovídajícím původní koncentraci uhlíku ve slitině. Při dalším ochlazování pod křivkou A3, což je kritická teplota pro danou ocel, se z austenitu začínají vylučovat po hranicích zrn první krystaly čistého železa α -feritu. Složení feritu se mění při poklesu teploty podle křivky GP a složení austenitu se mění podle křivky GOS, austenit se obohacuje uhlíkem. Za teploty 760 °C se paramagnetické krystaly tuhého roztoku α stávají feromagnetickými. Překrystalizace se ukončí tím, že při eutektoidní teplotě A1 (727 °C), zbylý austenit dosáhne koncentrace bodu S a ferit má složení dané bodem P, dochází k eutektoidní reakci. Austenit se rozpadá na perlit, což je směs feritu a cementitu. Výsledná struktura podeutektoidní oceli je složena z feritu a perlitu.



Obr. 27 – Výřez z diagramu Fe-Fe₃C: tuhnutí slitiny podle přímky III

2.3 Změny při rychlém ohřevu

Hlavní podstatou interakce ocelového materiálu s laserovým zářením je působení koncentrované zářivé energie na obráběný materiál. Velká hustota výkonu laserového záření ($10^{10} - 10^{14} \text{ W.cm}^{-2}$) zahřívá materiál tak významně nad teplotu bodu varu daného materiálu, že se materiál z místa působení záření odpařuje. Odpařený a odstraněný natavený materiál je tepelně namáhán stejně jako u klasického tepelného zpracování ocelí. Lišit se bude pouze v rychlosti ohřevu, která je u laserového záření vysoká a následném ochlazení. Objem teplem ovlivněného materiálu je malý. Laserové obrábění analogicky odpovídá povrchovému kalení.

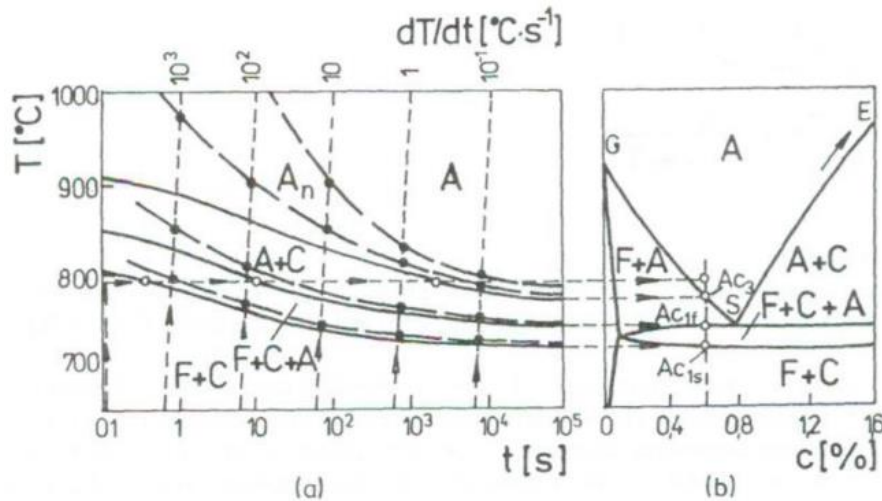
Jde tedy o fázové přeměny v tuhém stavu způsobující změny struktury, a tím i změny vlastností v tenkých povrchových vrstvách materiálu.

2.3.1 Austenitizace

Při laserovém obrábění je austenitizace první etapou v procesu tepelných změn v materiálu. Je uskutečněna za vysokých teplot v krátkém časovém intervalu. V této fázi se transformují výchozí feriticko cementické struktury perlitu na strukturu austenitickou.

Přeměna probíhá postupnou tvorbou zárodků a jejich dalším růstem, má difuzní charakter. Rychlost difuze závisí na teplotě a chemickém složení. Čím vyšší je teplota, tím rychleji probíhá difuze. U laserového působení je teplota velmi vysoká, tím bude vysoká i rychlost austenitické proměny.

Kinetiku austenitizace můžeme rozdělit na izotermickou a anizotermickou. V prvním případě ohřejeme danou slitinu velmi rychle na zvolenou teplotu ležící nad A_{c1} a sledujeme průběh fázových přeměn v závislosti na času. V obr. 28 byla zvolena teplota blízká $800 \text{ }^\circ\text{C}$ a příslušné teploty fázových přeměn jsou vyznačeny plnými čarami. Při anizotermické austenitizaci jde o ohřev určitou stálou rychlostí dT/dt a odpovídající teploty fázových přeměn jsou v obr. 28 nakresleny čárkovanými čarami. Je zřejmé, že průběh anizotermické a izotermické austenitizace se nejvíce liší při vysokých rychlostech ohřevu (krátkých dobách) v oblasti vysokých teplot.



Obr. 28 – Diagram izotermické (plná čára) a anizotermické (čárkovaně) austenitizace podeutektoidní oceli

Část termárního rovnovážného diagramu železo – uhlík - legující prvek (izokonační řez pro malý obsah legujícího prvku) A - austenit, An -austenit nehomogenní, F - ferit, C - cementit

2.4 Změny při rychlém ochlazení

Po interakci laserového paprsku s materiálem doprovázeným austenitizací následuje ihned ochlazování jak odvodem tepla do okolního materiálu, tak i proudem řezného plynu případně proudem chladicí olejové emulze u laserů vybavených chladícím zařízením. Množství austenitizovaného materiálu je malé a proto bude rychlost chládnutí velká.

Průběh přeměny přechlazeného austenitu v závislosti na teplotě a času znázorňují transformační diagramy izotermického a anizotermického rozpadu austenitu. Na rozdíl od rovnovážných diagramů platí pro ocel určitého chemického složení a pro určité podmínky austenitizace.

2.4.1 IRA – izotermický rozpad austenitu

Z důvodu rychlosti, která není při plynulém ochlazování při všech teplotách stejná je rozpad austenitu nejpřesněji a také nejnázorněji popsán pomocí diagramy izotermického rozpadu austenitu IRA. Diagramy IRA znázorňují průběh izotermických přeměn při různých teplotách. V souřadnicích teploty a času ($\log t$) počátek a konec přeměny za různých teplot. Obvykle se v diagramu znázorňuje i poloha kritických teplot Ac_1 a Ac_3 (nebo eutektoidní-

ho intervalu u slitinových ocelí eutektoidních a nadeutektoidních) a poloha počátku martenzitické přeměny M_s .

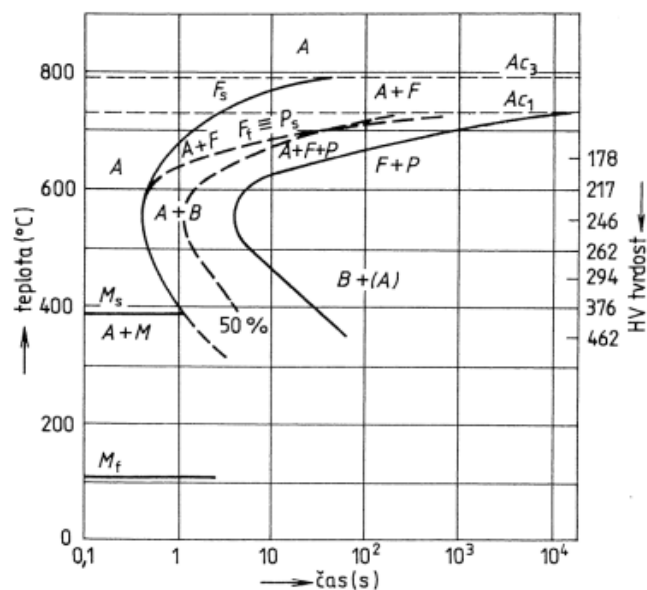
Závislost chemického složení oceli na podmínkách austenitizačního ohřevu určuje tvar diagramu. S rostoucím obsahem slitinových přísad se prodlužuje inkubační perioda (doba nutná k vytvoření aktivních zárodků schopných dalšího růstu) a průběh přeměny na rozhraní mezi perlitickou a bainitickou oblastí se zpomaluje. Vznikají dvě minima inkubační doby, tzv. nosy. U ocelí vysokolegovaných se obě oblasti se mohou úplně oddělit, takže mezi nimi zůstává pásmo, ve kterém je austenit zcela stabilizován.

Při použití vyšší teploty nebo delší austenitizace se čáry počátku i konce přeměny posunují k delším časům.

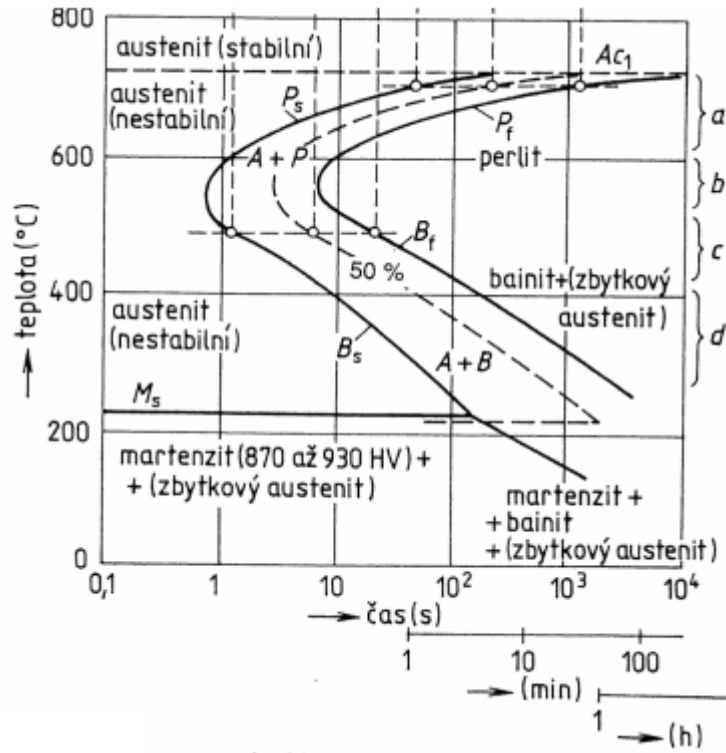
I stupeň homogenity austenitu má značný význam. Na nepříznivé změny tvaru diagramu má vliv každá heterogenita, projevují se zejména současným zkrácením inkubační periody a zpomalením přeměny. Podle množství uhlíku v dané oceli se diagramy IRA (stejně tak diagramy ARA) rozdělují na:

- Diagram IRA podeutektoidní oceli (obsah C < 0,8 %), (Obr. 29)
- Diagram IRA eutektoidní oceli (obsah C = 0,8 %), (Obr. 30)
- Diagram IRA nadeutektoidní oceli (obsah C > 0,8 %), (Obr. 31)

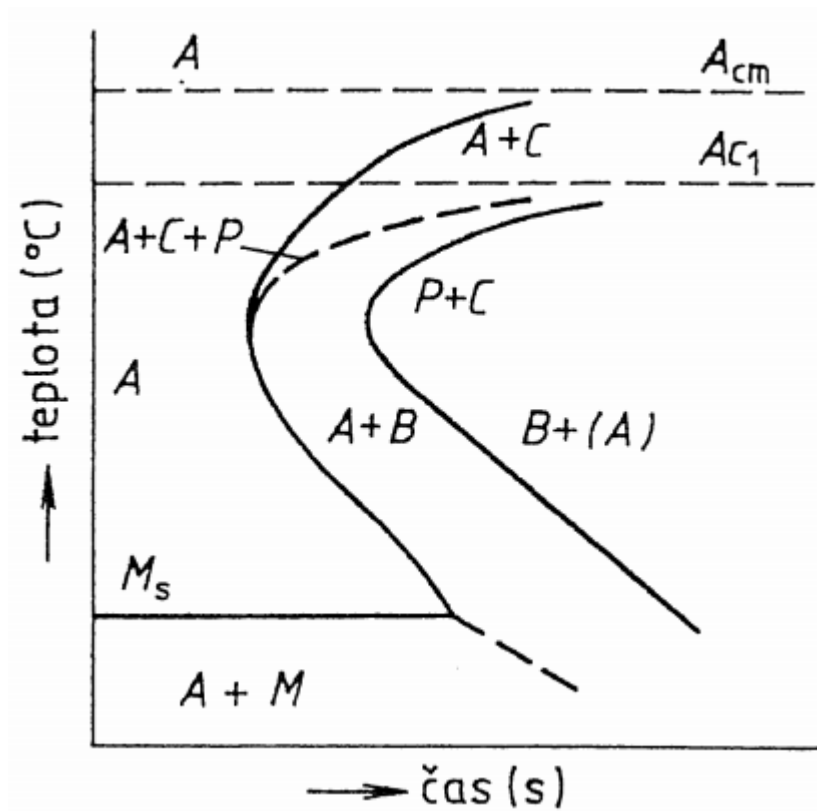
V diagramu IRA jsou kromě počátku a konce přeměny při různých teplotách zakresleny také čáry znázorňující dosažení určitého stupně přeměny (10 %, 50 % atd.). Tyto čáry usnadňují vytvoření názoru o kinetice přeměny pro různé teploty.



Obr. 29 – IRA diagram podeutektoidní oceli 12 040



Obr. 30 – IRA diagram eutektoidní – perlitické oceli



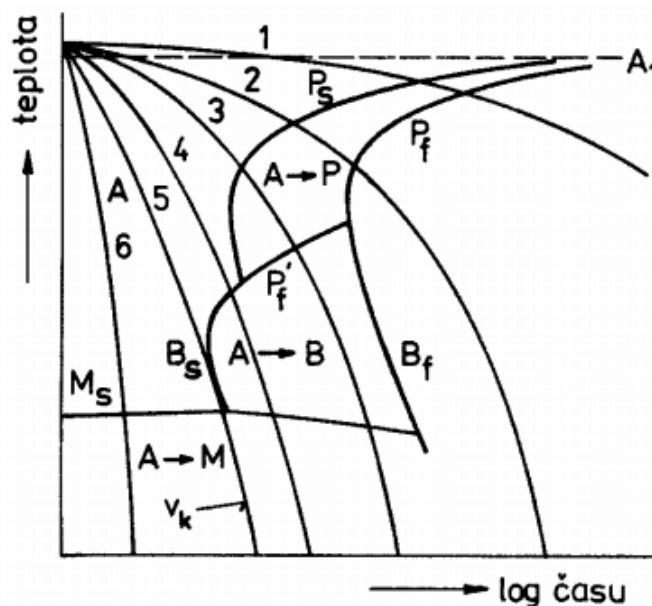
Obr. 31 – IRA diagram nadeutektoidní oceli

2.4.2 ARA – anizotermický rozpad austenitu

Oproti diagramům IRA kde se austenit rozpadá při konstantní teplotě, mají diagramy ARA mnohem širší využití. Podobně jako diagramy IRA udávají počátky a konce jednotlivých fázových přeměn, které však byly získány při plynulém ochlazování austenitu různou rychlostí. Křivky ochlazování jsou v diagramu zakresleny. Za jejich počátek se bere okamžik, kdy teplota při ochlazování klesne pod teplotu 860°C . Z tohoto důvodu jsou vzájemně porovnatelné diagramy ocelí o různém složení s různou austenitizační teplotou.

Při tomto způsobu ochlazování probíhají přeměny v zásadě podobně jako za izotermických podmínek. Proces je však komplikován tím, že výsledný rozpadový produkt je tvořen směsí struktur, vytvořených při různých teplotách. Proto jsou ARA diagramy ve srovnání s diagramy IRA složitější. Celý diagram ARA se skládá většinou z pěti oblastí: austenitické, feritické, perlitické, bainitické a martenzitické.

Perlitická a bainitická část mohou zcela splývat, takže při některých rychlostech mohou obě přeměny probíhat zčásti současně, nebo mohou být zcela odděleny, nebo se mohou jen částečně překrývat. Vliv austenitizačních podmínek a přísadových prvků je podobný jako u diagramů IRA. V přítomnosti slitinových přísad se však teplotní hystereze zvyšuje, a proto posuv křivek v diagramech ARA (směr k nižším teplotám a delším časům) je ve srovnání s diagramy IRA u legovaných ocelí větší než u uhlíkových.



Obr. 32 – Schématický ARA diagram

Diagramy ARA udávají rovněž v souřadnicích teplota-čas počátky a konce jednotlivých přeměn austenitu, které byly získány při jeho plynulém ochlazování různými, v diagramu vyznačenými rychlostmi. Diagramy ARA je tedy nutné číst ve směru jednotlivých křivek ochlazování. Z obr. 32 je patrné, že při relativně pomalém ochlazování eutektoidní oceli, křivky 1 a 2, se realizuje perlitická přeměna, přičemž s rostoucí rychlostí ochlazování se posouvá začátek i konce přeměny k nižším teplotám a kratším časům.

Při dosažení určité rychlosti ochlazování (křivka 3) neproběhne perlitická přeměna do konce a zbylý austenit transformuje v oblasti bainitické, takže výsledná mikrostruktura je tvořena perlitem a bainitem. Pro rychlosti ochlazování větší než odpovídá křivce 4, začíná přeměna austenitu bainitickou transformací a pod teplotu M_s pokračuje martenzitickou přeměnou. Se vzrůstající rychlostí ochlazování se zvětšuje podíl martenzitu a až od rychlosti větší než udává křivka 5, se austenit transformuje pouze na martenzit.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 EXPERIMENTÁLNÍ ŘEZÁNÍ LASEREM

3.1 Cíle praktické části

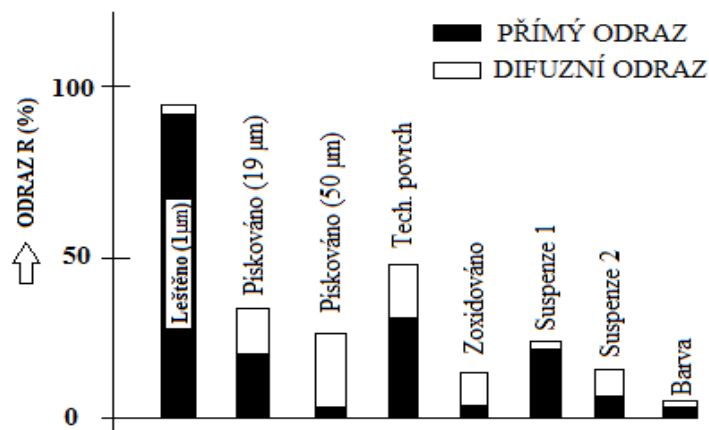
1. Soubor vlastností ovlivňující strukturu při obrábění
2. Experimentální výroba vzorků laserovým obráběním
3. Měření tvrdosti a rozsahu tepelně ovlivněné vrstvy
4. Vyhodnocení získaných dat a statistické zpracování
5. Posouzení změn struktury materiálu po průchodu laserového paprsku

3.2 Vlastnosti ovlivňující změnu struktury materiálu při obrábění

Množství materiálu odstraněného za pomoci laseru o dané vlnové délce a energii, závisí podstatným způsobem na vlastnostech obráběného materiálu. Jsou to jednak vlastnosti ovlivňující velikost odrazivosti a absorpce záření, jednak vlastnosti, na kterých závisí tepelné podmínky v místě laserového obrábění.

3.2.1 Vliv absorpce

Záření dopadající na povrch materiálu, může být odraženo, absorbováno případně propuštěno. Pro ohřev má význam pouze ta část záření, která je absorbována. Laserem lze tedy zpracovávat pouze materiály, které vykazují dostatečnou absorpci laserového záření.



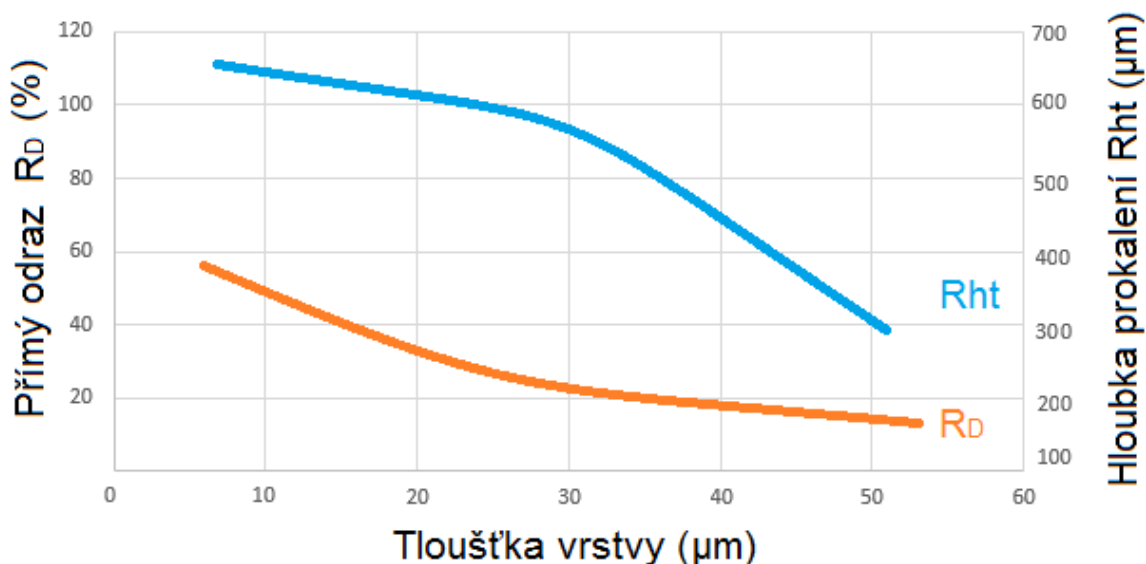
Obr. 33 – Odrazivost infračerveného laserového záření 10 600 nm na ocelovém povrchu

Na absorpci má vliv řada faktorů. Patří mezi ně druh a hustota materiálu, složení a povrchová úprava a také vlnová délka použitého záření. Pro vlnové délky současných technologických laserů (rubín, YAG, CO₂:N₂:He) jsou v Tab. 7 uvedeny součinitele odrazu záření některých kovů.

Materiál	Vlnová délka λ (nm)		
	694	1 065	10 600
Hliník	0,87	0,93	0,97
Chrom	0,56	0,58	0,93
Měď	0,82	0,91	0,98
Nikl	0,68	0,75	0,95
Stříbro	0,95	0,97	0,99
Ocel	0,58	0,63	0,93

Tab. 6 – Součinitele odrazivosti některých kovů

Z tabulky je zřejmé, že u kovů (ocel, nikl, chrom) je absorbováno záření s vlnovou délkou kolem 1 000 nm asi ze 40%, zatímco záření s vlnovou délkou 10 000 nm pouze 5 – 10%. U nekonvenčních materiálů (sklo, křemen, většina plastických hmot) je tomu obráceně. V oblasti viditelného záření jsou téměř propustné, zatímco v oblasti vlnové délky od



2 000 do 10 000 nm stoupne absorpce na 80 – 96%. Plynový $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ je tedy vhodnější použit pro zpracování nekovových materiálů. Může však být použit i pro zpracování kovů vzhledem ke své vyšší účinnosti oproti pevnolátkovým laserům.

Součinitel odrazu není konstantní, mění se s teplotou. U většiny materiálů roste s teplotou i absorpce. Obr. 34 ukazuje možnost zvýšení absorpční schopnosti kovového materiálu. Zmenšení odrazu a zvýšení absorpce je možno dosáhnout při minimálních nákladech nanášením absorpční tenké vrstvy barvy nebo suspenze (grafit, MoS_2).

Obr. 34 – Závislost přímého odrazu a prokalené hloubky na tloušťce nanášené vrstvy

Hodnoty na obr. 34 byly naměřeny při výkonu $P = 500\text{W}$, rychlosti $v = 0,5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro zvýšení absorpce byla použita černá barva na materiálu 12 060. Z křivek je patrné, že

s rostoucí tloušťkou nanesené vrstvy se přímý odraz snižuje – roste absorpce. Současně však klesá hloubka prokalení. Je tedy zřejmé, že nanesená absorpční vrstva spotřebuje značný podíl výkonu laserového záření.

Z tohoto důvodu by tloušťka nanesené vrstvy neměla překročit hranici 10 μm , aby nebyl podstatně ovlivněn výkon laseru.

3.2.2 Vliv tepelných vlastností materiálu

Poddajnost materiálu při působení laserového paprsku klesá se vzrůstem měrného tepla, skupenského tepla tání, teploty tání a varu a tepelné vodivosti. Charakterem závislosti je výrazný především u tepelné vodivosti. Laserem můžeme řezat tehdy, když přivedené teplo ihned odchází a nevede k potřebnému zvýšení teploty. Materiály s velmi malou absorpcí a dobrou tepelnou vodivostí (Au, Ag, Cu, Al a příp. slitiny) se dají řezat laserem obtížně nebo vůbec.

3.2.3 Vliv na odpařování materiálu

Na proces vypařování má největší vliv výstupní výkon laseru. Mezi důležité aspekty interakce materiálu s laserovým zářením ovšem patří další parametry laseru, jako jsou např.: pracovní režim, frekvence pulzů, počet pulzů, šířka pulzu, počet opakování, úhel dopadu, rychlost posuvu laserového svazku.

3.2.4 Vliv chemického složení

Dalším faktorem působícím na poddajnost obráběného materiálu je chemické složení slitiny. Čím vyšší je obsah uhlíku v oceli, tím vyšší je pak účinnost laserového obrábění. Příměsi wolframu a mědi ve slitinách výrazně zmenšují úbytek materiálu při laserovém působení.

3.3 Charakteristika zvolených materiálů

Materiály jednotlivých vzorků byly vybrány tak, aby objektivně zahrnuly celou oblast ocelových materiálů, jak z hlediska různorodosti chemických prvků a sloučenin, tak tepelného zpracování a oblastí použití.

Ocel podle ČSN		ČSN EN 10027 - 2	
		Značka	Číselné označení
Konstrukční oceli	11 600	E335	1.0060
	12 060.1	C55E	1.1219
	14 109.3	100Cr6	1.3505
Nástrojová ocel	19 824.1	HS 18-0-1	1.3355

Tab. 7 – Zvolené materiály vzorků v českém a evropském značení ocelí

3.3.1 Konstrukční ocel 11 600 (EN 1.0060)

Neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti s vyšším obsahem uhlíku. Vhodná na strojní součásti namáhané staticky i dynamicky, u nichž se nevyžaduje svařitelnost. Součásti vystavené velkému měrnému tlaku. Hřídele, osy, ozubená kola, řetězová kola, páky, čepy, pístnice, kolíky, podpěry, držátka, objímky, šrouby a matice, klíny, pera, kluzné kameny, ozubené hřebeny, kladky, spojky, segmenty a vložky axiálních ložisek, distanční kroužky, různé upínací elementy, tělesa fréz apod. Pásky a pruhy ke tvarování ohybem. [22]

Tepelné zpracování	Teplota [°C]
Kování	800 - 1 100
Normalizační žihání	850 - 870
Žihání na měkko	680 - 720
Kalení do vody	830 - 860
Kalení do oleje	840 - 870
Popouštění	560 - 670

Prvek	Chemická značka	Maximální rozpustnost [%]
Uhlík	C	0,550
Fosfor	P	0,055
Síra	S	0,050
Pevnost v tahu R_m [Mpa]	590 - 705	
Mez kluzu Re [MPa]	295 - 340	

Tab. 8 – Materiálové hodnoty oceli 11 600 [22], [9]

3.3.2 Konstrukční ocel 12 060 (EN 1.1219)

Konstrukční ocel nelegovaná, jakostní k zušlechťování. Uklidněná ocel vhodná na hřídele turbokompresorů, karuselů, zalomené a jiné hřídele, ozubená kola a věnce, plunžry lisů, pístnice, vřetena, čepy, lamely, spojky, pojistky, západky, držáky, šrouby, páky, destičky abnormálních řetězů, různé spojovací součásti apod. Pružiny, konstrukční elementy lisovacího nářadí. Na méně namáhané hřídele silničních vozidel. Na součásti strojů, které mají vzdorovat opotřebení (ozubené věnce, vřetena vrtaček). Svařitelnost obtížná. [23]

Tepelné zpracování	Teplota [°C]
Kování	800 – 1 100
Normalizační žíhání	810 - 840
Žíhání na měkko	680 - 720
Kalení do vody	790 - 830
Kalení do oleje	800 - 840
Popouštění	530 - 670

ab.
9 –
Ma-
te-
riá-
lové
hod

noty oceli 12 060 [23], [9]

3.3.3 Konstrukční ocel 14 109.3 (EN 1.3505)

Prvek	Chemická značka	Rozpustnost [%]
Uhlík	C	0,52 - 0,60
Mangan	Mn	0,50 – 0,80
Křemík	Si	0,17 - 0,37
Chrom	Cr	0,25
Nik, měď	Ni, Cu	0,30
Fosfor, síra	P, S	Max. 0,04
Pevnost v tahu Rm [Mpa]	600 - 850	
Mez kluzu Re [MPa]	345 - 380	

Tyto oceli jsou legovány chromem, případně chromem a manganem či křemíkem a hliníkem. Jsou to nejvíce používané slitinové oceli, které umožňují dosáhnout velmi dobrých vlastností bez použití nedostatkových prvků. Obvykle se cementují, zušlechťují, kalí. Ocel 14 109.3 je chromová ocel, která se nejčastěji používá k výrobě valivých ložisek. Jsou kladeny vysoké požadavky na mikročistotu materiálu.

Tepelné zpracování	Teplota [°C]
--------------------	--------------

Kování	850 – 1 050
Žihání na měkko	720 - 780
Kalení do vody	790 - 820
Kalení do oleje	820 - 840
Popouštění	120 - 170

Tab. 10 – Materiálové hodnoty oceli 14 109.3 [23], [9]

3.3.4 Nástrojová ocel 19 824.1 (EN 1.3355)

Rychlořezná ocel pro běžné použití se zvýšenou houževnatostí, ale zhoršenou tvárností za tepla. Používá se na nástroje pro obrábění materiálu s nižší a střední pevností, zejména nástroje s jemnými břity vyžadující zvlášť dobrou houževnatost např. závitové a profilové frézy, vrtáky, závitníky, strojní výstružníky, obrážecí nože na ozubení, nástroje pro obrábění dřeva apod. Ocel je vhodná k povlakování například nitridem titanu.

Tepelné zpracování	Teplota [°C]
Kování	850 – 1 050
Žihání na měkko	720 - 780
Kalení do vody	790 - 820
Kalení do oleje	820 - 840
Popouštění	120 - 170

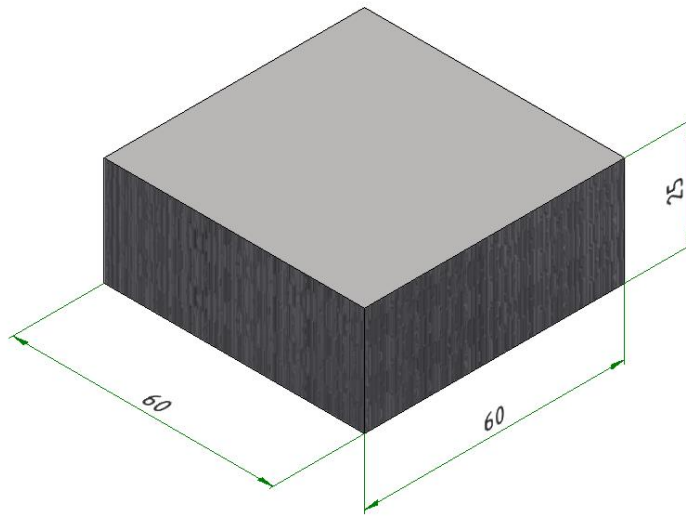
Prvek	Chemická značka	Rozpustnost [%]
Uhlík	C	0,90 - 0,10
Mangan	Mn	0,30 – 0,50
Křemík	Si	0,15 - 0,35
Chrom	Cr	1,30 – 1,65
Nik, měď	Ni, Cu	0,25 - 0,30

Prvek	Chemická značka	Rozpustnost [%]
Uhlík	C	0,70 - 0,80
Mangan	Mn	0,45
Křemík	Si	0,45
Chrom	Cr	3,38 – 4,60
Fosfor, Síra	P, S	Max. 0,05
Wolfram	W	17,00 – 19,00
Molybden	Mo	Max. 0,50
Vanad	V	1,00 - 1,60

Tab. 11 – Materiálové hodnoty konstrukční oceli 19 824.1 [24], [9]

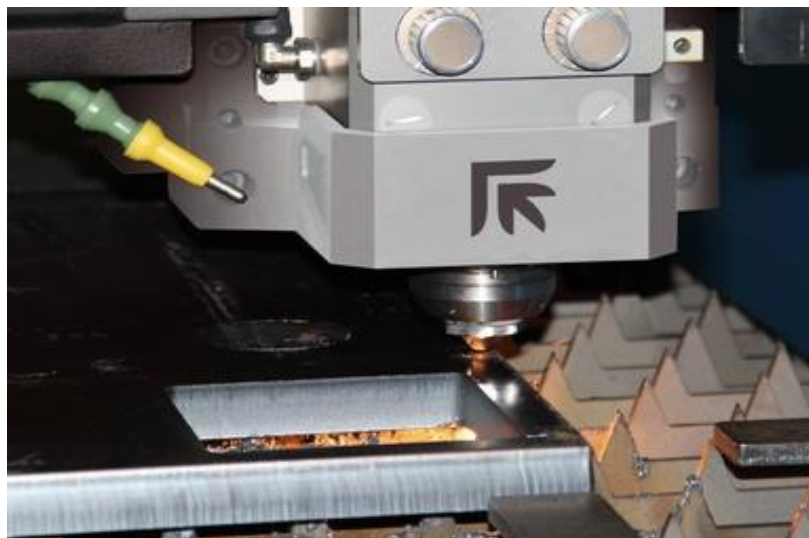
3.4 Konstrukce a tvar experimentálních vzorků

Pro experimentální řezání, za účelem získání obrobenej plochy, byly použity vzorky ve tvaru kvádrů, do nichž se postupně vypalovaly drážky pomocí laserového záření. Na základě účelného měnění vstupních parametrů výkonu (P) a rychlosti (v) se do jednotlivých materiálů popsaných v kapitole 3.2 vypálila síť drážek, která byla základem pro následné měření.

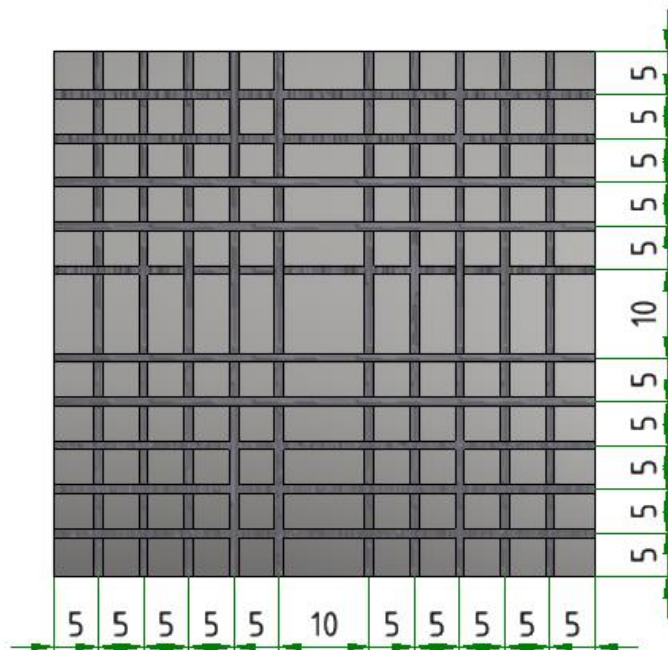


Obr. 35 – Polotovár pro experimentální obrábění

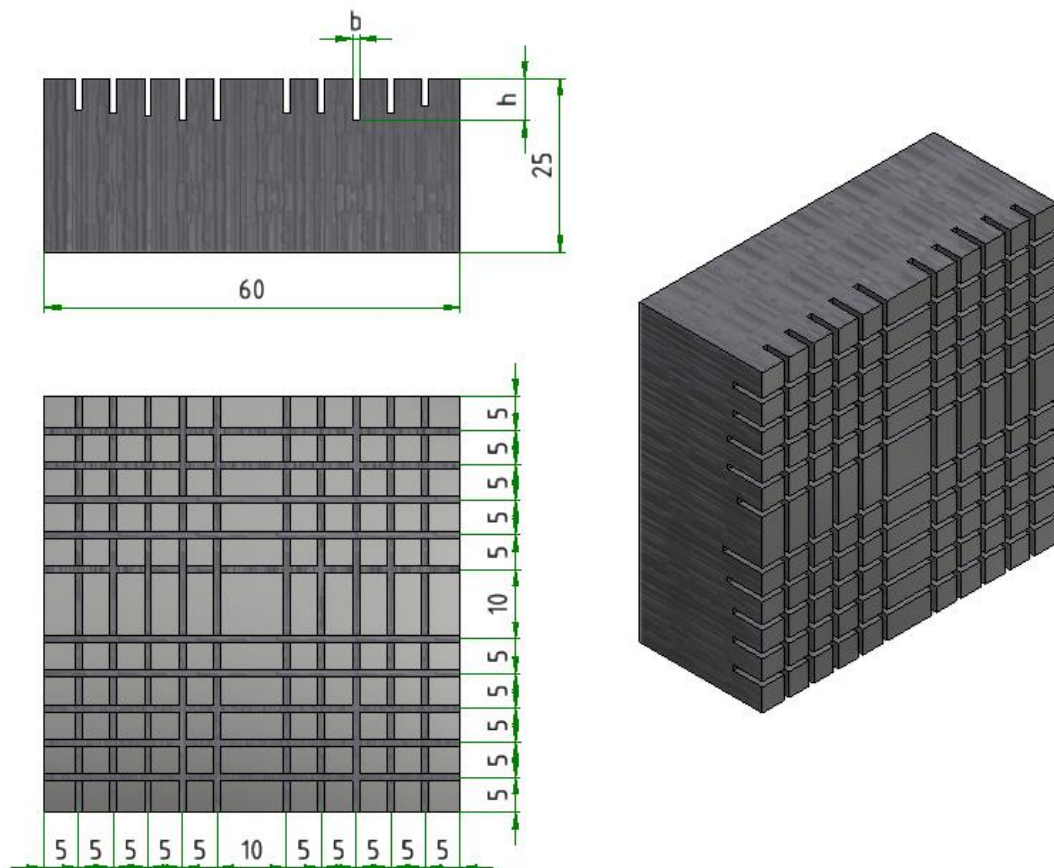
Zkušební vzorky měly základní rozměr 60 x 25 x 60 (A x B x C) viz. obr. 35. Vzdálenosti jednotlivých drážek byly zvoleny 5mm a mezera mezi jednotlivými sekcemi byla 10mm. Laserovému řezání byly podrobeny vzorky materiálů 11 600, 12 060.1, 14 109.3 a 19 824.1.



Obr. 36 – Výroba polotovaru



Obr. 37 – Rozmístění jednotlivých drážek na materiálu

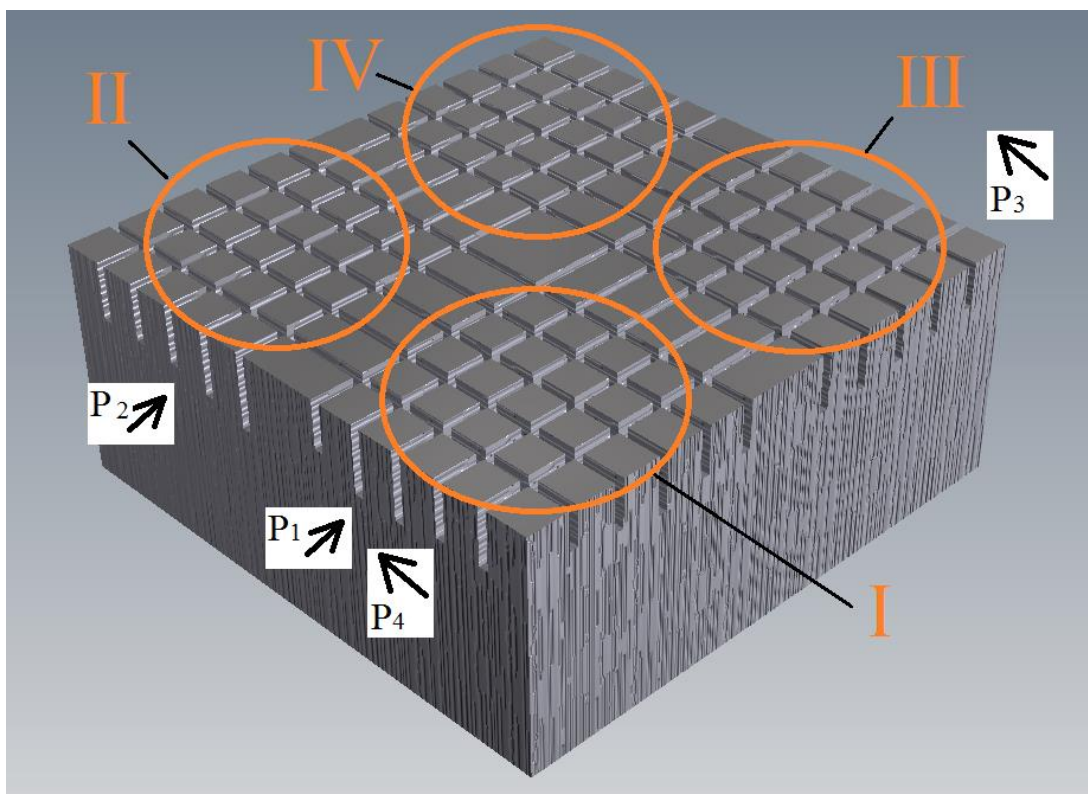


Obr. 38 – Kompletní náhled na hotový vzorek

3.5 Popis průběhu řezání drážek

Vzorky byly v řadě za sebou upnuty na stůl laserového centra tak, aby lícovaly. Do paměti stroje se nahrál program pro pohyb řezné hlavy. Zkouška začínala maximálním výkonem P_4 a maximální rychlostí v_6 . Jakmile se provedl řez všemi čtyřmi materiály, změnila se rychlost řezné hlavy na hodnotu v_5 , hlava se posunula o 5mm a provedl se druhý řez. Po dokončení všech pěti řezů s výkonem P_4 a rozdílnými rychlostmi se změnil výkon na hodnotu P_3 a stejně jako u předchozích řezů vzniklo 6 drážek o různých rychlostech v horní části vzorku.

Po dokončení drážek zářením o výkonu P_3 se vzorky na upínacím stole pootočily o 90° a tím samým postupem se vytvořily drážky výkony laseru P_2 a P_1 .



Obr. 39 – Kompletní náhled na hotový vzorek

Rozdělení do sekcí I, II, III a IV bylo bezprostředně po dokončení řezů velmi důležité, aby při následném měření nedošlo k záměně vyhodnocovaných ploch a tím ke zkreslení výsledků měření.

3.6 Volba řezných parametrů

Na základě teoretických předpokladů a praktických zkušeností byly zvoleny následující parametry:

Rychlost hlavy v (m/min)		Výkon P (W)
$v_1 = 0,05$	$v_4 = 0,20$	$P_1 = 200$
$v_2 = 0,10$	$v_5 = 0,30$	$P_2 = 250$
$v_3 = 0,15$	$v_6 = 0,40$	$P_3 = 290$
		$P_4 = 335$

Tab. 12 – Zvolené řezné parametry

Při volbě parametrů rychlostí a hlavně výkonů se muselo brát v potaz velký dostupný výkon stroje, který je až 5000 W. Pro naše účely jsme potřebovali daleko menší výkon. Provedly se tedy testovací řezy o různých výkonech a na základě toho se následně stanovilo rozmezí, ve kterém se zvolily výkony P_1 až P_4 . I přesto se však nepodařilo získat přesvědčivé hodnoty u výkonu P_1 , a proto s tímto výkonem nebylo dále počítáno.

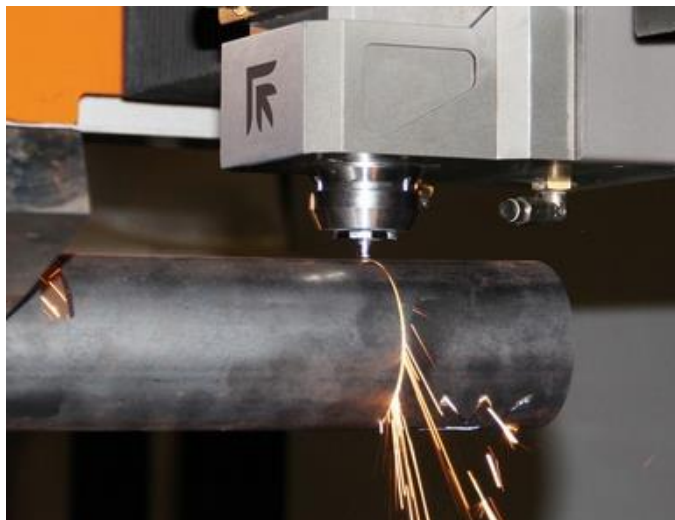
3.7 Strojní zařízení

Experimentální řezání drážek vzorků bylo provedeno na laserovém stroji Platino 1530. Platino je univerzální 2D laserový řezací stroj od společnosti Prima Power využíván po celém světě v celé řadě aplikací, výrobních požadavků a rozpočtů. Tento stroj řeže širokou škálu materiálů a tloušťek s rychlostí a precizností bez nutnosti ručního nastavení. Díky široké škále automatizačních modulů je tento stroj ideálním řešením jak pro malé série, tak pro výrobu velkých rozměrů.



Obr. 40 – Laserové centrum Platino 1530

Platino 1530 je multifunkční centrum, které je primárně uzpůsobeno pro řezání plechů. Další funkcí je také řezání trubek a dutých profilů z ocelových materiálů.



Obr. 41 – Laserové řezání trubky na stroji platino 1530

3.7.1 Hlavní znaky stroje Platino 1530

- Kompaktní design pro minimální prostor a snadnou přepravu a instalaci
- Syntetický žulový rám pro dobrou tepelnou stabilitu a tlumení vibrací
- Maximální přístupnost ke stroji
- CO₂ laser až do výkonu 5 000 W, široká škála tloušťky materiálů od 0,5 až do 25 mm a nejlepší účinností CO₂ laseru
- Zaměřovací hlavice vybavená různými čočkami (5“; 7,5“ nebo 9“), podle potřeb výroby
- Lineární motory pro vyšší rychlost
- Volitelná dálková konzole pro užívání stroje za pohybu osy y
- Zásobníkový systém pro rychlou výrobu čoček a volitelný automatický výměník trysky
- Jedna čočka – všechny profily a tloušťky lze řezat bez ručního zásahu
- F – osa pro ovládání ústřední pozice nezávisle na Z – ose

- SIPS (systém ochrany bezpečného nárazu), chrání hlavici stroje v případě nárazu s díly nebo příslušenstvím
- Snadno použitelný a ergonomický 30L CNC dotykový display s 17“ LCD displayem, kulový ovladač
- Natáčení os pro zpracování trubek a profilů
- Široký rozsah modulů pro automatizaci manipulace materiálu a skladování
- Rozsah pracovních pohybů – osa x 3 048 mm, osa y 1 524 mm, osa z 150 mm
- Osová rychlost 100 m/min (kombinace 140 m/min)



Obr. 42 – Laserové řezání plechu na stroji Platino 1530

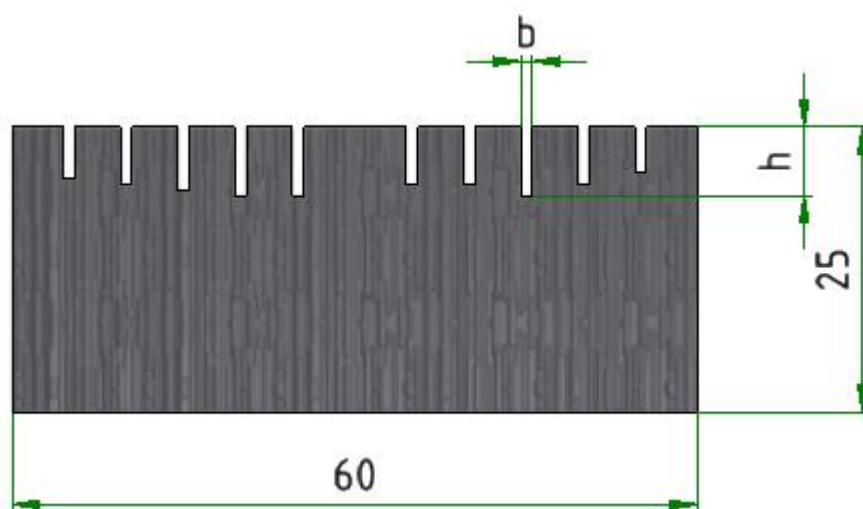
3.8 Měření hloubky a šířky drážek

Hloubky a šířky drážek vzniklé po laserovém řezání byly měřeny na optickém mikroskopu ZEISS 2772 se zvětšením 177 x. Mikroskop obsahuje metrický šroub umožňující posuv v osách x a y s rozlišením 10 μ m (odhadem na 1 μ m).

Postupně byly měřeny hloubky i šířky drážek u vzorku 11 600 pro jednotlivé kombinace parametrů použitých při laserovém řezání. Okraje zkušebního vzorku bylo před samotným měřením nutno začistit broušením. Vzorek byl jednotlivě upevněn do přípravku ve vodorovné poloze. Optika mikroskopu se zaměřila na hranu měřeného tělesa a došlo k odečtení samotné hloubky drážky. Hloubka drážky byla změřena pomocí mikrometrického posuvu, který je součástí stolu mikroskopu. Každá drážka byla měřena pětikrát z důvodu minimalizace chyby měření. Tímto způsobem se postupovalo u všech drážek na

všech použitých výkonů a rychlostí. Identickým způsobem se měřily i šířky. V tabulkách naměřených hodnot je hodnota hloubky drážky (h) a hodnota šířky drážky (b) prezentována pouze aritmetickým průměrem, který byl vytvořen ze zmíněných pěti měření.

3.8.1 Hloubky a šířky drážek materiálu 11 600



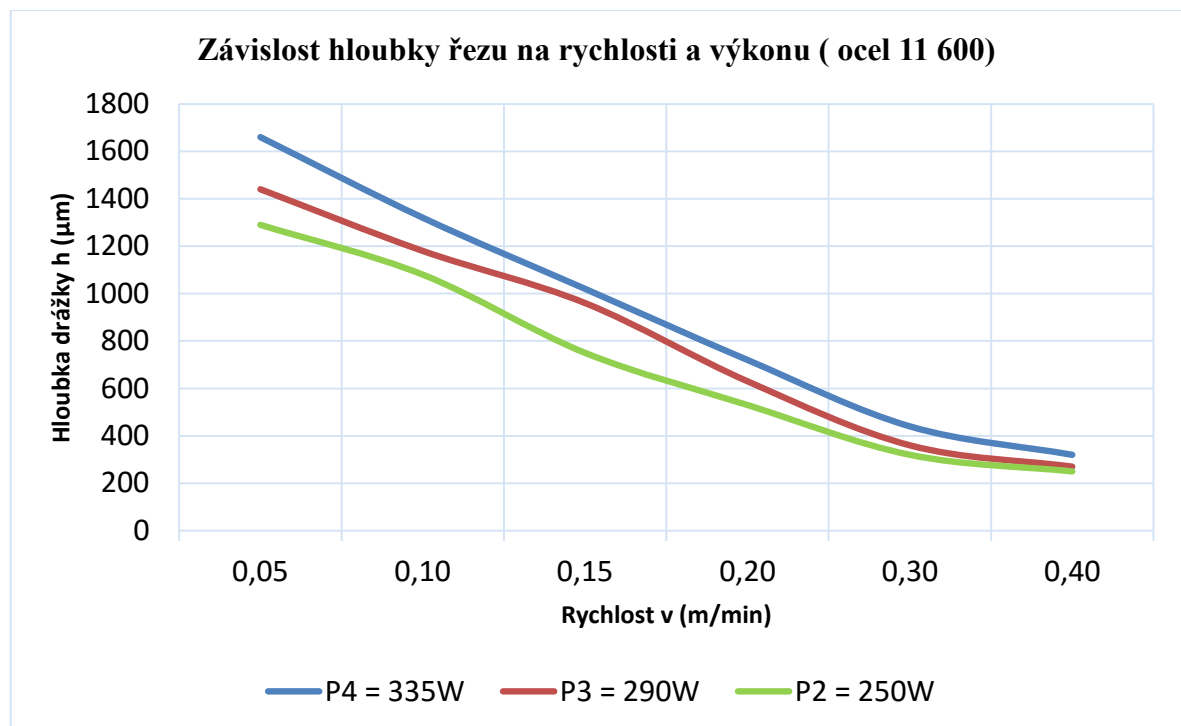
Obr. 43 – Znázornění hloubky a šířky drážek

Výkon P (W)	Aritmetický průměr	Rychlost v (m/min)						
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	
$P_4 = 335$	\bar{x}_4	1660	1320	1020	720	440	320	Hloubka drážky h (μm)
$P_3 = 290$	\bar{x}_3	1440	1180	960	630	360	270	
$P_2 = 250$	\bar{x}_2	1290	1080	750	530	320	250	
$P_4 = 335$	\bar{x}_4	1120	1100	1080	1000	900	870	Šířka drážky b (μm)
$P_3 = 290$	\bar{x}_3	1120	1050	980	920	900	900	
$P_2 = 250$	\bar{x}_2	1100	1080	990	950	920	920	

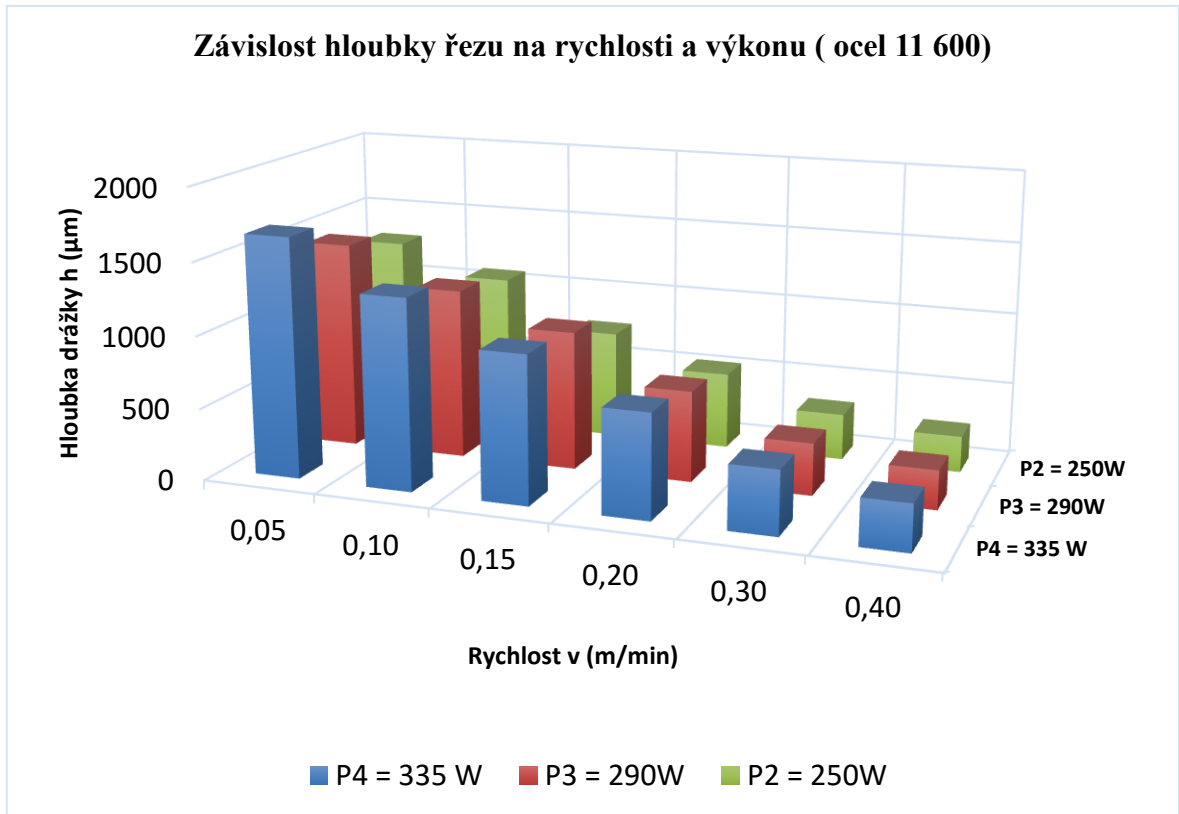
Tab. 13 – Aritmetické průměry hloubky a šířky drážek v závislosti na výkonu a rychlosti materiálu 11600

Pro větší přehlednost naměřených hodnot byly sestaveny grafy. První graf zobrazuje závislosti hloubky drážky na rychlosti a výkonu obr. 44, další graf (obr. 45) je z těch samých hodnot vyneseno do prostorového grafu pro lepší představivost. Druhé dva grafy jsou

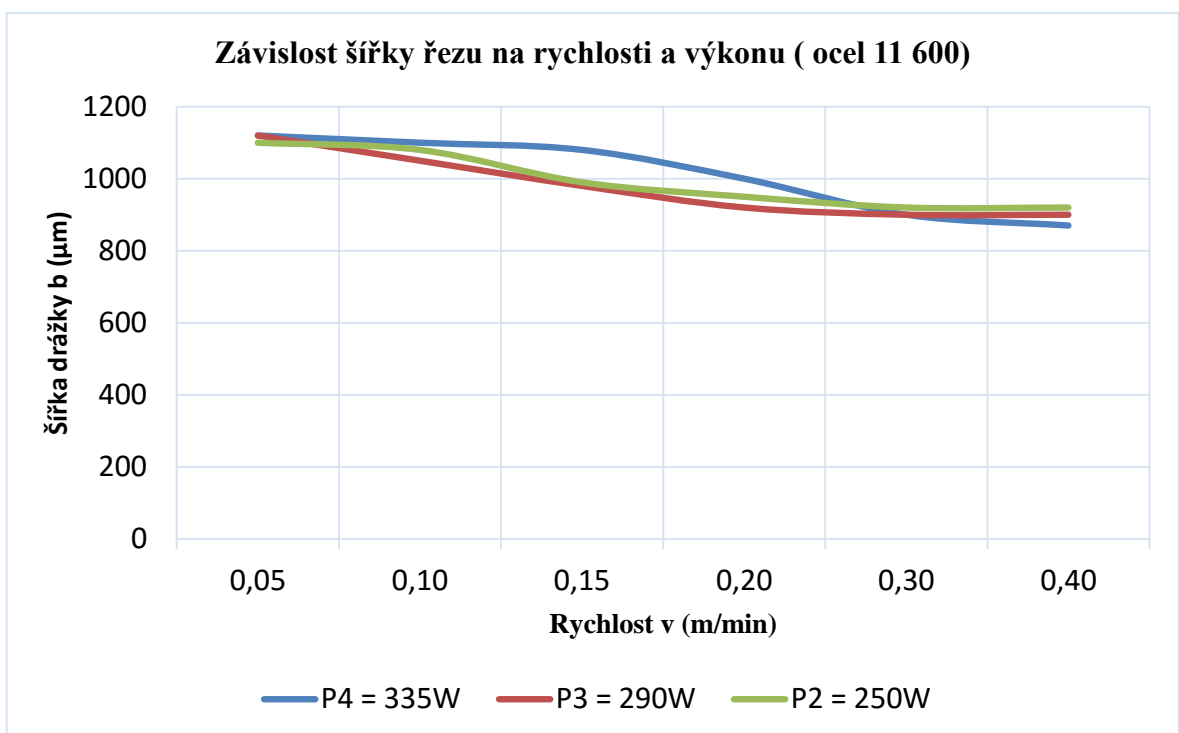
tím samým způsobem sestrojeny na obr. 46 a 47. Vykazují závislost šířky drážky na rychlosti a výkonu.



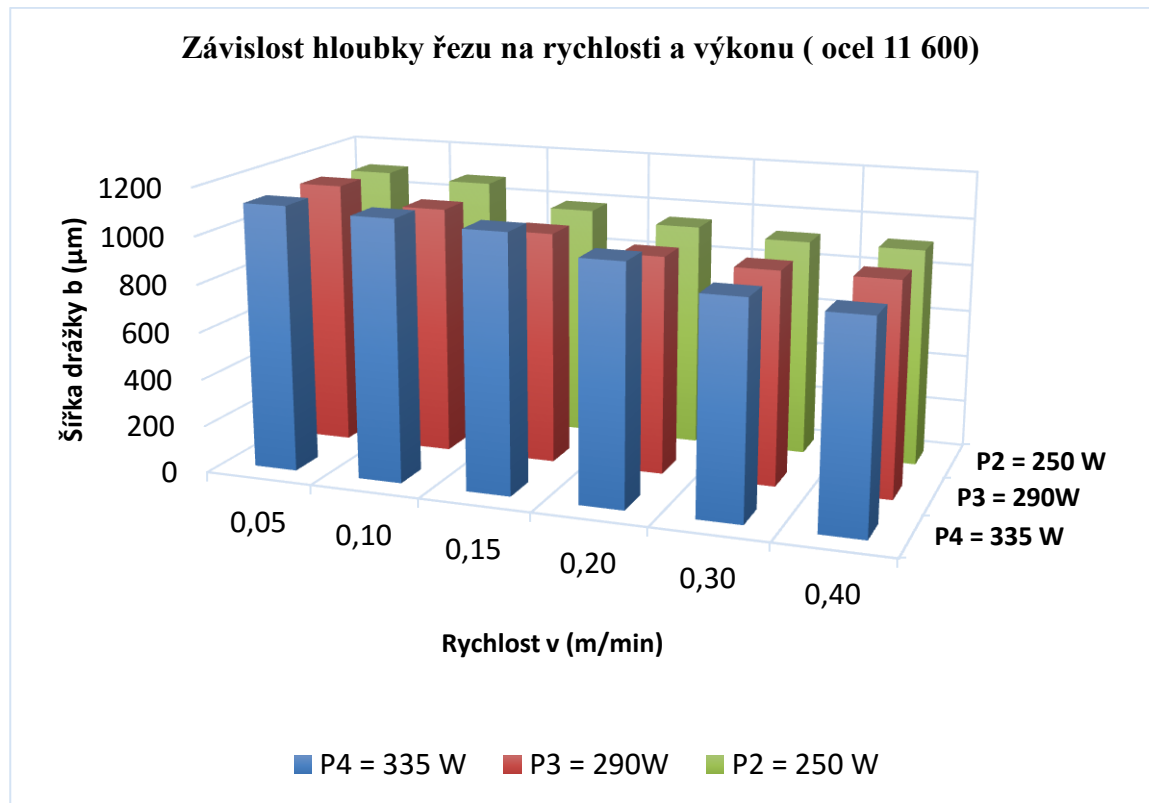
Obr. 44 – Graf závislosti hloubky řezu h na rychlosti v a výkonu P pro ocel 11 600



Obr. 45 – Prostorový graf zobrazující závislosti hloubky řezu h na rychlosti v a výkonu P pro ocel 11 600



Obr. 46 – Graf závislosti šířky řezu b na rychlosti v a výkonu P pro ocel 11 600



Obr. 47 – Prostorový graf zobrazující závislosti šířky řezu b na rychlosti v a výkonu P pro ocel 11 600

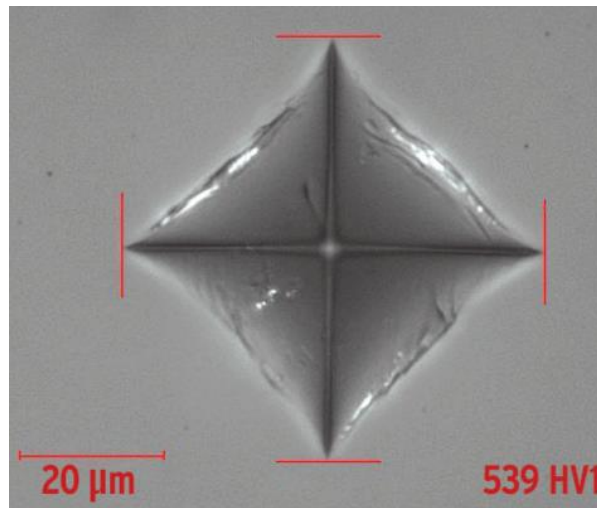
3.9 Měření tloušťky a tvrdosti tepelně ovlivněné vrstvy

Měření se provádělo na bočních plochách vzorků. Tyto plochy byly již dříve obroušeny, pro měření hloubky a šířky drážek. Pro měření tvrdosti se plochy ještě vyleštily. Tloušťka ovlivněné vrstvy byla měřena na fotomikroskopem NEOPHOT (Zeiss, JENA).

Tvrdot ovlivněné vrstvy byla měřena pomocí mikrotvrdoměru na mikroskopu NEOPHOT metodou „HANEMANN“. K měření vzdálenosti vpichů mikrotvrdoměru od hrany drážky bylo použito mikroskopu s křížovým stolem se setinovým odečítáním (Zeiss, JENA).

Pro zjištění tloušťky tepelně ovlivněné vrstvy bylo nutno stanovit tvrdost základního materiálu (tepelně neovlivněného). Tvrdot byla stejně jako vlastní měření ovlivněné vrstvy měřena mikrotvrdoměrem metodou „HANEMANN“ (čtyřboký diamantový hrot, 136°). Mikrotvrdoměr byl cejchován pro všechny ocelové materiály pro zatížení 100g. Výsledná tvrdost základního materiálu byla stanovena jako aritmetický průměr z deseti hodnot měření:

Materiál	Tvrдост základního materiálu
11 600	195 HV1
12 060.1	224 HV1
14109.3	211 HV1
19 824.1	273 HV1



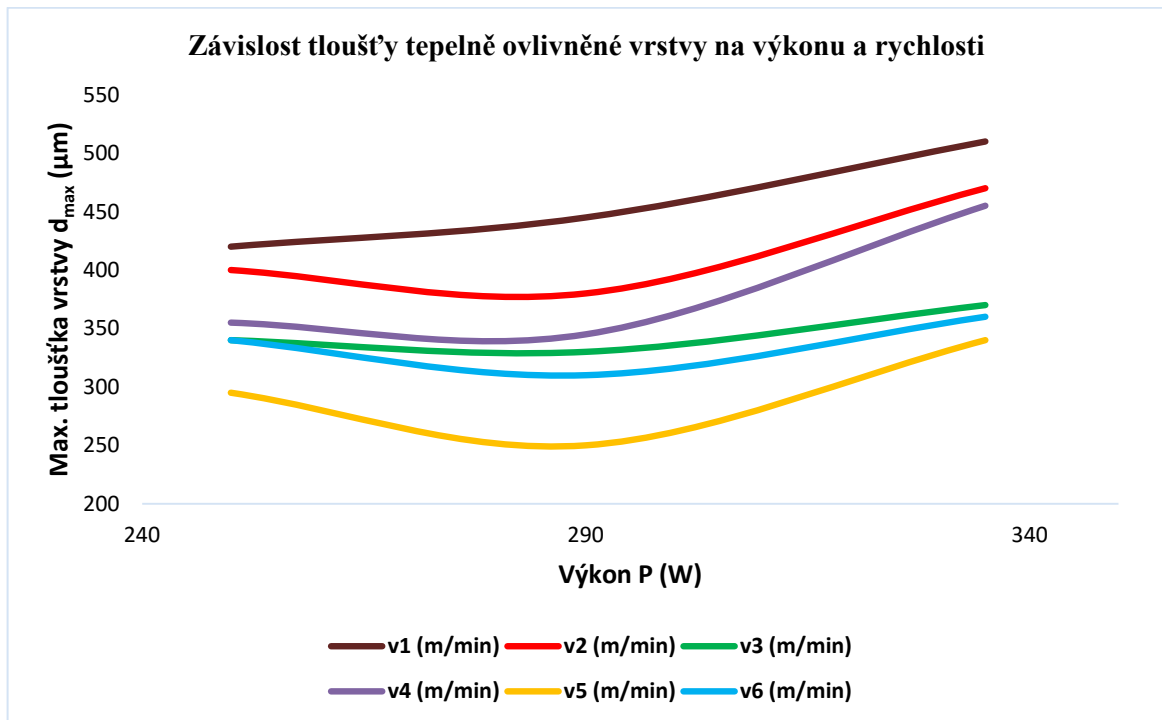
Obr. 48 – Snímek z měření mikrotvrđosti tepelně ovlivněné vrstvy

3.9.1 Naměřené hodnoty pro materiál 11 600

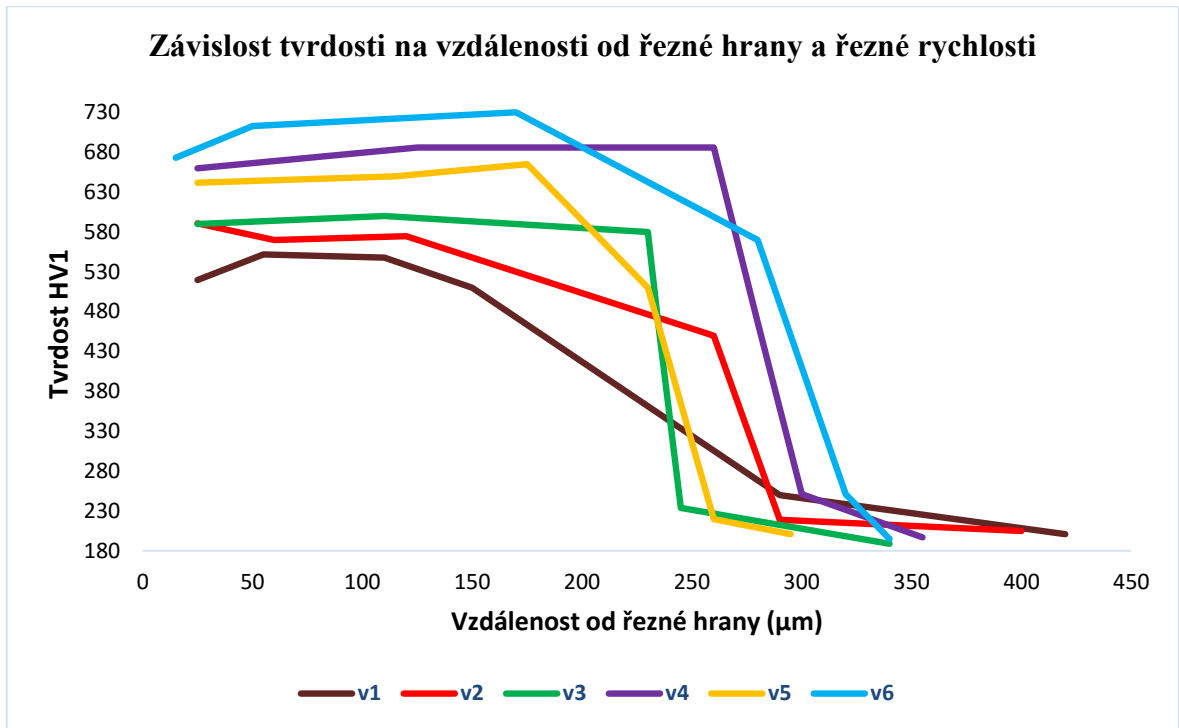
Výkon P (W)	Měřená veličina	Rychlost řezání v (m/min)					
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40
P₄ 335	Tvrđost HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	520 / 25	591 / 25	590 / 25	660 / 25	642 / 15	673 / 15
		552 / 55	570 / 60	600 / 110	686 / 125	650 / 115	713 / 50
		548 / 110	575 / 120	580 / 230	686 / 260	665 / 175	730 / 170
		510 / 150	450 / 260	460 / 235	467 / 280	510 / 230	570 / 280
		250 / 290	219 / 290	234 / 245	251 / 300	220 / 260	251 / 320
		201 / 420	205 / 400	189 / 340	197 / 355	201 / 295	195 / 340
	Max. Tloušťka d_{max.} (μm)	420	400	340	355	295	340
Max. tvrđost HV1	552	591	600	686	665	730	
P₃ 290	Tvrđost HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d	460 / 15	570 / 15	498 / 10	515 / 15	498 / 20	452 / 25
		591 / 50	660 / 50	591 / 120	624 / 115	636 / 135	552 / 145

	(μm)	460 / 235	636 / 220	420 / 255	551 / 195	591 / 150	425 / 265
		297 / 360	389 / 335	310 / 280	348 / 205	419 / 185	276 / 275
		239 / 400	239 / 355	212 / 325	209 / 225	224 / 215	214 / 300
		187 / 445	205 / 380	193 / 330	186 / 345	187 / 250	185 / 310
	Max. Tloušťka d_{max} (μm)	445	380	330	345	250	310
Max. tvrdost HV1	591	660	591	624	636	552	
P₂ 250	Tvrdość HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	713 / 15	613 / 15	608 / 20	660 / 15	532 / 25	636 / 15
		660 / 50	636 / 45	660 / 55	673 / 50	652 / 60	686 / 45
		702 / 120	636 / 125	648 / 150	636 / 235	613 / 250	580 / 100
		636 / 250	389 / 260	467 / 305	321 / 365	452 / 255	420 / 275
		269 / 390	239 / 410	218 / 335	219 / 425	297 / 305	225 / 310
		201 / 510	205 / 470	201 / 370	197 / 455	197 / 340	199 / 360
	Max. Tloušťka d_{max} (μm)	510	470	370	455	340	360
Max. tvrdost HV1	713	636	648	673	652	686	

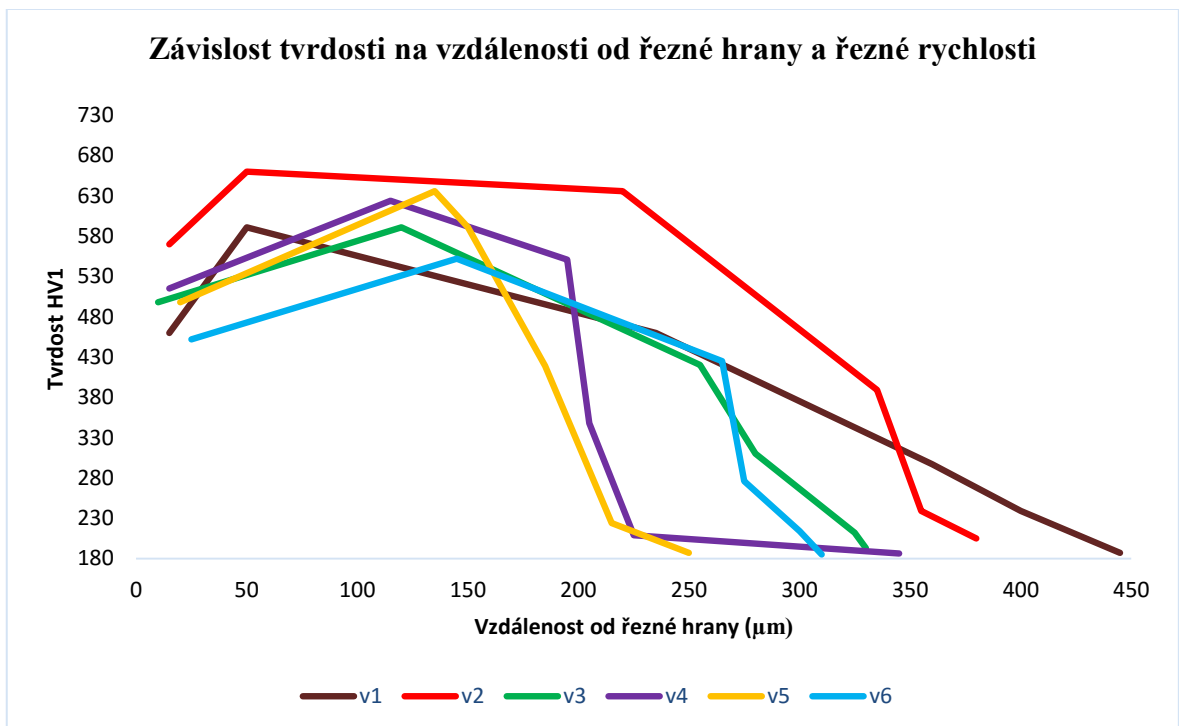
Tab. 14 – Naměřené hodnoty tvrdosti HV1 ve vzdálenosti d od řezné hrany materiálu při rychlosti řezání v pro materiál 11 600



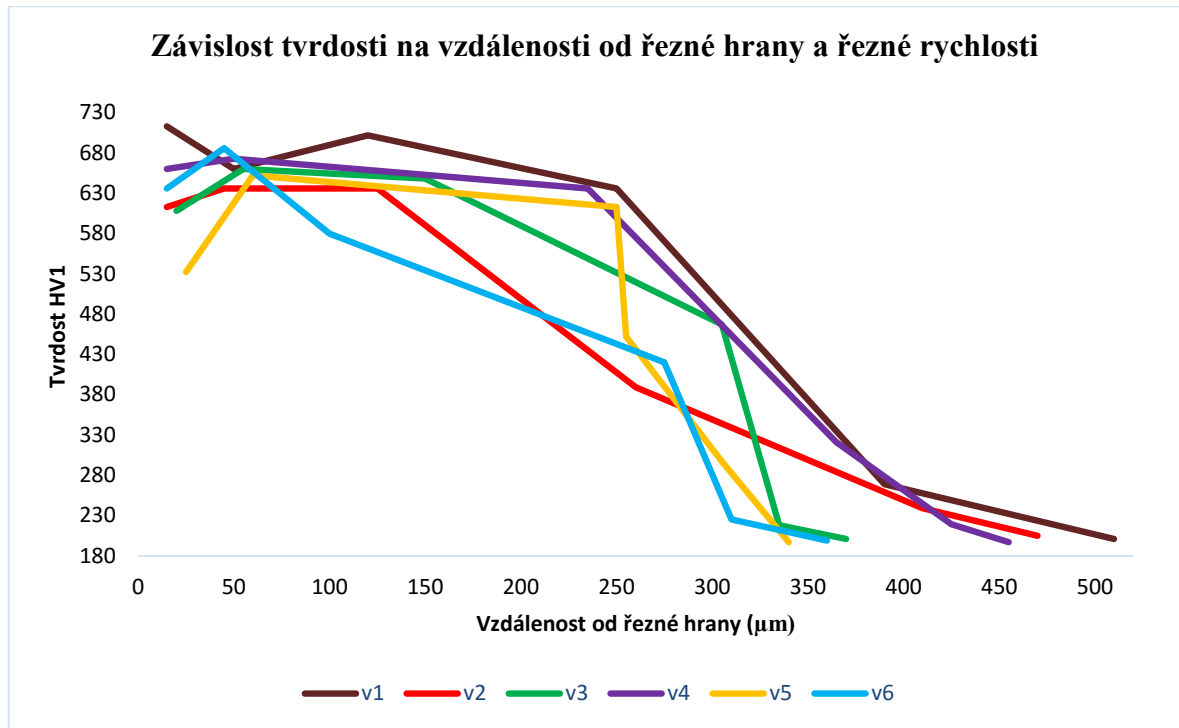
Obr. 49 – Graf závislosti maximální tepelně ovlivněné vrstvy d_{max} na výkonu řezání P a rychlosti v



Obr. 50 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_4 = 335W$



Obr. 51 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_3 = 290W$



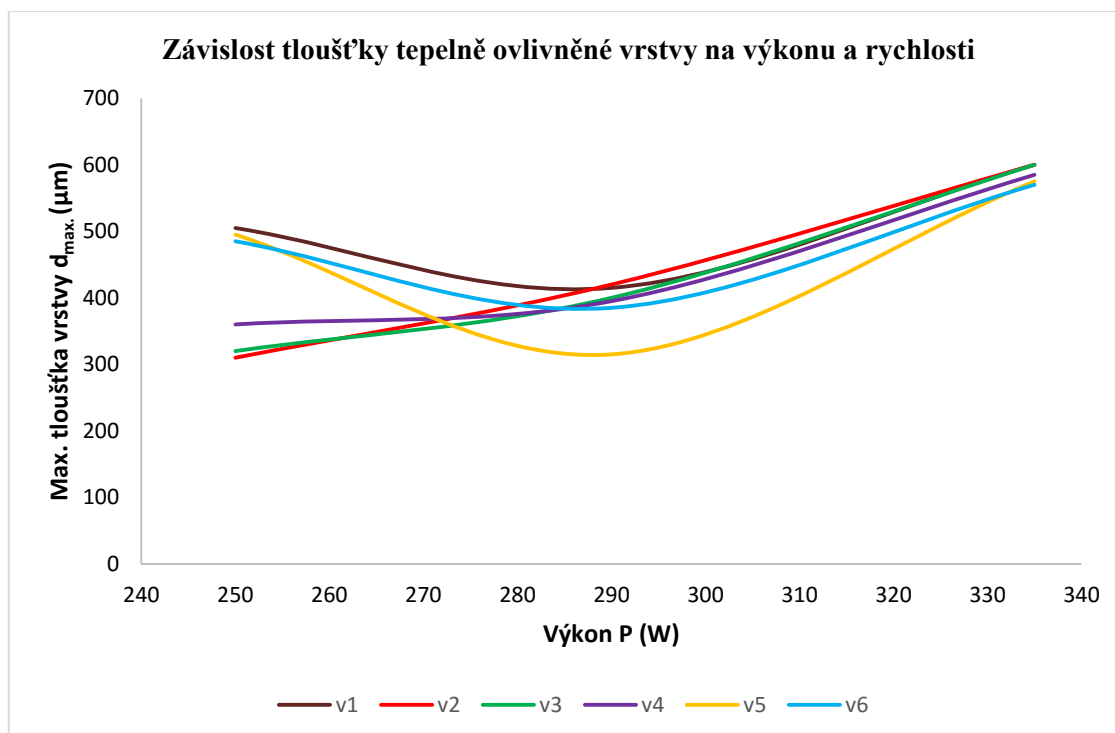
Obr. 52 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_2 = 250W$

3.9.2 Naměřené hodnoty pro materiál 12 060.1

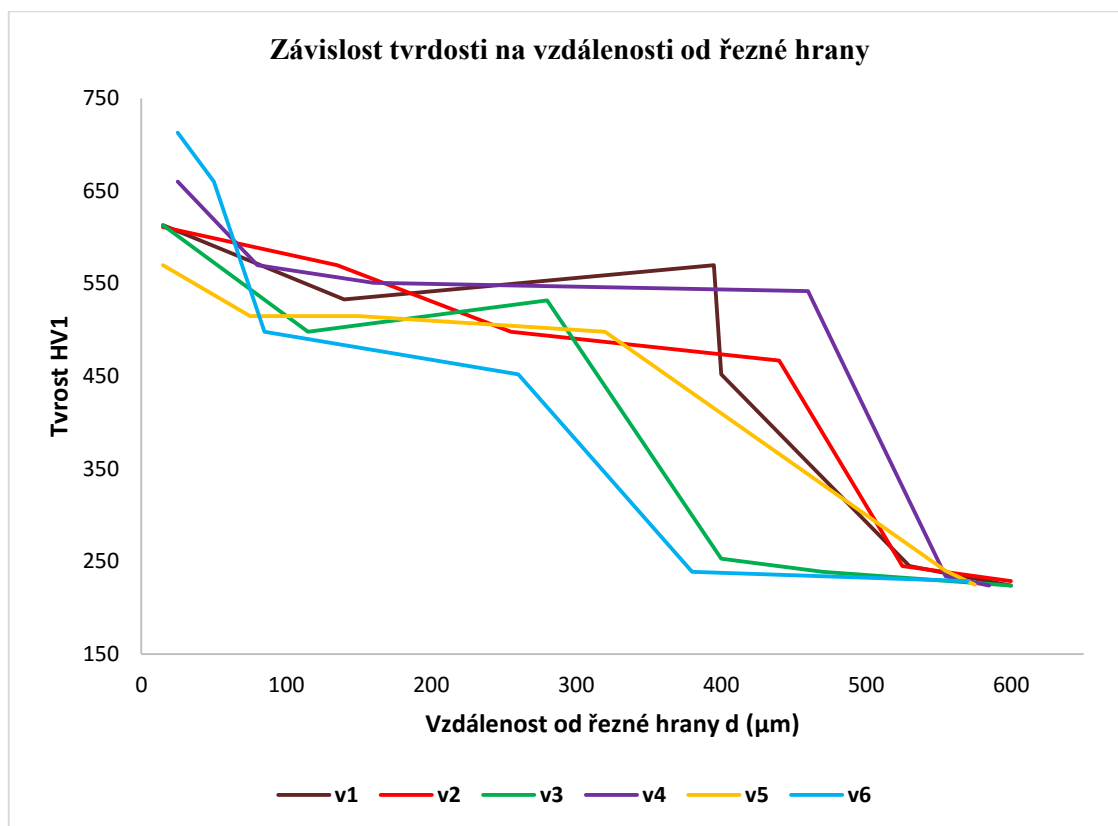
Výkon P (W)	Měřená veličina	Rychlost řezání v (m/min)					
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40
P₄ 335	Tvrdost HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	613 / 15	611 / 15	613 / 15	660 / 25	570 / 15	713 / 25
		533 / 140	570 / 135	498 / 115	570 / 80	515 / 75	660 / 50
		570 / 395	498 / 255	532 / 280	551 / 160	515 / 150	498 / 85
		452 / 400	467 / 440	253 / 400	542 / 460	498 / 320	452 / 260
		245 / 530	245 / 525	239 / 470	234 / 555	240 / 555	239 / 380
		224 / 600	229 / 600	224 / 585	224 / 585	225 / 575	229 / 570
	Max. Tloušťka d_{max} (μm)	600	600	585	585	575	570
Max. tvrdost HV	613	611	613	660	570	713	
P₃	Tvrdost HV 1 /	613 / 15	613 / 15	591 / 10	609 / 15	532 / 15	624 / 15

290	Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	660 / 115	660 / 95	570 / 100	686 / 75	515 / 70	648 / 50
		686 / 220	570 / 290	613 / 350	660 / 180	613 / 245	605 / 130
		413 / 360	305 / 380	348 / 365	613 / 270	515 / 260	624 / 190
		250 / 395	245 / 390	256 / 380	282 / 385	259 / 265	262 / 360
		219 / 415	229 / 420	229 / 400	232 / 395	231 / 315	226 / 385
	Max. Tloušťka d_{max} (μm)	415	420	400	395	315	385
Max. tvrdost HV	686	660	613	686	613	624	
P₂ 250	Tvrdost HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	551 / 15	532 / 15	561 / 20	648 / 15	713 / 20	772 / 20
		560 / 95	532 / 100	581 / 100	591 / 100	742 / 90	742 / 90
		498 / 325	515 / 235	613 / 260	358 / 220	742 / 315	742 / 195
		297 / 385	317 / 270	460 / 275	251 / 245	325 / 360	542 / 360
		239 / 460	245 / 300	234 / 295	239 / 285	262 / 450	251 / 400
		229 / 505	219 / 310	219 / 320	234 / 360	224 / 495	224 / 485
	Max. Tloušťka d_{max} (μm)	505	310	320	360	495	485
Max. tvrdost HV	560	532	613	648	742	742	

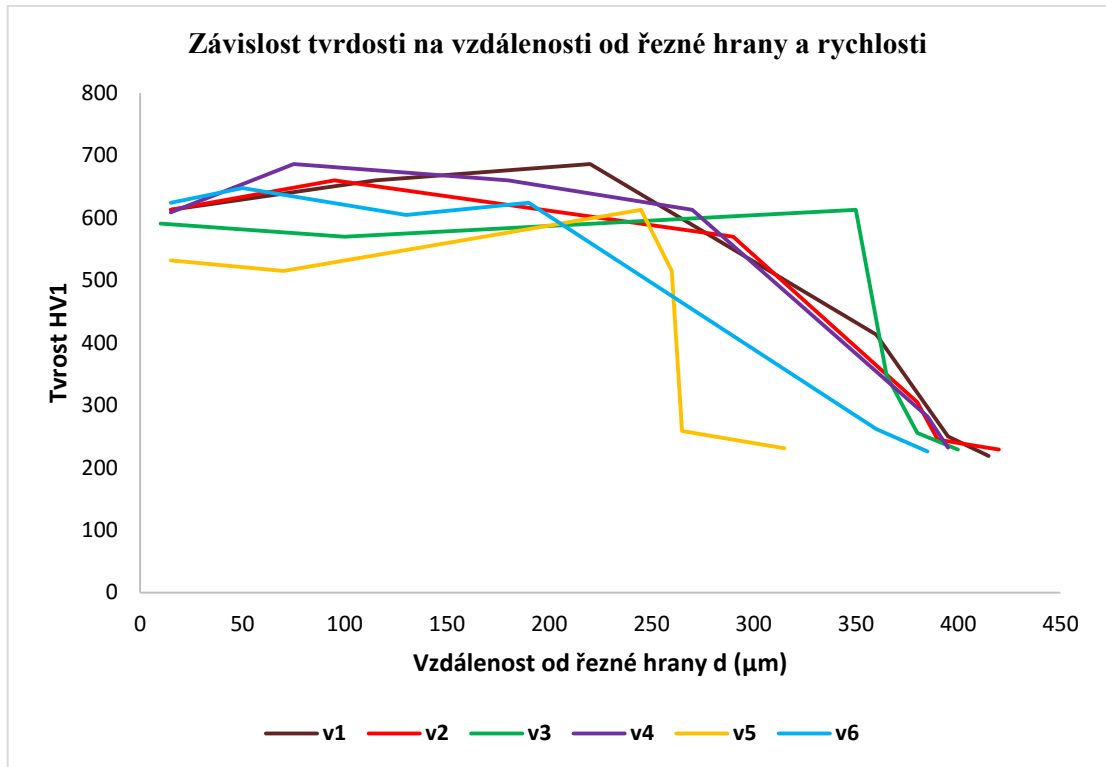
Tab. 15 – Naměřené hodnoty tvrdosti HV_1 ve vzdálenosti d od řezné hrany materiálu při rychlosti řezání v pro materiál 12 060.1



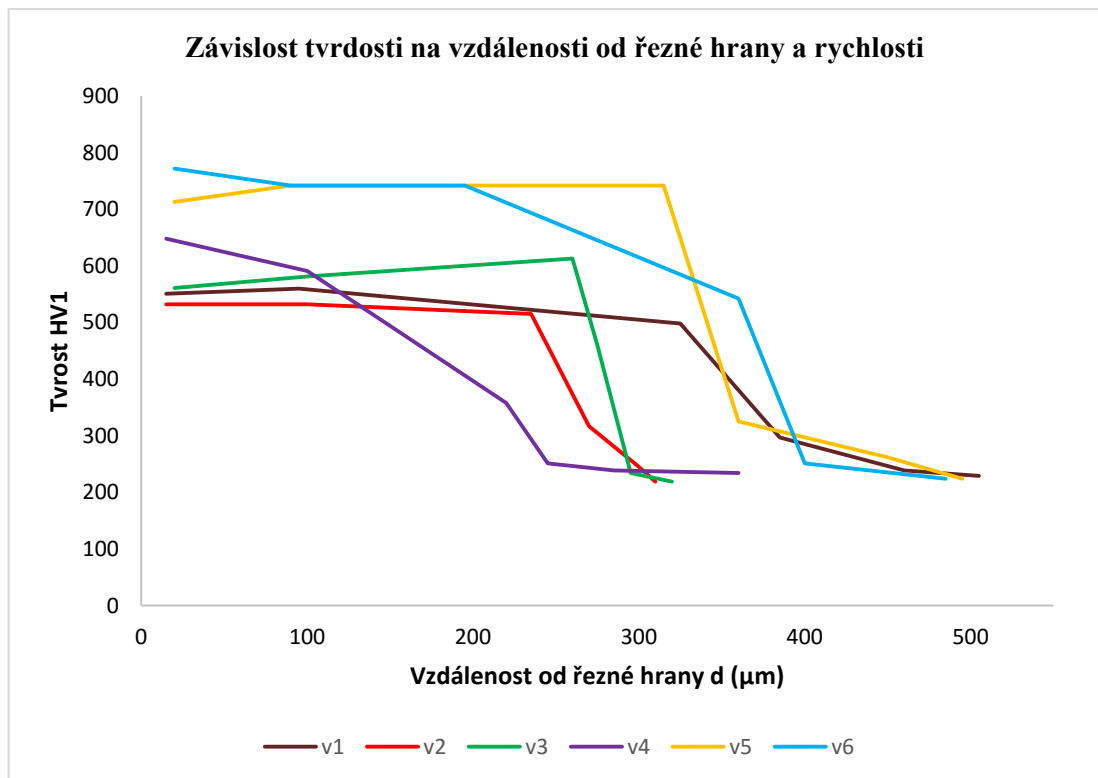
Obr. 53 – Graf závislosti maximální tepelně ovlivněné vrstvy d_{max} na výkonu řezání P a rychlosti v



Obr. 54 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_4 = 335\text{W}$



Obr. 55 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_3 = 290W$

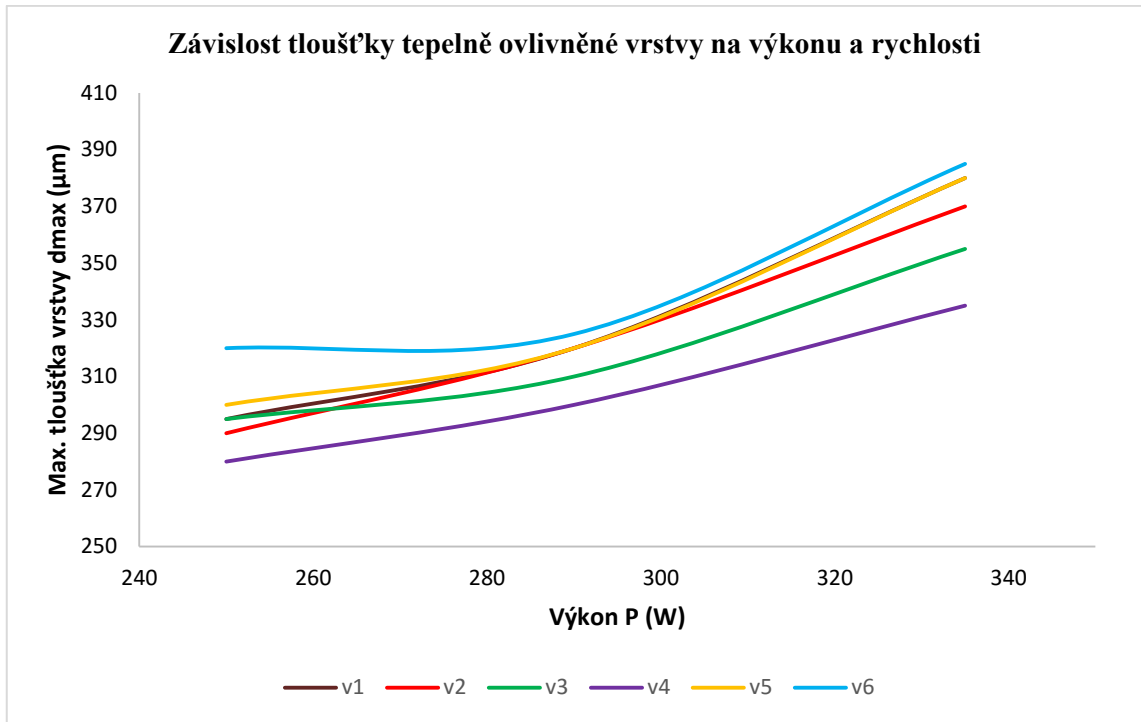


Obr. 56 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_2 = 250W$

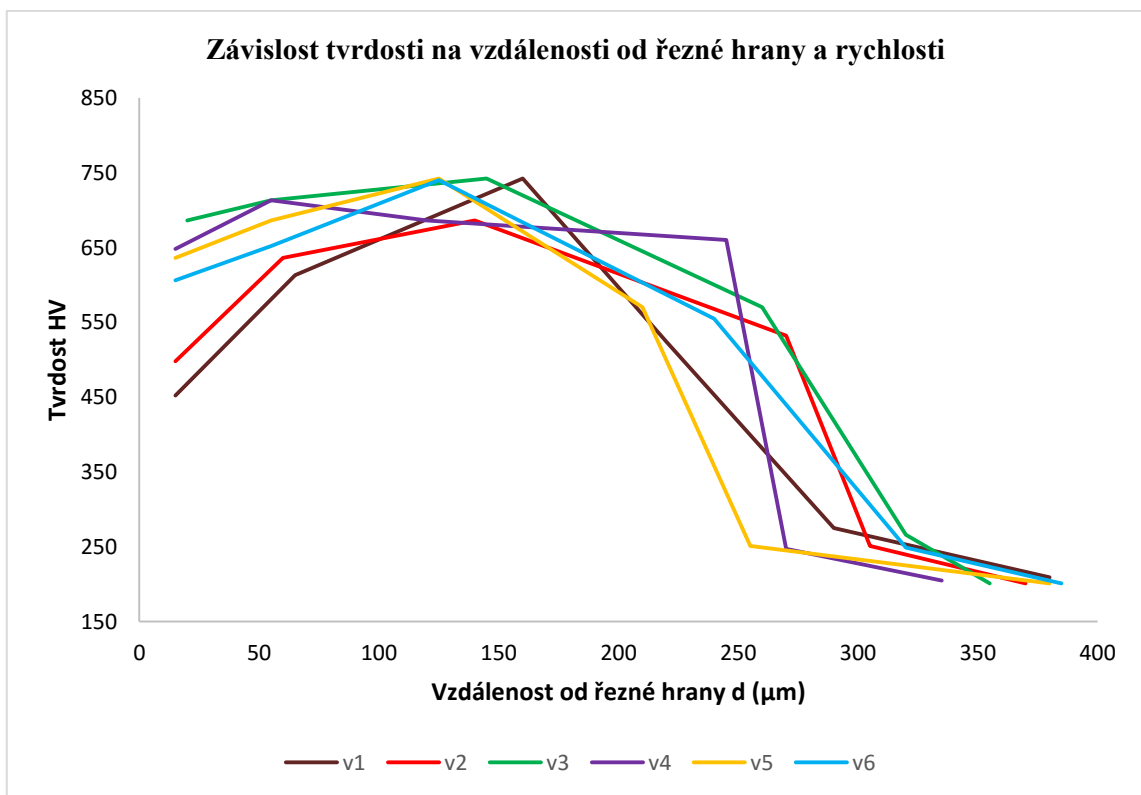
3.9.3 Naměřené hodnoty pro materiál 14 109.3

Výkon P (W)	Měřená veličina	Rychlost řezání v (m/min)					
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40
P₄ 335	Tvrdość HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	452 / 15	498 / 15	686 / 20	648 / 15	636 / 15	606 / 15
		613 / 65	636 / 60	713 / 55	713 / 55	686 / 55	652 / 55
		742 / 160	686 / 140	742 / 145	686 / 120	742 / 125	740 / 125
		524 / 220	532 / 270	570 / 260	660 / 245	570 / 210	555 / 240
		275 / 290	251 / 305	266 / 320	247 / 270	251 / 255	249 / 320
		209 / 380	201 / 370	201 / 355	205 / 335	201 / 380	201 / 385
	Max. Floušťka d_{max.} (μm)	380	370	355	335	380	385
	Max. tvrdost HV	742	686	742	713	742	740
P₃ 290	Tvrdość HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	686 / 15	439 / 10	636 / 15	439 / 10	498 / 10	532 / 10
		651 / 45	660 / 50	673 / 40	713 / 45	542 / 40	570 / 40
		660 / 160	660 / 95	658 / 175	688 / 90	699 / 125	772 / 80
		613 / 195	648 / 180	636 / 190	713 / 165	551 / 225	636 / 165
		251 / 270	256 / 260	425 / 250	256 / 275	245 / 260	276 / 285
		209 / 320	212 / 320	212 / 310	214 / 300	215 / 320	208 / 325
	Max. Floušťka d_{max.} (μm)	320	320	310	300	320	325
	Max. tvrdost HV	686	660	673	713	699	772
P₂ 250	Tvrdość HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	425 / 15	467 / 15	551 / 15	686 / 15	686 / 25	591 / 15
		686 / 40	673 / 80	660 / 40	713 / 40	699 / 40	742 / 45
		686 / 150	673 / 150	686 / 105	713 / 160	742 / 150	648 / 120
		551 / 240	613 / 235	686 / 190	636 / 240	570 / 220	551 / 195
		239 / 280	297 / 275	368 / 255	413 / 260	234 / 285	229 / 290
		212 / 295	212 / 290	209 / 295	216 / 280	212 / 300	209 / 320
	Max. Floušťka d_{max.} (μm)	295	290	295	280	300	320
	Max. tvrdost HV	686	673	686	713	742	742

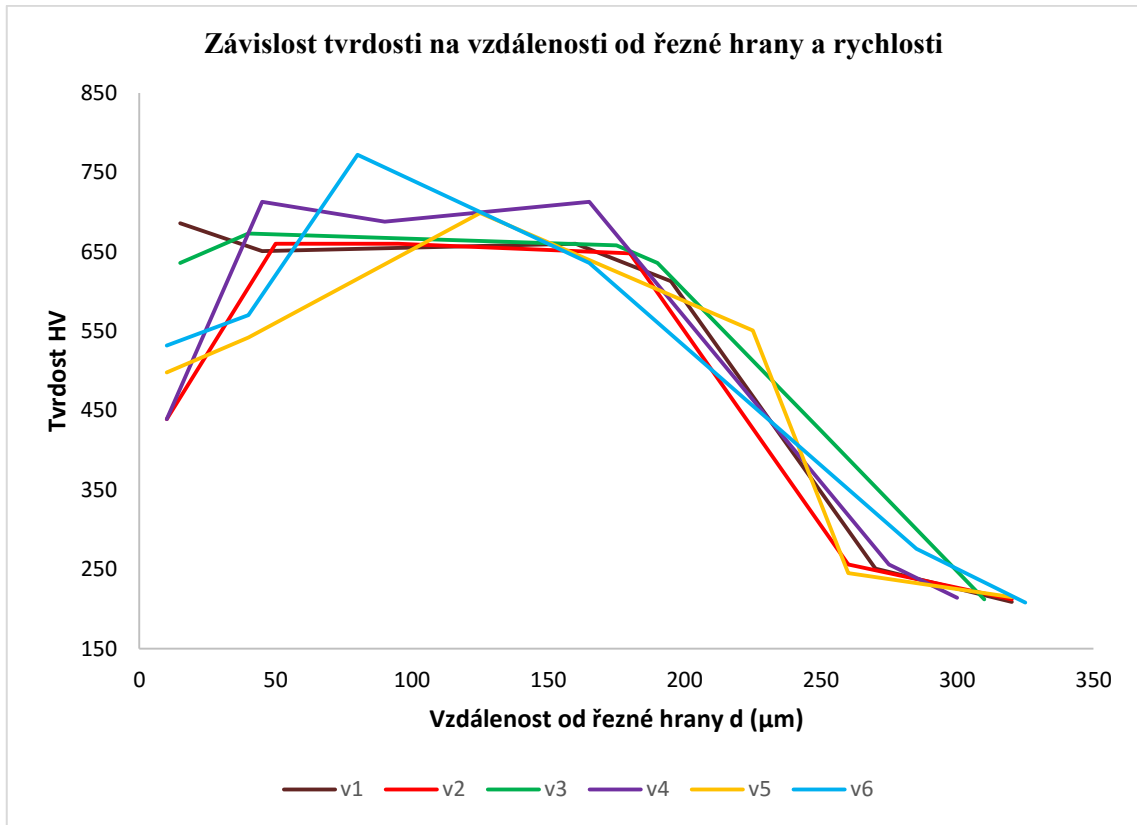
Tab. 16 – Naměřené hodnoty tvrdosti *HV1* ve vzdálenosti *d* od řezné hrany materiálu při rychlosti řezání *v* pro materiál 14 109.3



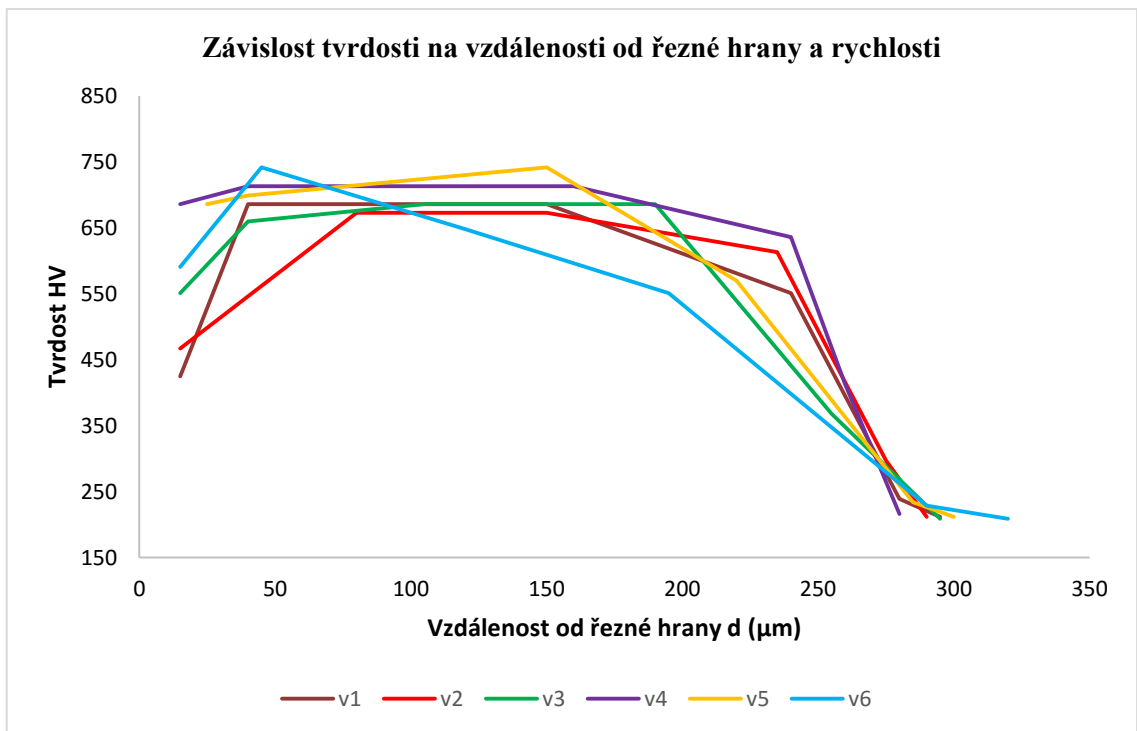
Obr. 57 – Graf závislosti maximální tepelně ovlivněné vrstvy d_{max} na výkonu řezání P a rychlosti v



Obr. 58 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_4 = 335W$



Obr. 59 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_3 = 290W$

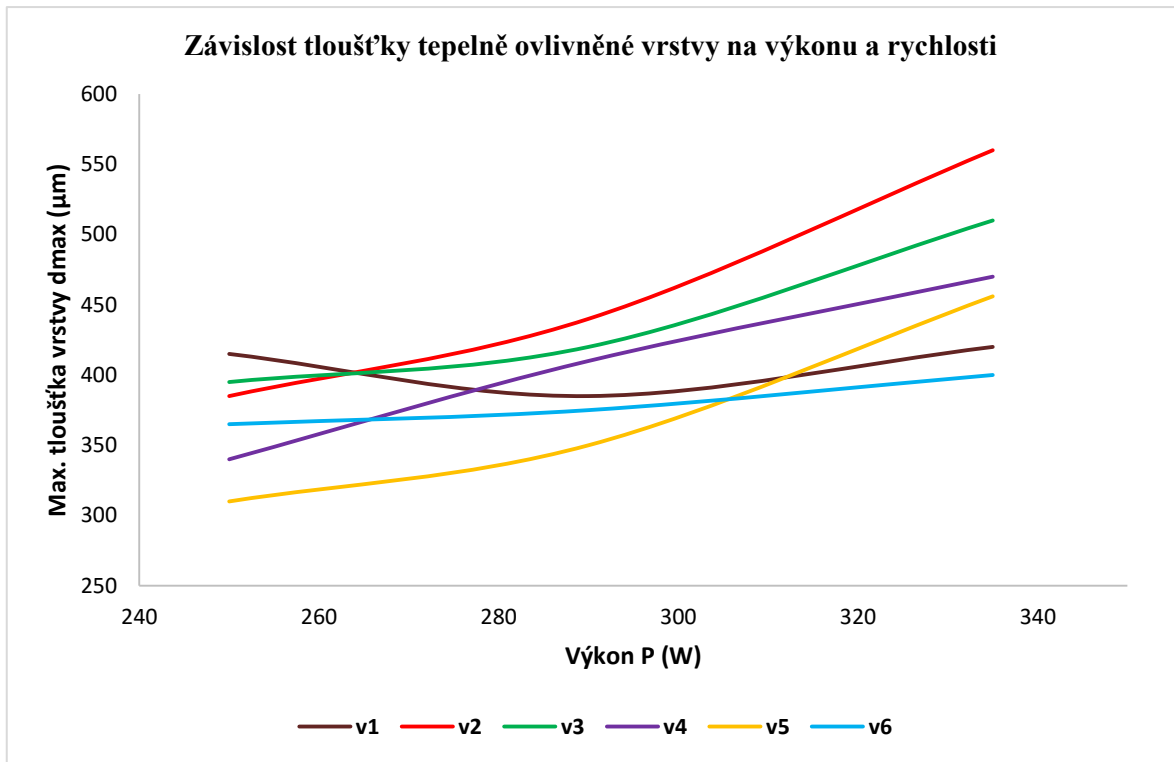


Obr. 60 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_2 = 250W$

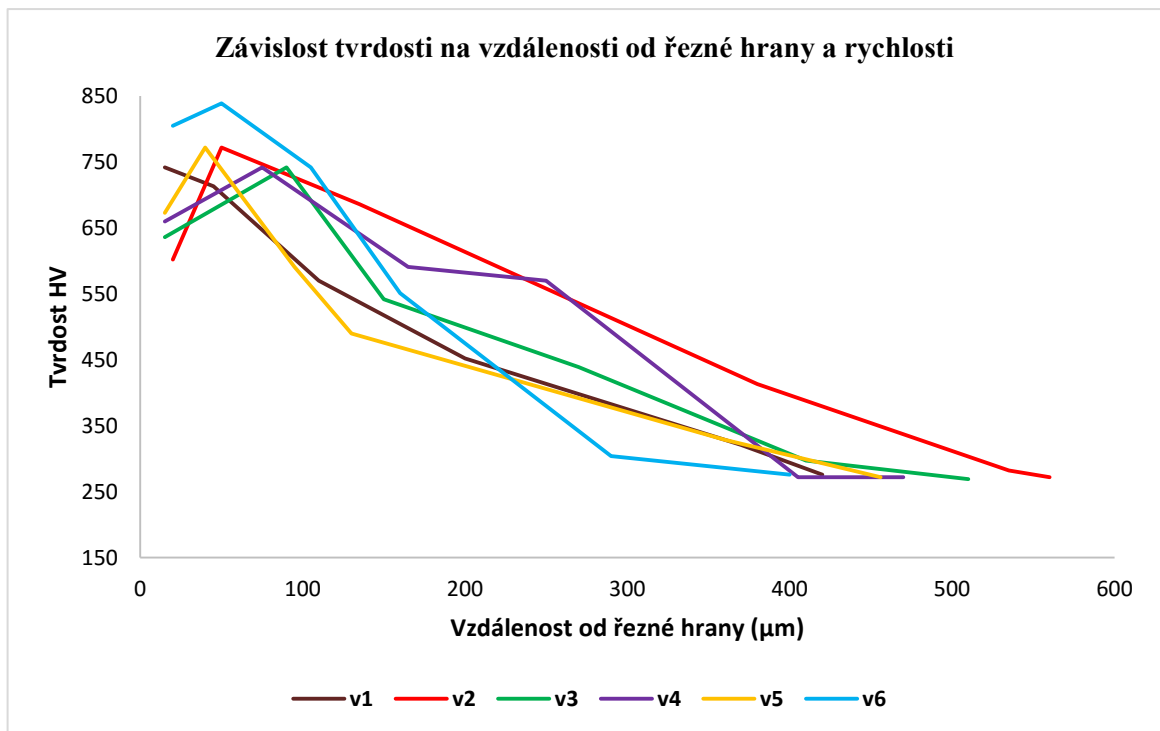
3.9.4 Naměřené hodnoty pro materiál 19 824.1

Výkon P (W)	Měřená veličina	Rychlost řezání v (m/min)					
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40
P₄ 335	Tvrdość HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	742 / 15	602 / 20	636 / 15	660 / 15	673 / 15	805 / 20
		713 / 45	772 / 50	742 / 90	742 / 75	772 / 40	839 / 50
		570 / 110	686 / 135	542 / 150	591 / 165	591 / 95	742 / 105
		452 / 200	413 / 380	439 / 270	570 / 250	490 / 130	551 / 160
		321 / 370	282 / 535	297 / 410	272 / 405	329 / 360	304 / 290
		276 / 420	272 / 560	269 / 510	272 / 470	272 / 456	276 / 400
	Max. Tloušťka d_{max.} (μm)	420	560	510	470	456	400
	Max. tvrdost HV	742	772	742	742	772	839
P₃ 290	Tvrdość HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	713 / 15	742 / 20	742 / 15	772 / 15	757 / 15	788 / 15
		742 / 40	727 / 40	757 / 45	772 / 45	772 / 40	772 / 45
		660 / 130	467 / 150	475 / 150	561 / 145	475 / 145	532 / 155
		515 / 235	334 / 365	330 / 380	313 / 310	425 / 235	358 / 240
		297 / 325	313 / 405	289 / 395	297 / 365	297 / 310	313 / 315
		269 / 385	276 / 440	272 / 420	276 / 410	272 / 350	272 / 375
	Max. Tloušťka d_{max.} (μm)	385	440	420	410	350	375
	Max. tvrdost HV	742	742	757	772	772	788
P₂ 250	Tvrdość HV 1 / Vzdálenost od řezné hrany d (μm)	713 / 15	742 / 15	757 / 15	727 / 15	713 / 10	757 / 15
		772 / 40	772 / 80	686 / 75	772 / 40	772 / 35	787 / 45
		686 / 145	742 / 130	498 / 145	413 / 165	482 / 190	727 / 80
		368 / 365	453 / 230	373 / 260	413 / 295	482 / 280	570 / 250
		313 / 400	329 / 320	378 / 375	401 / 300	348 / 300	300 / 340
		276 / 415	272 / 385	276 / 395	279 / 340	272 / 310	272 / 365
	Max. Tloušťka d_{max.} (μm)	415	385	395	340	310	365
	Max. tvrdost HV	772	772	757	772	772	787

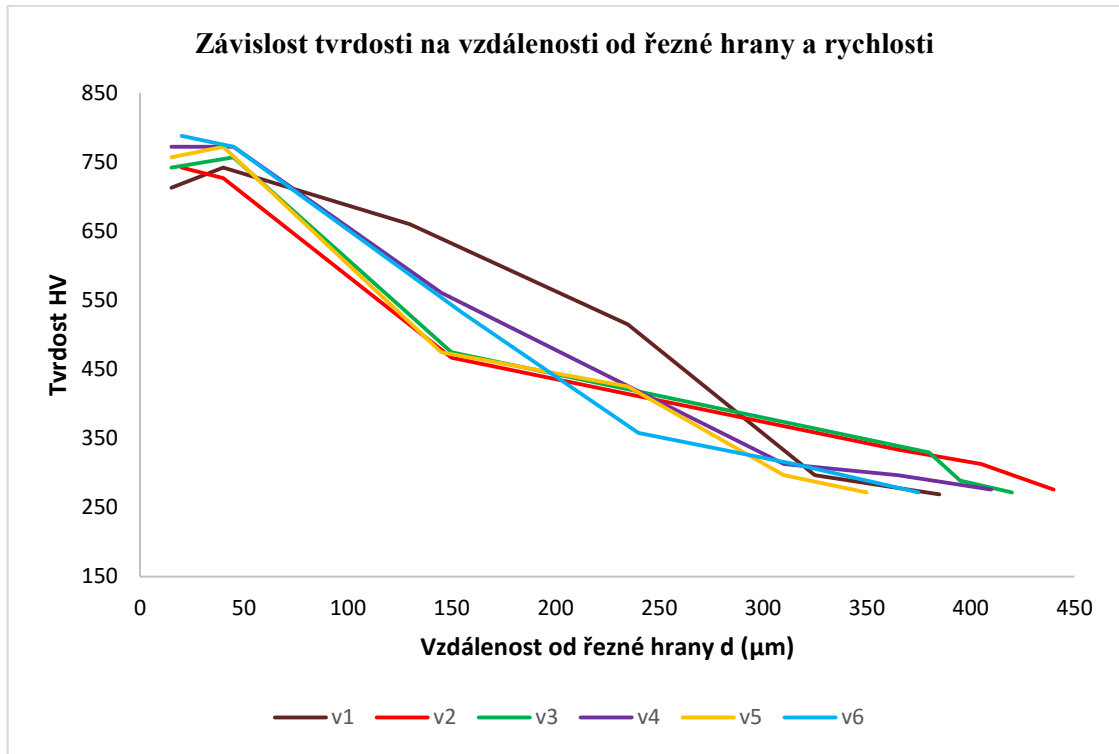
Tab. 17 – Naměřené hodnoty tvrdosti HV1 ve vzdálenosti d od řezné hrany materiálu při rychlosti řezání v pro materiál 19 824.1



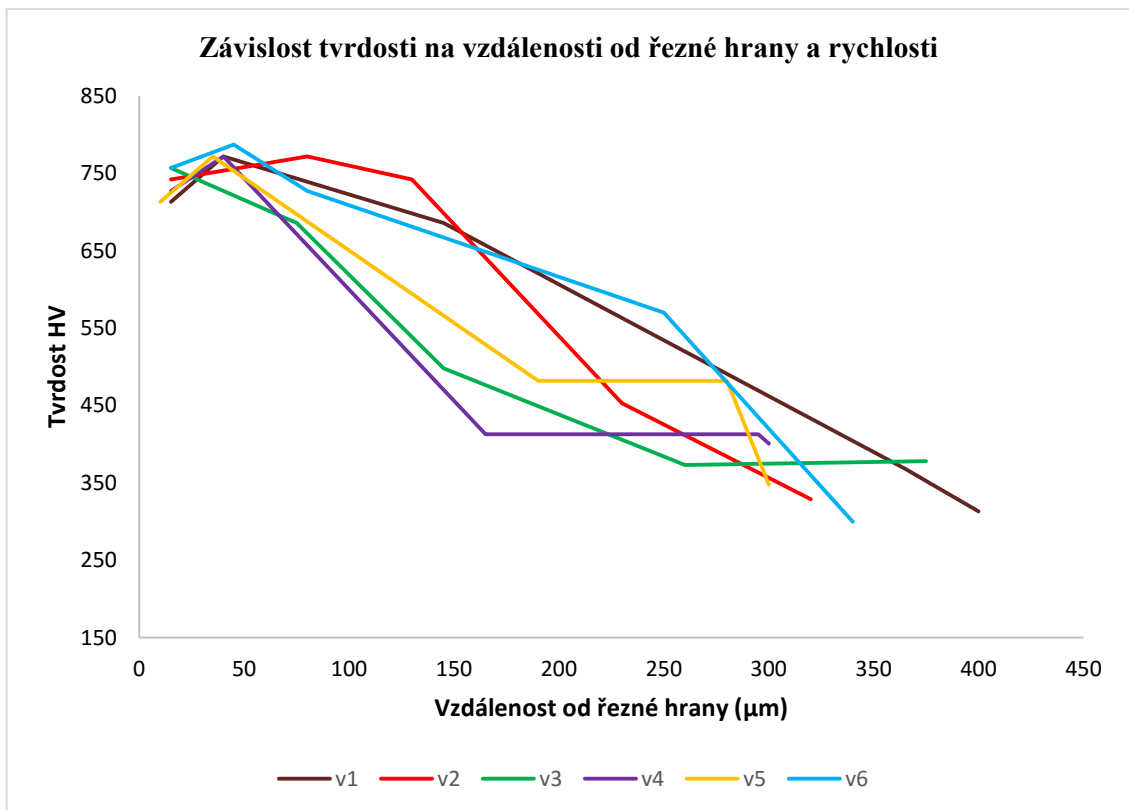
Obr. 61 – Graf závislosti maximální tepelně ovlivněné vrstvy d_{max} na výkonu řezání P a rychlosti v



Obr. 62 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_4 = 335W$



Obr. 63 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_3 = 290W$



Obr. 64 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v , při výkonu $P_3 = 290W$

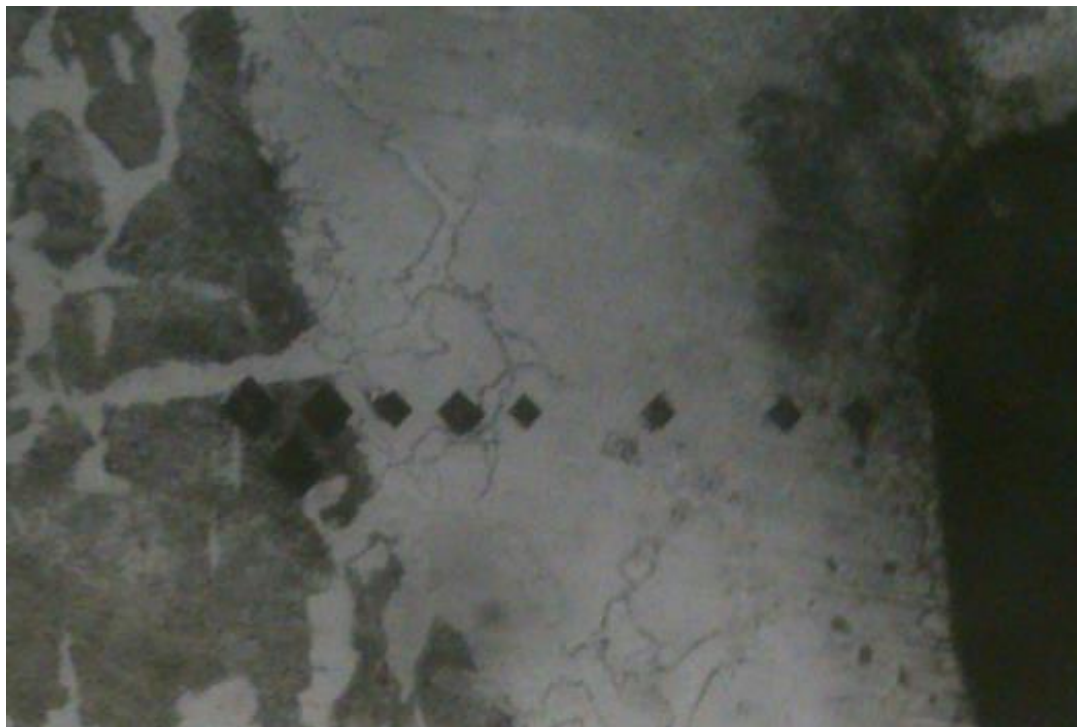
3.10 Metalografické výbrusy

Pro metalografické výbrusy byly vzorky nejdříve jemně broušeny (přílehlé boky kostek) na metalografické brusce. Poté následovalo leštění na textilních kotoučích.

Pro zvýraznění vrstev strukturních změn (odstranění „Beilbyho vrstvy“) bylo nutno výbrusy leptat. K leptání bylo použito leptadlo NITAL – 2% roztok 65% kyseliny dusičné (HNO_3) v etylalkoholu.

Na (obr. 65 až obr. 80) jsou snímky drážek, vytvořených při různých parametrech obrábění (různém výkonu a posuvové rychlosti). Pro zhotovení snímků byla použita ruční kamera ProScopeHR. Ovládání tohoto přístroje nebylo složité. Kamera s požadovaným zvětšením se pouze přiložila na zkoumaný vzorek a snímala obraz, který byl přenášen a zobrazován na monitoru počítače. Po zaostření mohla být přímo vytvořena fotografie zvětšeného obrazu drážky.

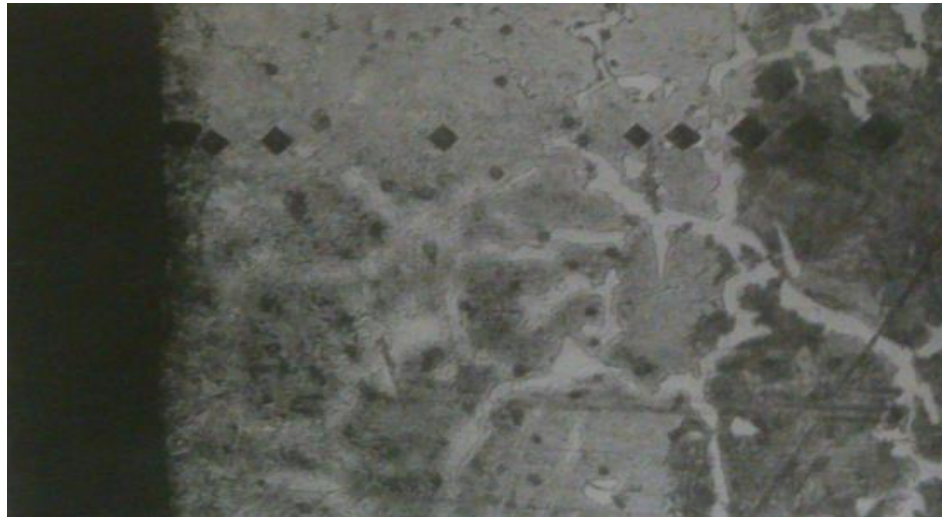
3.10.1 Snímky metalografických výbrusů materiálu 11 600



Obr. 65 – Výkon $P_4 = 335\text{W}$, posuvová rychlost $v_5 = 0,30\text{ m/min}$; zvětšení 200x



Obr. 66 – Výkon $P_4 = 335W$, posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x



Obr. 67 – Výkon $P_2 = 250W$, posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x



Obr. 68 – Výkon $P_2 = 250W$, posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x

3.10.2 Snímky metalografických výbrusů materiálu 12 060.1

Obr. 69 – Výkon $P_4 = 335W$, posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x



Obr. 70 – Výkon $P_3 = 290W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x

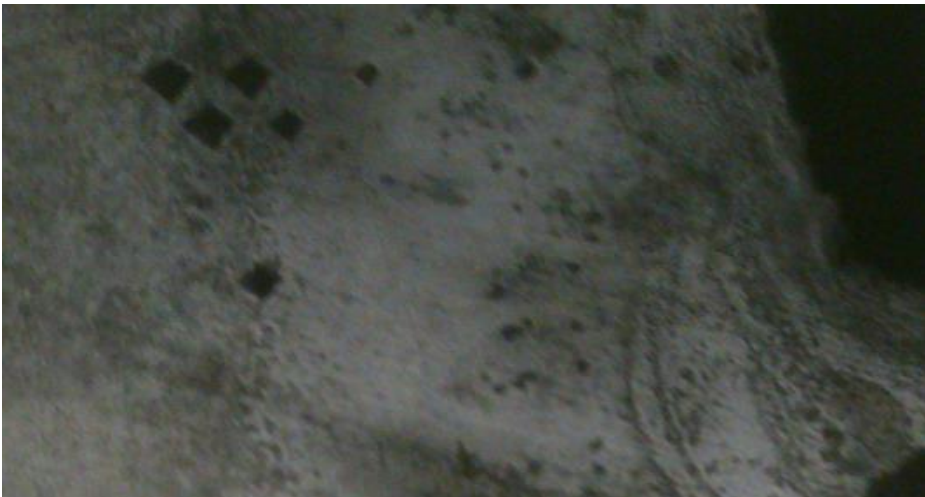


Obr. 71 – Výkon $P_2 = 250W$; posuvová rychlost $v_6 = 0,40$ m/min; zvětšení 200x

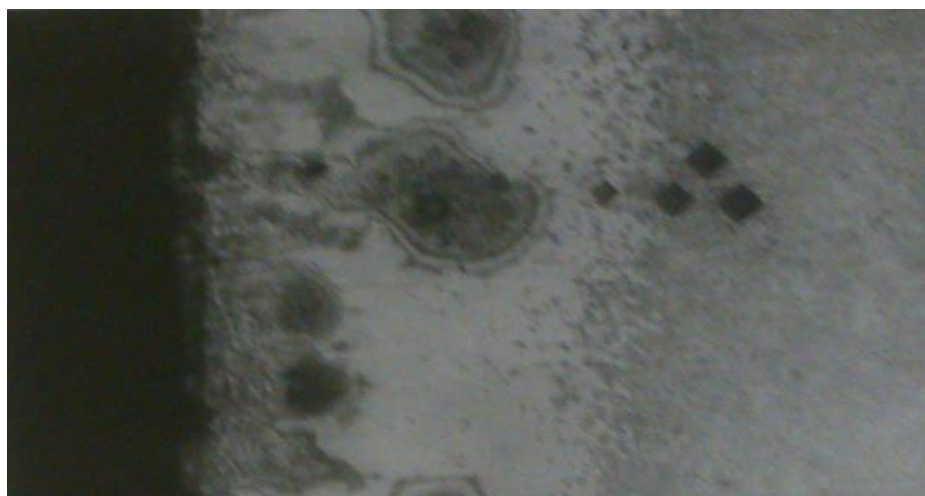


Obr. 72 – Výkon $P_2 = 250W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x

3.10.3 Snímky metalografických výbrusů materiálu 14 109.3



Obr. 73 – Výkon $P_4 = 335W$; posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x



Obr. 74 – Výkon $P_4 = 335W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x



Obr. 75 – Výkon $P_2 = 250W$; posuvová rychlost $v_6 = 0,40$ m/min; zvětšení 200x



Obr. 76 – Výkon $P_2 = 250W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x

3.10.4 Snímky metalografických výbrusů materiálu 19 824.1



Obr. 77 – Výkon $P_4 = 335W$; posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x



Obr. 78 – Výkon $P_4 = 335W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x



Obr. 79 – Výkon $P_3 = 290W$; posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x



Obr. 80 – Výkon $P_2 = 250W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x

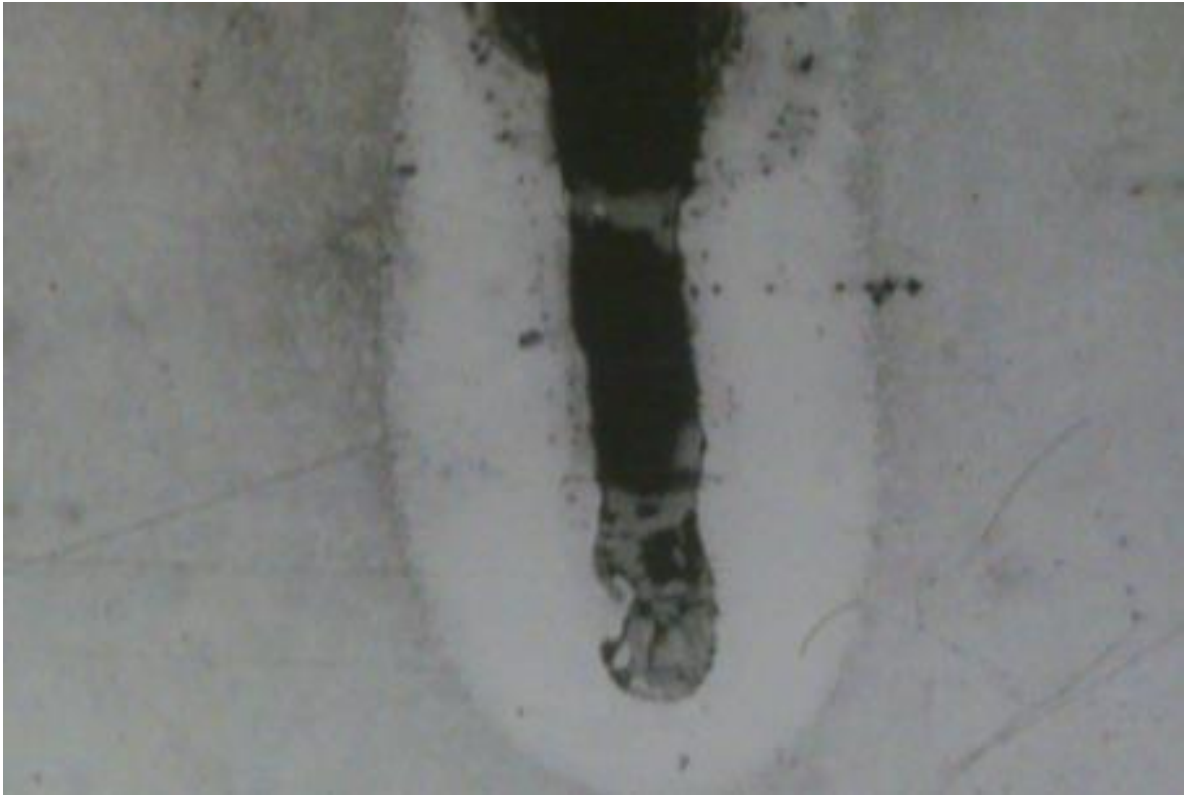
3.10.5 Snímky tvaru drážek



Obr. 81 – Ocel 11 600; výkon $P_4=335W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05 m/min$; zvětšení 50x



Obr. 82 – Ocel 12 060.1; výkon $P_3=290W$; posuvová rychlost $v_2 = 0,10m/min$; zvětšení 50x



Obr. 83 – Ocel 14 109.3; výkon $P_4=335W$; posuvová rychlost $v_3 = 0,15m/min$; zvětšení 50x



Obr. 84 – Ocel 19 824.1; výkon $P_4=335W$; posuvová rychlost $v_2 = 0,10m/min$; zvětšení 50x

4 HODNOCENÍ KVALITY LASEROVÉHO ŘEZU

Jakost řezu v zóně vzájemného působení laserového paprsku s řezným materiálem se určuje, tak jako u jiných metod obrábění, dvěma základními faktory:

- Fyzikálně mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy materiálu v místě řezu (tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy a strukturní změny v této vrstvě).
- Makro a mikrogeometrií povrchu řezné drážky.

Jestliže se dané parametry pro klasické způsoby obrábění nejeví základními a zpravidla se nezkoumají (kromě drsnosti), tak u laserového obrábění v důsledku specifických zvláštností průběhu procesu laserového působení tyto parametry mají základní význam a potřebují určitou (pevně stanovenou) analýzu.

4.1 Tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy

Jak ukázaly zkoušky, výsledkem vzájemného působení laserového paprsku s kovy jsou mikrostrukturální změny ve vrstvě materiálu ležící v těsné blízkosti řezné hrany drážky a projevující se změnou tvrdosti této vrstvy.

Tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy materiálu byla stanovena na základě průběhu tvrdosti v této vrstvě počínaje u hrany drážky, vzniklé po laserovém řezání a konče v bodě, kde se tvrdost vyrovná tvrdosti základního materiálu.

Z grafů a ze snímků metalografických výbrusů vyplývá řada obecných zákonitostí, vztahujících se k této tepelně ovlivněné vrstvě.

1. Tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy roste se zvyšujícím se použitým výkonem laseru, výjimku tvořila pouze ocel 11 600
2. Tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy roste s klesající posuvovou rychlostí řezné hlavy.
3. Tvrdost tepelně ovlivněné vrstvy narůstá jen pozvolna se zvyšujícím se výkonem laseru
4. Tvrdost vrstvy roste se zvyšující se rychlostí řezání.
5. Tepelně ovlivněná vrstva materiálu v těsné blízkosti okraje drážky je symetricky rozložena od osy drážky a téměř plně kopíruje její tvar.
6. Tloušťka vrstvy roste ode dna drážky k jejímu ústí

Tloušťka a tvrdost tepelně ovlivněné vrstvy je také odvozena od materiálové charakteristiky oceli.

1. Tvrdost tepelně ovlivněné vrstvy roste se zvyšujícím se obsahem uhlíku a ostatních legur v oceli.

2. Vliv obsahu uhlíku a ostatních legur na tloušťku tepelně ovlivněné vrstvy není již tak jednoznačný, jsou tu značné výkyvy. Do značné míry záleží na konkrétních pracovních podmínkách.

4.2 Strukturní změny v materiálu

Povrchová vrstva vzniká během laserového působení a je vytvořena za speciálních podmínek existujících na rozhraní drážka – řezný materiál. Tyto podmínky jsou charakterizovány vysokým gradientem teploty materiálu v hraničních vrstvách a velmi krátkým časem trvání tohoto gradientu.

Metalografické zkoušky ocelových vzorků umožnily odhalit dvě zóny v tepelně ovlivněné vrstvě.

1. Výrazně bílou zónu.
2. Méně výraznou přechodovou zónu přiléhající k základnímu materiálu.

Zkoušky ukázaly, že se tvrdost při přechodu z jedné zóny do druhé prudce mění. Bílá zóna byla v průměru o 50 až 100 μm užší než tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy. Zaujímal tak převážnou část ovlivněné vrstvy.

Struktura této zóny podle změřené tvrdosti odpovídá pro dané oceli předpokladům změn při rychlém ohřevu a diagramům ARA, IRA popsanych v kapitole 2.3 a 2.4. Je tvořena jehlicovým martenzitem s větším množstvím zbytkového austenitu.

Tvrdost ovlivněné vrstvy byla 3 až 3,5 krát větší (podle druhu oceli), v porovnání s tvrdostí základního materiálu.

4.3 Makro a mikrogeometrie povrchu drážky

Makro a mikrogeometrie povrchu se hodnotí rozměry nerovností a plochou na které se zkoumá.

Makrogeometrie povrchu při daném druhu obrábění dává představu o povrchu v celku, charakterizujíc její vlnitost, výskyt prohlubní, návarů materiálu atd.

Mikrogeometrie charakterizuje skutečný povrch na části základní délky.

Vnější obraz povrchu při obrábění laserovým paprskem je dost specifický a nelze ho srovnávat s jinými známými metodami, používanými v současnosti.

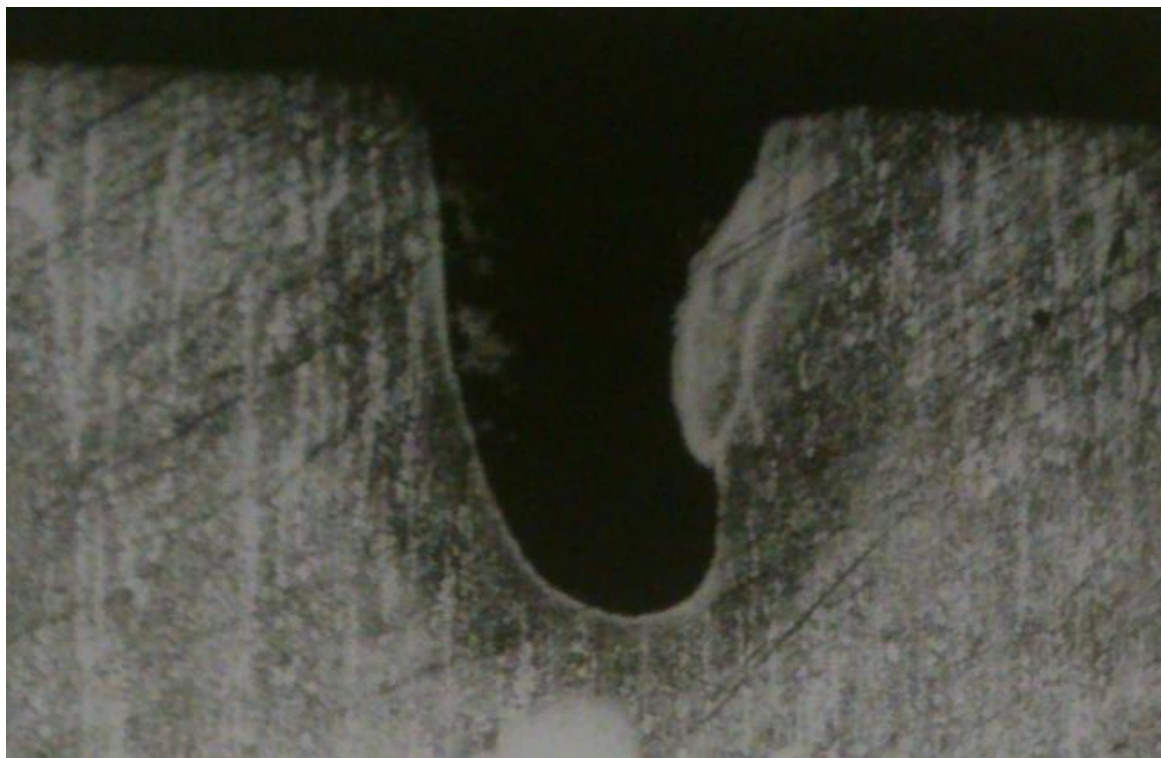
Charakter daného povrchu je ovlivněn materiálem vzorku, výkonem laseru nebo tloušťkou plechu (v případě průchozího řezu) a především rychlostí řezání.

4.3.1 Makrogeometrie povrchu drážky

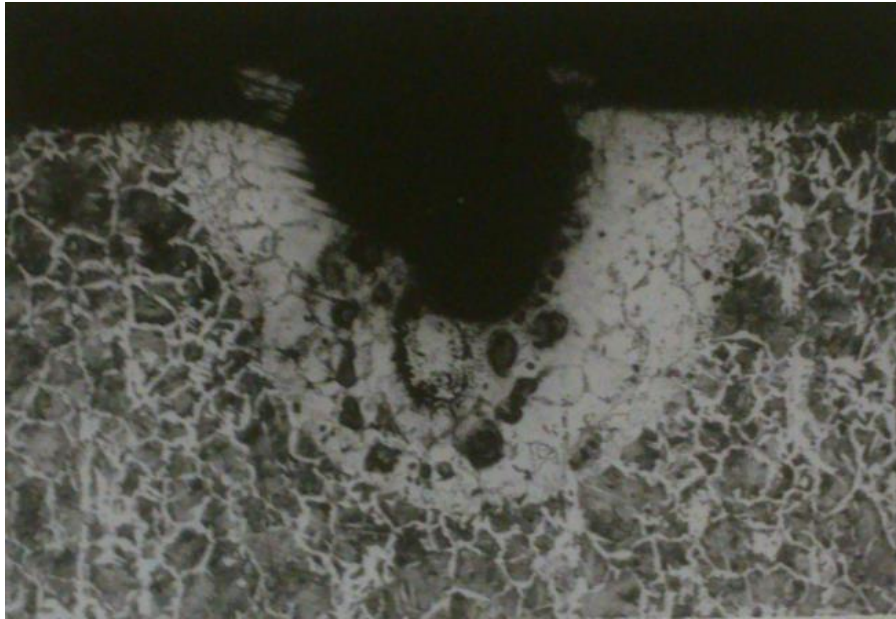
Charakteristickou hodnotou změny makrogeometrie povrchu byla vlnitost, návary, prohlubně a otřepy ve vyústění drážky na povrchu vzorku. Množství a velikost otřepů narůstaly se zvyšující se rychlostí řezání. Stejně tak tomu bylo v případě zvyšování výkonu.

Co se týká celkového tvaru drážky, nejmenší změny makrogeometrie byly zaznamenány ve střední části drážky a naopak největší se vyskytly v ústí a na dně drážky.

Jelikož se jednalo o neprůchozí řezy materiálem, je uvnitř řezů značné množství návarů. V případě průchozího řezu by měly být tyto návary vyfouknuty řezným plynem. To znamená, že změny makrogeometrie povrchu řezaných drážek by měla být mnohem menší a povrch celkově kvalitnější.



Obr. 85 – Makrogeometrie povrchu drážky – návary uvnitř drážky (Ocel 19 824.1; výkon $P_3=290W$; posuvová rychlost $v_2 = 0,10m/min$; zvětšení 50x)



Obr. 86 – Makrogeometrie povrchu drážky – otřepy ve vyústění (Ocel 11 600; výkon $P_3=290W$; posuvová rychlost $v_2 = 0,10m/min$; zvětšení 50x)

4.3.2 Mikrogeometrie povrchu drážky

Mikrogeometrie povrchu při řezání polotovarů z ocelí různých druhů, představuje v podstatě hladký natavený povrch se stopkami náběhových barev.

Praktické zkoušky mikrogeometrie povrchu nebyly prováděny, protože se řezaly pouze slepé drážky, které byly jednak značně úzké (ve střední části zhruba 300 až 600 μm) a navíc byly zaneseny roztaveným neodstraněným materiálem.

4.4 Výkon laseru a rychlost řezání

Výkon laseru a rychlost řezání jsou v případě laserového řezání dvě základní pracovní podmínky. Mají největší vliv na konečné parametry rezné drážky.

Z grafů (obr. 49, 53, 57, 61) je pro jednotlivé ocelové materiály možno stanovit konkrétní hodnoty výkonu laseru a rychlosti řezání v závislosti na konstantní tloušťce tepelně ovlivněné vrstvy.

4.5 Úprava povrchu vzorků

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.1, jednou z důležitých vlastností ocelového materiálu ovlivňující účinnost laserového obrábění je absorpční schopnost jeho povrchové vrstvy. V experimentálním řezání vzorků nebyla použita žádná podpůrná látka, která by absorpční

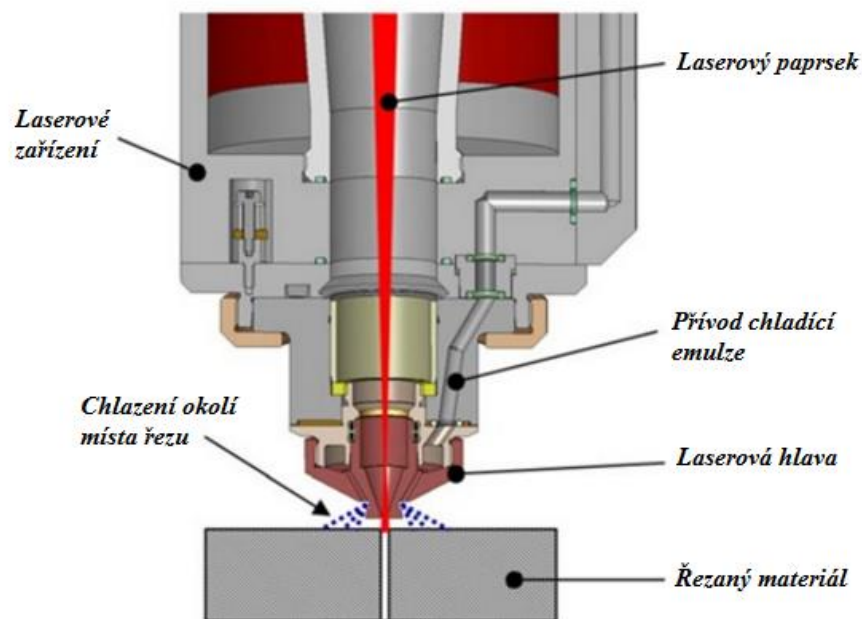
vlastnost zvětšila. Zřejmě lepších výsledků by bylo dosaženo při nanesení tenké tenké absorpční vrstvy např. grafitu nebo barvy v tloušťce do 10 μm na povrch laserem obráběného materiálu.

4.6 Chlazení okolí místa laserového řezu

Tepelně ovlivněná vrstva vykazuje proti základnímu materiálu zvýšenou tvrdost. Povrch řezné hrany drážky je tedy v nepatrné vrstvě zakalen.

Jestliže se jedná o obrobek, jehož obvod má ostré rohy a malé radiusy, můžeme tak v důsledku zakalení po laserovém řezání hovořit o vzniklém metalurgickém zisku, protože v provozu má tato tvarovaná řezná hrana sníženou vrubovou citlivost.

Předpokladem je ovšem, aby hodnota zakalení na hranici přechodu do základního materiálu zůstala konstantní. Toho lze dosáhnout chlazením okolí místa řezu. Rovnoměrnost chlazení je zajištěna kruhově uspořádaným přívodem chladicího média (např. řezná olejová emulze).



Obr. 87 – Laserová řezací hlava s chlazením okolí místa řezu

Chlazení prostoru kolem místa řezu přináší tyto výhody:

- Snižuje hloubku ovlivněné vrstvy
- Stabilizuje hodnotu zakalení řezné hrany
- Zlepšuje kvalitu povrchu řezu.

ZÁVĚR

Za posledních několik desítek let ve světě dochází k prudkému rozvoji využití laserové techniky v průmyslu. Řada výrobců nabízí laserová zařízení na bázi CO₂ a YAG v nejrůznějších provedeních a verzích v důsledku stále se zvyšujících požadavků zákazníků. Původně byla tato nekonvenční metoda vyvinuta jako alternativní způsob obrábění materiálů. V dnešní době je již v mnoha směrech nedílnou součástí strojírenské výroby.

Cílem této práce bylo zmapování laserové technologie se zaměřením na aplikace ve strojírenském odvětví. Historický průřez vývojem až do současnosti vysvětluje, komu a proč dnes vděčíme za objev a zdokonalení laseru, který je právem považován za jeden z největších objevů v historii lidstva.

Úvodním tématem je atom a jeho energie, od které se odvíjí celá podstata laserových technologií. Jsou vysvětleny fyzikální principy kumulace energie pomocí stimulované emise na vyšší energetické hladiny a jejich uvolnění za účelem vzniku zesíleného světelného paprsku. Následuje průřez nejznámějších laserů, které se v dnešní době používají. Jednotlivé rozdělení, podle použitých fází, pracovních režimů a způsobů použití je doplněno o konstrukci specifických zařízení. Po tomto přehledu je plynule navázáno na bezpečnost práce s lasery. Texty zahrnují dělení do bezpečnostních tříd, které je nutné bezpodmínečně dodržovat při používání laserových přístrojů v praxi.

Druhá část rešerše je věnována ocelovým materiálům. Byla zde stručně popsána výroba ocelí a slitin, princip jejich rozdělování do kategorií a okruhy použití. Větší pozornost byla věnována značení dle norem ČSN a EN. Jelikož jsou oba styly zásadně odlišné, vzniká mnohdy problém s identifikací téhož materiálu. Proto byly v práci vyhotoveny sjednocující tabulky, ve kterých jsou přehledně přiřazeny ke značce ocelí dle ČSN ekvivalenty značek EN.

V poslední části teoretické práce byla pozornost zaměřena na metalografické procesy ocelových materiálů při tepelném namáhání. Z důvodu souvislosti interakce oceli s laserovým zářením, kdy materiál utrpí teplotní šok. Tato kapitola mapovala tuhnutí slitin z metastabilního do stabilního stavu názorným diagramem železo - karbid železa a postupně se pozornost přenesla na strukturální procesy materiálu při cíleném ohřevu, výdrži na určité teplotě a následné rychlosti ochlazování. Diagramy izotermického a anizotermického rozpadu austenitu (IRA, ARA) podeutektoidních, eutektoidních a nadeutektoidních ocelí připravily povědomí o teplotách a strukturách materiálů, zkoumaných v teoretické části.

Cílem praktické části bylo zkoumat a vyhodnotit tepelně ovlivněnou vrstvu materiálu po působení laserovým zářením. Materiály vzorků byly záměrně zvoleny tak, aby zahrnuly celé spektrum používaných ocelí. Běžná konstrukční ocel 11 600, pružinová ocel 12 060.1, chromová ocel 14 109.3 a nástrojová ocel 19 824.1. Tyto materiály ve formě kvádrových polotovarů byly postupně podrobeny hloubkovému řezání pomocí laseru, kdy se vyhotovila síť drážek. Každá drážka byla vypálena s odlišnými parametry. Po této přípravě všech vzorků se práce přesunuly do metalurgických laboratoří, kde za pomoci mikroskopů a tvrdoměrem probíhalo měření délkových parametrů vzniklých drážek a tvrdostí tepelně ovlivněných vrstev. Výkon P_1 nebyl do měření zahrnut, protože byly jeho hodnoty velmi malé a navíc značně nestálé.

Naměřená data jsou prezentována ve formě tabulek, grafů a pořízených snímků. Pro materiál 11 600 byla vyhotovena charakteristika vzájemného působení výkonu laseru s rychlostí posuvové hlavy s hloubkou a poté i šířkou vzniklých drážek. Výsledky ukázaly obecné zákonitosti a sice že při největším výkonu a nejpomalejší rychlosti má drážka největší hloubku a naopak. Rozdílem byl až 1200 μm . Na šířku drážky neměl odlišný výkon významější vliv, její rozměr se měnil pouze s posuvovou rychlostí a to téměř o 200 μm .

Na všech materiálech bylo sledováno, jak se mění tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy na výkonu laseru při různých rychlostech. Všechny materiály vykazují největší nárůst této vrstvy při nejpomalejší rychlosti posuvu hlavy. Rozdíl byl sledován v rozsahu výkonů P_2 a P_4 . Pro materiál 11 600 činí rozdíl 80 μm , pro materiál 12 060.1 byl rozdíl největší a to až 180 μm . Chromová ocel měla naopak nejmenší rozdíl 60 μm a u nástrojové oceli 19 824.1 byl rozdíl 160 μm .

Největší rozsah mělo měření tvrdosti tepelně ovlivněné vrstvy na rychlosti posuvu při odlišných výkonech řezání. Nejprve byla zjištěna tvrdost základního (tepelně neovlivněného) materiálu. Poté se v určitých vzdálenostech od hrany vzniklé drážky prováděly vpichy tvrdoměrem a zjišťovala se aktuální tvrdost tepelně ovlivněné vrstvy. Jakmile se hodnota shodovala s tvrdostí základního materiálu, bylo měření u konce.

Výsledky tohoto měření ve většině případů ukázaly, že nejdelší tepelně ovlivněná vrstva vznikne při největším použitém výkonu a nejpomalejší posuvové rychlosti (vyjímkou je ocel 11 600). To je dáno časem, kdy je materiál vystaven laserovému záření. Potvrdilo se, že nezáleží na mechanických vlastnostech materiálu, ale na tepelné vodivosti kterou ovlivňuje obsah uhlíku a legujících prvků v oceli. Průběh tvrdosti se ve většině případů od

okraje řezné drážky zvětšoval a po dosažení maxima pozvolna klesala až na hodnotu tvrdosti základního materiálu.

V závěru práce jsou umístěny fotografické snímky struktur drážek různých materiálů vzorků. Viditelné jsou oblasti, které byly tepelně ovlivněny laserovým zářením. Poslední kapitola hodnotí kvalitu řezu makro a mikrogeometrie.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RŮŽIČKA, Vladimír. *Kvantová elektronika*. 4. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987.
- [2] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-227-8.
- [3] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [4] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav a Václav HANĚK. *Strojírenská technologie 2*. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-245-6.
- [6] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-336-3.
- [7] SOCHOR, Václav. *Lasery a koherentní svazky*. 1. vyd. Praha: Academia, 1990. Cesta k vědě (Academia).
- [8] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [9] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [10] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2014. ISBN 978-80-7196-438-4.
- [11] Laser i-learning. *Umění průmyslového zančení* [online]. Leonardo technology s.r.o © 2005 – 2013 [vid. 2015-11-30]. Dostupný z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning>
- [12] Laserové svařování a navařování. *LAO - lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z : <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-svarovani-anavarovani-86>
- [13] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika* [online]. 2016 [cit. 2016-03-02] Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika.htm>

- [14] LETOVSKÁ. BOZP info - Téma týdne. BOZP info [online]. 26.09.2011 [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: http://www.bozpinfo.cz/win/knihovnabozp/citarna/tema_tydne/BOZP_lasery110923.html
- [15] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. 1. vyd. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-80-87240-65-6.
- [16] Bezpečnost při používání laseru se zaměřením na zdravotnictví. BOZP Profi [online]. 26.2.2012 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: http://www.bozpprofi.cz/bezpecnost-pri-pouzivani-laseru-se-zamerenim-nazdravotnictvi-uniqueidgOke4NvrWuOKaQDKuox_ZyDs6-r29kev86iZlrc5-dg/
- [17] Svět svaru. *Časopis o moderních trendech ve svařování a řezání kovů* [online časopis]. XV ročník 2011-03-11 [vid. 2015-12-11]. Dostupné z: <http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2014/05/SS113.pdf>
- [18] KABELÁČ, Jakub. *Hodnocení mechanických vlastností vybraných druhů ocelí*. Zlín, 2011. 59s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická.
- [19] KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [20] DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v praxi. MegaBlog. [online]. 28.02.2013 [cit. 2015-12-12]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laserupouzivanych-v-prumyslu/>
- [21] MINAŘÍK, Karel. *Základní druhy technologických laserů pro řezání a svařování*. [online]. 29.12.2007 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>
- [22] Vybrané oceli – vlastnosti a použití. *SVARINFO* [online cit. 2016-04-19] dostupné z: http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=oceli_pouziti
- [23] Hutní a spojovací materiál – nejpoužívanější vlastnosti ocelí dle ČSN, další značení, popis použití. *FEROMAT* [online cit. 2016-04-20] dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
- [24] Oceli rychlořezné – ocel rychlořezná ČSN 19 824. *JKZ BUČKOVICE a.s.* [online cit. 2016-04-20] dostupné z: <http://jkz.cz/produkty/nastrojova-ocel-19-824>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MASER Microwave amplification by stimulated emission of radiation.

LASER Light amplification by stimulated emission of radiation.

e Elektron.

E Energetická hladina.

h Planckova konstanta = $6,626 \cdot 10^{-34}$ [J.s].

f Frekvence záření.

λ Vlnová délka.

c Rychlost světla.

Tzv. Tak zvaně.

Atd. A tak dále.

k Boltzmannova konstanta = $1,380648 \cdot 10^{-23}$ [J.K⁻¹].

K stupeň Kelvina.

°C stupeň Celsia.

Cr Chróm.

CO₂ Oxid uhličitý.

Ni Nikl.

Nd Neodým.

Sm Samarium.

Eu Europium.

Gd Gadolinium.

O₂ Kyslík.

Fe Železo.

Cu Měď.

Al Hliník.

Au Zlato.

Ag	Stříbro.
Xe	Xenon.
As	Arsén.
Ga	Gálium.
Ne	Neon.
Ar	Argon.
Kr	Krypton.
He	Hélium.
N	Dusík.
Mn	Mangan.
Si	Křemík.
P	Fosfor.
W	Wolfram.
V	Vanad.
Mo	Molybden.
%	Procento.
v	Frenvence uvolněného vlnění.
DC	Stejnoseměrný typ napájení.
RF	Excitovaný laser.
AC	Střídavý typ napájení.
GDL	Plynový dynamický laser.
UV	Ultrafialové záření.
L	Délka.
T	Čas.
MPE	Maximální přípustná dávka ozáření.
AEL	Přípustná mezní hodnota emisí.

ČSN	Česká státní norma.
EN	Evropská mezinárodní norma.
Obr.	Obrázek
Tab.	Tabulka.
HS	Rychlořezná ocel.
IRA	Izotermický rozpad austenitu.
ARA	Anizotermický rozpad austenitu

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – První funkční laser v rezonačním optickém poli</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2 – Bohrov model schématického znázornění atomu [13]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3 – Schéma stimulované emise</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4 – Schéma rozdělení laserů podle aktivního prostředí [11]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5 – Rubínový laser s čerpací výbojkou</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6 – Úrovně energií s přechody rubínového laseru [1]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 7 – Schéma energetických hladin v neodýmovém laseru</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 8 – Výbojkami buzený Nd:YAG laser</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 9 – Schéma energetických hladin CO₂ laseru</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 10 – Schéma podélně čerpaného CO₂ laseru</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 11 – Schéma CO₂ laseru s rychlým podélným prouděním [20]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 12 – Schéma příčně čerpaného CO₂ laseru</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 13 – Schéma laseru He – Ne</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 14 – Úrovně energií a přechody v laseru He – Ne</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 15 – Schéma GDL laseru</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 16 – Schéma GaAs polovodičového laseru</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 17 – Uspořádání vláken</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 18 – Schéma vláknového laseru</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 19 – Schéma excimerního laseru</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 20 – Varovná značka na laserové záření</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 21 – Rozdělení ocelí [18]</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 22 – Schéma číselného značení ocelí k tváření</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 23 – Ukázka barevného značení hutních materiálů</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 24 – Označování ocelí podle ČSN EN 10027</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 25 – Označování značkou podle ČSN EN 10027-1 (42 0011): 06</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 26 – Rovnovážný diagram Fe – Fe₃C</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 27 – Výřez z diagramu Fe-Fe₃C: tuhnutí slitiny podle přímky III</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 28 – Diagram izotermické (plná čára) a anizotermické (čárkovaně) austenitizace podeutektoidní oceli</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 29 – IRA diagram podeutektoidní oceli 12 040</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 30 – IRA diagram eutektoidní – perlitické oceli</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 31 – IRA diagram nadeutektoidní oceli</i>	<i>56</i>

<i>Obr. 32 – Schématický ARA diagram</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 33 – Odrazivost infračerveného laserového záření 10 600 nm na ocelovém povrchu</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 34 – Závislost přímého odrazu a prokalené hloubky na tloušťce nanesené vrstvy</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 35 – Polotovary pro experimentální pálení</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 36 – Výroba polotovaru.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 37 – Rozmístění jednotlivých drážek na materiálu.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 38 – Kompletní náhled na hotový vzorek</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 39 – Kompletní náhled na hotový vzorek</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 40 – Laserové centrum Platino 1530</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 41 – Laserové řezání trubky na stroji platino 1530</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 42 – Laserové řezání plechu na stroji Platino 1530</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 43 – Znázornění hloubky a šířky drážek.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 44 – Graf závislosti hloubky řezu h na rychlosti v a výkonu P pro ocel 11 600</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 45 – Prostorový graf zobrazující závislosti hloubky řezu h na rychlosti v a výkonu P pro ocel 11 600</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 46 – Graf závislosti šířky řezu b na rychlosti v a výkonu P pro ocel 11 600</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 47 – Prostorový graf zobrazující závislosti šířky řezu b na rychlosti v a výkonu P pro ocel 11 600.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 48 – Snímek z měření mikrotvrdomi tepelně ovlivněné vrstvy.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 49 – Graf závislosti maximální tepelně ovlivněné vrstvy d_{max} na výkonu řezání P a rychlosti v.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 50 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_4 = 335W$</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 51 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_3 = 290W$</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 51 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_2 = 250W$</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 53 – Graf závislosti maximální tepelně ovlivněné vrstvy d_{max} na výkonu řezání P a rychlosti v.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 53 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_4 = 335W$</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 54 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_3 = 290W$</i>	<i>82</i>

<i>Obr. 55 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_2 = 250W$</i>	82
<i>Obr. 57 – Graf závislosti maximální tepelně ovlivněné vrstvy d_{max} na výkonu řezání P a rychlosti v.....</i>	84
<i>Obr. 58 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_4 = 335W$</i>	84
<i>Obr. 59 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_3 = 290W$</i>	85
<i>Obr. 60 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_2 = 250W$</i>	85
<i>Obr. 61 – Graf závislosti maximální tepelně ovlivněné vrstvy d_{max} na výkonu řezání P a rychlosti v.....</i>	87
<i>Obr. 62 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_4 = 335W$</i>	87
<i>Obr. 63 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_3 = 290W$</i>	88
<i>Obr. 64 – Graf závislosti tvrdosti HV na vzdálenosti od řezné hrany d a rychlosti v, při výkonu $P_3 = 290W$</i>	88
<i>Obr. 65 – Výkon $P_4 = 335W$, posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x.....</i>	89
<i>Obr. 66 – Výkon $P_4 = 335W$, posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x.....</i>	90
<i>Obr. 67 – Výkon $P_2 = 250W$, posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x.....</i>	90
<i>Obr. 68 – Výkon $P_2 = 250W$, posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x.....</i>	90
<i>Obr. 69 – Výkon $P_4 = 335W$, posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x.....</i>	91
<i>Obr. 70 – Výkon $P_3 = 290W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x</i>	91
<i>Obr. 71 – Výkon $P_2 = 250W$; posuvová rychlost $v_6 = 0,40$ m/min; zvětšení 200x</i>	91
<i>Obr. 72 – Výkon $P_2 = 250W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x</i>	92
<i>Obr. 73 – Výkon $P_4 = 335W$; posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x</i>	92
<i>Obr. 74 – Výkon $P_4 = 335W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x</i>	92
<i>Obr. 75 – Výkon $P_2 = 250W$; posuvová rychlost $v_6 = 0,40$ m/min; zvětšení 200x</i>	93
<i>Obr. 76 – Výkon $P_2 = 250W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x</i>	93
<i>Obr. 77 – Výkon $P_4 = 335W$; posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x</i>	93
<i>Obr. 78 – Výkon $P_4 = 335W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x</i>	94
<i>Obr. 79 – Výkon $P_3 = 290W$; posuvová rychlost $v_5 = 0,30$ m/min; zvětšení 200x</i>	94

<i>Obr. 80 – Výkon $P_2 = 250W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 200x</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 81 – Ocel 11 600; výkon $P_4=335W$; posuvová rychlost $v_1 = 0,05$ m/min; zvětšení 50x</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 82 – Ocel 12 060.1; výkon $P_3=290W$; posuvová rychlost $v_2 = 0,10$m/min; zvětšení 50x</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 83 – Ocel 14 109.3; výkon $P_4=335W$; posuvová rychlost $v_3 = 0,15$m/min; zvětšení 50x</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 84 – Ocel 19 824.1; výkon $P_4=335W$; posuvová rychlost $v_2 = 0,10$m/min; zvětšení 50x</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 85 – Makrogeometrie povrchu drážky – návary uvnitř drážky (Ocel 19 824.1; výkon $P_3=290W$; posuvová rychlost $v_2 = 0,10$m/min; zvětšení 50x)</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 86 – Makrogeometrie povrchu drážky – otřepy ve vyústění (Ocel 11 600; výkon $P_3=290W$; posuvová rychlost $v_2 = 0,10$m/min; zvětšení 50x)</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 87 – Laserová řezací hlava s chlazením okolí místa řezu</i>	<i>101</i>































SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Rozdělení ocelí do tříd.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 2 – Význam třetí číslice.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 3 – Význam třetí číslice u nástrojových ocelí</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 4 – Významy první a druhé doplňkové číslice</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5,6 – Přiřazení značek ocelí ČSN ke značkám EN</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 6 – Součinitele odrazivosti některých kovů.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 7 – Zvolené materiály vzorků v českém a evropském značení ocelí.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 8 – Materiálové hodnoty oceli 11 600 [22], [9].....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 9 – Materiálové hodnoty oceli 12 060 [23], [9].....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 10 – Materiálové hodnoty oceli 14 109.3 [23], [9].....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 11 – Materiálové hodnoty konstrukční oceli 19 824.1 [24], [9]</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 12 – Zvolené řezné parametry</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 13 – Aritmetické průměry hloubky a šířky drážek v závislost na výkonu a rychlosti materiálu 11600.....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 14 – Naměřené hodnoty tvrdosti HV1 ve vzdálenosti d od řezné hrany materiálu při rychlosti řezání v pro materiál 11 600.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 15 – Naměřené hodnoty tvrdosti HV1 ve vzdálenosti d od řezné hrany materiálu při rychlosti řezání v pro materiál 12 060.1.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 16 – Naměřené hodnoty tvrdosti HV1 ve vzdálenosti d od řezné hrany materiálu při rychlosti řezání v pro materiál 14 109.3.....</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 17 – Naměřené hodnoty tvrdosti HV1 ve vzdálenosti d od řezné hrany materiálu při rychlosti řezání v pro materiál 19 824.1.....</i>	<i>86</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I:

PŘÍLOHA P I: BAREVNÉ ZNAČENÍ OCELÍ

Jakost oceli	Barevné odstíny		Jakost oceli	Barevné odstíny	
10004	oranžová		11600	zelená : modrá	
11109	stříbrná : černá		11700	fialová : růžová	
11110	zlatá : modrá		12010	zelená : bílá : červená	
11300	světlehnědá : bílá		12021	zelená : bílá : hnědá	
11301	hnědá : červená		12022	zelená : bílá : fialová	
11320	světlehnědá : zelená		12041	zelená : žlutá : fialová	
11321	hnědá : zelená		12050	zelená : červená : černá	
11330	světlehnědá : červená		12060	zelená : červená : hnědá	
11331	hnědá : růžová		12071	zelená : modrá : oranžová	
11343	černá : růžová		12090	zelená : černá : oranžová	
11353	žlutá : žlutá		13180	fialová : žlutá : zelená	
11373	černá : bílá		17041	červená : bílá : fialová	
11375	černá : modrá		17241	červená : zelená : fialová	
11378	černá : fialová		17246	červená : modrá : oranžová	
11500	černá : žlutá		17248	červená : hnědá : černá	
11523	černá : zelená	