

Vliv technologických parametrů na strukturu povrchu při obrábění ocelí výkonným laserem

Bc. Stanislav Rak

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Stanislav Rak**
Osobní číslo: **T13533**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv technologických parametrů na strukturu povrchu při obrábění ocelí výkonným laserem**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studii na dané téma
2. Provedte experimentální obrábění vybraných materiálů při změně vstupních parametrů výkonu a posuvové rychlosti pro různé tloušťky materiálů (h=5mm, h=10mm, h=15mm a h=20mm)
3. Vyhodnoťte vliv hloubky řezu na výslednou strukturu řezné plochy, (Ra, Rz, vlnitost, kuželovitost..)
4. Provedte statistické vyhodnocení výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015



doc. Ing. Roman Čermák, 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 Zlíně13.5.2015

.....


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). Odpirá-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 přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá nekonvenční metodou obrábění pomocí laseru při změně technologických parametrů. V teoretické části jsou v jednotlivých kapitolách shrnuty: princip laseru, typy laserů, způsoby použití, tepelné účinky záření, charakteristika kovových materiálů a bezpečnost práce s lasery. V praktické části jsou popsána jednotlivá použitá zařízení, která byla použita při obrábění neprůchozích drážek a řezání oceli i duralu. Dosažené výsledky jsou zhodnoceny na závěru každé kapitoly.

Klíčová slova: Laser, hloubka drážky, řezání laserem, obrábění, ocel

ABSTRACT

This thesis deals with an unconventional method of machining – the laser machining when technical parameters are changing. In the theoretical section, in each chapter are summarized: laser principle, types of lasers, methods of use, heat radiation effects, characterization of metallic materials and labor safety with lasers. The practical part describes each device that was used for machining grooves impassable, also for cutting steel and duralumin. Obtained results are evaluated at the end of each chapter.

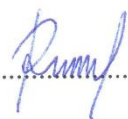
Keywords: Laser, groove depth, laser cutting, machining, steel

Poděkování:

Na tomto místě chci poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za odborné vedení, pomoc při řešení vzniklých problémů a zájem při vypracování práce. Nesmím opomenout pana doc. Ing. Vladimíra Patu za jeho volný čas, připomínky ke statistickému vyhodnocení práce a pomoc při manipulaci s vyhodnocovacím zařízením.

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

Ve Zlíně: 13.5.2015

.....


OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 LASER	11
1.1 DEFINICE LASERU	11
1.2 PŘEDNOSTI LASEROVÉ TECHNOLOGIE.....	11
1.3 HISTORIE LASERU	12
1.3.1 Vývoj.....	12
1.4 FUNKCE LASERU	15
1.4.1 Svazek laseru.....	16
1.4.2 Stimulovaná emise záření	16
1.4.3 Inverzní populace	17
1.5 ROZDĚLENÍ LASERŮ	17
1.6 ZÁKLADNÍ PŘEHLED PRŮMYSLOVÝCH LASERŮ	18
1.6.1 Nd:YAG laser.....	20
1.6.2 CO ₂ laser.....	20
1.6.3 Diskový laser.....	22
1.6.4 Vláknový laser	22
1.7 POUŽITÍ LASERŮ	23
2 TEPELNÉ ÚČINKY LASEROVÉHO ZÁŘENÍ	25
2.1 LASEROVÉ ŘEZÁNÍ	25
2.1.1 Sublimační řezání.....	26
2.1.2 Tavné řezání	26
2.1.3 Řezání plamenem	26
2.2 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ	27
2.2.1 Laserové svařování plastů	28
2.2.2 Laserové svařování kovových materiálů.....	30
2.3 VRTÁNÍ LASEREM.....	31
2.3.1 Vrtání jednotlivými impulsy a nárazové vrtání.....	32
2.3.2 Trepanační vrtání	32
2.3.3 Spirálové vrtání	32
2.4 LASEROVÉ ZNAČENÍ A GRAVÍROVÁNÍ	33
2.4.1 Značení a gravírování kovových materiálů.....	34
2.4.2 Značení a gravírování nekovových materiálů	35
2.5 3D OBRÁBĚNÍ	36
2.5.1 Laserem podporované obrábění	36
2.5.2 Obrábění laserem	37
2.5.2.1 Soustružení laserem	37
2.5.2.2 Frézování laserem	38
2.6 MIKROOBRÁBĚNÍ	38
3 KOVOVÉ MATERIÁLY	40
3.1 SPOLEČNÉ VLASTNOSTI	41
3.1.1 Tvárnost.....	41

3.1.2	Elektrická a tepelná vodivost	41
3.1.3	Typický kovový lesk, odrazivost viditelného záření.....	41
3.2	OCEL	42
3.2.1	Značení ocelí podle ČSN	42
3.2.2	Ocel třídy 11	44
3.2.3	Ocel třídy 12.....	45
3.2.4	Ocel třídy 14.....	46
3.2.5	Ocel třídy 19.....	46
3.2.6	Značení oceli dle EN	48
3.2.6.1	Číselné značení	48
3.2.6.2	Značení podle účelu použití a podle vlastností.....	48
3.2.6.3	Značení podle chemického složení	49
3.3	SLITINY OCELI	49
3.3.1	Slitiny hliníku.....	50
3.3.1.1	Duraly	51
4	BEZPEČNOST PRÁCE S LASERY.....	52
4.1	ZÁKLADNÍ DRUHY RIZIK.....	52
4.2	OCHRANA ZRAKU	52
4.3	OCHRANA KŮŽE	53
4.4	NEBEZPEČÍ ÚRAZU ELEKTRINOU.....	53
5	CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE	54
II	PRAKTICKÁ ČÁST	55
6	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ	56
6.1	LASER TRUMPF L3030	56
6.2	CARL ZEISS JENA	56
6.3	SYNCRONO CP 4000.....	57
6.4	MITUTOYO – SURFTEST SJ 301	57
6.5	TAYLOR HOBSON TALYSURF CLI 500	57
6.6	MIKROMETR MITUTOYO	58
7	EXPERIMENTÁLNÍ OBRÁBĚNÍ NEPRŮCHOZÍCH DRÁŽEK PŘI ZMĚNĚ TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ.....	59
7.1	TVAR VZORKŮ.....	59
7.2	ROZMÍSTĚNÍ DRÁŽEK NA PLOŠE VZORKU.....	59
7.3	POLOHA VZORKŮ PŘI ZKOUŠCE	60
7.4	PROVEDENÍ ZKOUŠKY.....	60
7.5	MATERIÁL VZORKŮ.....	60
7.5.1	Ocel 1.0060 (11 600).....	61
7.5.2	Ocel 1.1219 (12 060).....	61
7.5.3	Ocel 1.3505 (14 109).....	62
7.5.4	Ocel 1.3355 (19 824).....	63
7.6	MĚŘENÍ HLOUBKY DRÁŽEK A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT.....	64
7.6.1	Ocel 1.0060 (11 600).....	64
7.6.2	Ocel 1.1219 (12 060).....	67
7.6.3	Ocel 1.3505 (14 109).....	70

7.6.4	Ocel 1.3355 (19 824).....	73
7.7	GRAFY ZÁVISLOSTÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	76
7.7.1	Výkon P = 250 W	76
7.7.2	Výkon P = 290 W	77
7.7.3	Výkon P = 335 W	78
7.8	CELKOVÉ SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	79
8	EXPERIMENTÁLNÍ ŘEZÁNÍ OCELI A DURALU PŘI ZMĚNĚ TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ	82
8.1	TVAR VZORKŮ.....	82
8.2	DRSNOST POVRCHU	82
8.3	PROFIL DRSNOSTI	83
8.4	VLNITOST POVRCHU	84
8.5	MATERIÁLY VZORKŮ.....	85
8.5.1	Ocel 1.0038 (11 375).....	85
8.5.2	Dural ocel 3.1355 (42 4203)	85
8.6	PROVEDENÍ ZKOUŠKY	85
8.7	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	86
8.7.1	Dural ocel tloušťky 10 mm	87
8.7.2	Dural ocel tloušťky 5 mm	91
8.7.3	Ocel tloušťky 20 mm.....	95
8.7.4	Ocel tloušťky 10 mm.....	99
8.8	POROVNÁNÍ DRSNOSTI VE 3D.....	103
8.9	KUŽELOVITOST	105
8.10	MĚŘENÍ KUŽELOVITOSTI A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT.....	106
8.10.1	Dural ocel tloušťky 10 mm	106
8.10.2	Ocel tloušťky 10 mm.....	107
	ZÁVĚR	110
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	112
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	117
	SEZNAM OBRÁZKŮ	118
	SEZNAM TABULEK.....	122

ÚVOD

Za posledních 50 let se laserová technologie rozšířila snad do všech oborů lidské činnosti a běžně ji považujeme za každodenního pomocníka, aniž bychom si to uvědomovali. Na samotném počátku nebylo zcela jasné, k čemu přesně bude paprsek sloužit a jak ho využít v co nejlepší prospěch. Jelikož je člověk náležitě zvědavý a má tendenci si své činnosti jakkoliv usnadňovat, bylo jenom otázkou času, kdy nastane vývoj odpovídajících vynálezů. V dnešní době by si lidská společnost nedokázala svět bez nekonvenčních technologií představit.

Výrazem nekonvenční označujeme technologie, u kterých nedochází k úběru materiálu důsledkem použití mechanické práce, ale fyzikálních, chemických nebo kombinací obou zmíněných metod. Jednotlivé technologie můžeme v současnosti rozdělit do několika základních skupin, které jsou členěny podle způsobu a principu obrábění. Neodmyslitelně k nim patří i laserové technologie.

Aktuální požadavky na kvalitu, přesnost a životnost výrobků vyžadují při výrobě stále nové nekonvenční technologie. Z tohoto důvodu se při výrobě stále častěji setkáváme s technologiemi, které jsou mnohdy ekonomičtější a za kratší čas dosahují daleko lepších výsledků.

Diplomová práce spadá svou náplní do oblasti nekonvenčních technologií, konkrétně je zde řešena problematika související s laserovým obráběním vybraných druhů materiálů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LASER

Laserová technologie patří mezi nekonvenčních způsoby obrábění. Je považována za velké objevy 20. století. Termín laser znamená Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v českém překladu označuje: zesilování světla pomocí stimulované emise záření. K zesílení světla dochází pomocí průchodu fotonů médii se zadanými charakteristickými vlastnostmi.

Laser je tedy optický zdroj elektromagnetického záření (světla), kdy je světlo laserem vyzařováno ve formě úzkého svazku a na rozdíl od přirozených světelných zdrojů je výrazně specifický svou odlišností. [1]

1.1 Definice laseru

Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Laserové světlo vzniká v prostředí uvedeného elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. Spontánní emise záření vzniká tedy v ten moment, kdy vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a při tom emitují určité množství světelného záření s frekvencí ν , která se jednoduše určí z následující rovnice (1):

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

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

$E_2 - E_1$ – Rozdíl energií hladin, mezi kterými nastává přechod

ν – Frekvence uvolněného vlnění [2]

1.2 Přednosti laserové technologie

- Kvalita a přesnost
- Reprokovatelnost
- Vysoká flexibilita
- Možnost použití mnoha materiálů
- Bezkontaktní a čisté zpracování
- Minimální ovlivnění okolního prostředí
- Žádný spotřební materiál
- Dlouhá životnost [3]

1.3 Historie laseru

Současné lasery mohou být založeny na kvantových přechodech v plynech, pevných látkách, kapalinách, plazmatu nebo mohou využívat polovodiče i relativistické elektronové svazky. V roce 1917 se datuje první zmínka základního konceptu laseru, který prezentoval Albert Einstein v jednom ze tří dokumentů o kvantové teorii záření. Funkční rubínový laser byl představen v roce 1960 T. H. Maimanem. Jednalo se o rubínový laser s vlnovou délkou 694,3 nm. Ve srovnání s dnešními lasery byl velmi nedokonalý a ani zdaleka tak efektivní. Jelikož využíval jen tři energetické hladiny krystalu rubínu, mohl pracovat pouze v pulsním režimu. Tento nedostatek odstranili fyzici N. G. Basov, A. M. Prochorov a Ch. H. Townes tím, že použili více energetických hladin, čímž bylo umožněno ustavení populační inverze, a tím i souvislé činnosti laseru. Za svůj společný objev obdrželi v roce 1964 Nobelovu cenu. [4]

1.3.1 Vývoj

Kromě rubínového laseru se vyvíjely i další druhy v různých odvětvích. Pro průmyslové využití se postupně dostávalo čím dál víc inovací.

- 1961 – Q – spínání

Spínání umožňuje krátké impulsy s velmi vysokým výkonem v rozmezí nanosekund. Začalo se používat jako svařování pružin na hodinky.



Obr. 1 – Pružinka u hodinek (1961) a laserové diody (1962) [5]

- 1961 – Nelineární optika

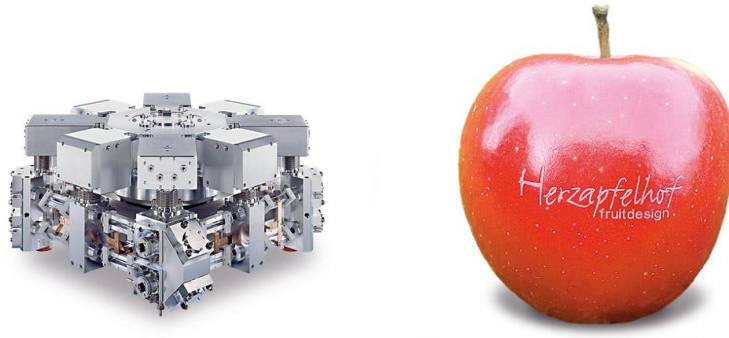
Vynález laseru byl klíč k uvedení teorii nelineární optiky do praxe. To umožnilo rozvoj zavedení mnoha elektrických zařízení do tohoto odvětví.

- 1962 – Vytvořeno laserové světlo z polovodičového laseru.

Polovodičový laser byl zkoumán od roku 1955. Po vytvoření v roce 1962 bylo až v roce 1980 zavedeno do komunikačních technologií.

- 1964 – Vznik CO₂ laseru

CO₂ laser byl první laser, který neumožňoval příliš vysoký výkon pro laserové zpracování materiálů a laserové obrábění.



Obr. 2 – Rezonátor CO₂ laseru (1964) a značení potravin (1965) [5]

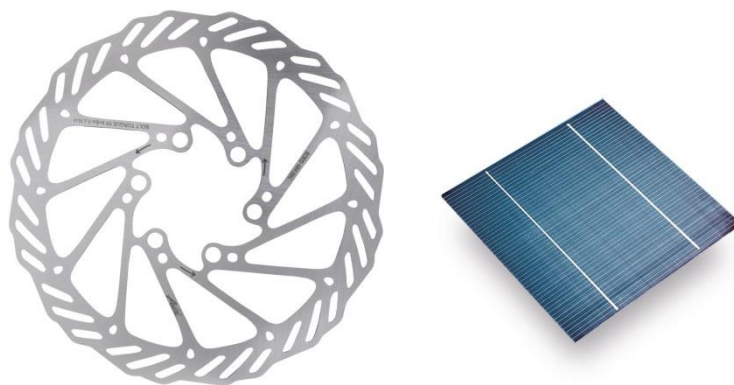
- 1965 – Značení laserem

Myšlenka označovat kovy laserem byla pozoruhodná. Přesto trvalo více než 10 let, kdy našla tato technologie široké uplatnění.

- 1966 – Polovodičový laser

Stal se základem pro funkci mnoha laserů. Byl označován také jako barvivový.

- 1967 – Uvedení první pomocné tryska plynu pro výkonné lasery na řezání plechu.



Obr. 3 – Brzdový kotouč (1967) [5] a solární článek (1971) [6]

- 1968

Komprese impulsů, umožnila zvýšit intenzitu laserového paprsku bez zvyšování požadavků na energii.

- 1971 – Micro vrtání

Tato technologie hraje důležitou roli při produkci vysoce účinných solárních článků.

- 1971 – Vrtání otvorů laserem na lopatkách turbín letadel.

Tato aplikace rozmohla vývoj přesného víceosého navigačního systému a počítačové řízení paprsku zaměření.



Obr. 4 – Lopatka turbíny (1971) a dveře auta (1982) [5]

- 1982 – Svařování „na míru“.

Tato technika nesmírně přispěla k návrhu a výrobě výrobků s nižší hmotností a více energeticky účinných silničních vozidel. Více než 400 automatizovaných laserových zařízení byly v současné době instalovány po celém světě a jejich počet se nenávratně zvyšoval.

- 1988 – Diodový čerpací laser

Laser s čerpáním pomocí diodového laseru umožnil širší aplikaci ve svařování, řezání, děrování a značení.

- 1990

Objevuje se mnoho zdokonalení stávajících technologií a různých nových nápadů, jejichž uplatnění ukáže až čas.

- 1992 – Stent řezání

Názorný příklad toho, jak velkou vyvolal laser ve zdravotnickém zařízení revoluci. Od prvního aplikování se stal nástrojem, po kterém se rychle zvedla poptávka.



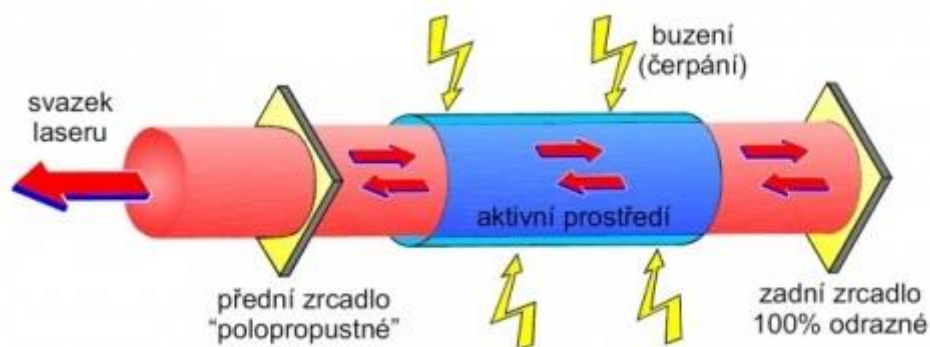
Obr. 5 – Stent řezání [5]

- Od roku 2000

V současné době laserová technologie vytváří více a více nápadů, než kdy jindy. Ale který z nich se postupně zařadí mezi zásadní nápady, se teprve uvidí.

1.4 Funkce laseru

Základním prvkem laseru je aktivní prostředí, které je nějakým způsobem buzeno (opticky, elektricky apod.). Buzením dodáváme do laseru energii, která je poté pomocí procesu stimulované emise vyzařena v podobě laserového svazku. K tomu je ještě zapotřebí vytvořit tzv. optický rezonátor, který je nejčastěji tvořen odraznými zrcadly. Obecné schéma laseru je znázorněno na následujícím obrázku.



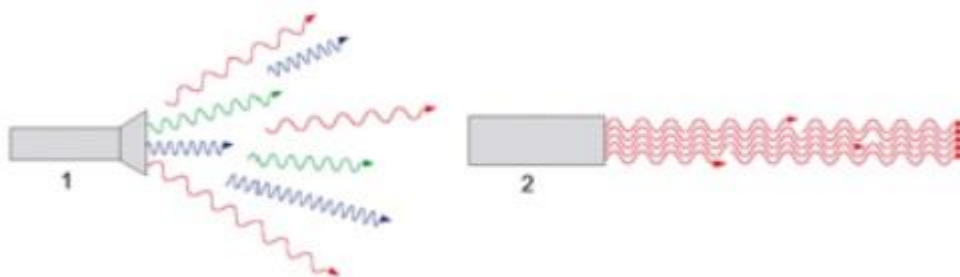
Obr. 6 – Obecné schéma laseru [4]

Jedinečnost této technologie spočívá v tom, že při procesu stimulované emise má dopadající i emitovaný foton stejnou energii (frekvenci), směr, polarizaci a fázi. Z tohoto důležitého faktoru plynou tři základní vlastnosti laseru, které jej výrazně odlišují od ostatních zdrojů záření. [7]

1.4.1 Svazek laseru

1. Usměrněný – fotony jdou jedním směrem po souběžné dráze (nerozbíhají se), tím pádem se tvoří jednolitý světelný svazek s minimálním rozptylem. Paprsek tak může být velmi dobře veden a jeho veškerý výkon lze zaměřit na extrémně malé ohnisko.
2. Monochromatický – neboli jednobarevný. Vyzářené fotony mají v laserovém paprsku stejnou frekvenci resp. vlnovou délku. Ta je stanovena energetickými přechody v látkách, které vyzařují laserové světlo.
3. Koherentní – generované fotony jsou ve fázi časové i prostorové, kde jejich kmitání je synchronní a vlnění má stejnou fázovou polohu.

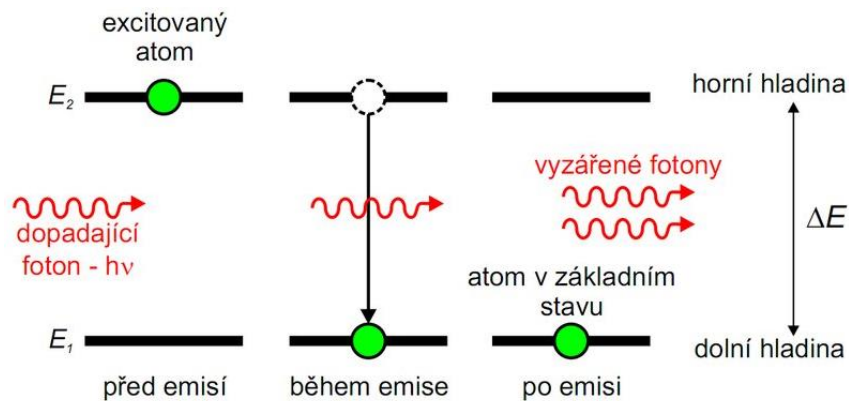
Typickým opakem laseru je např. klasická žárovka, která produkuje smíšené záření v několika směrech o různých vlnových délkách a s náhodnou fází. Koherence je podstatná v aplikacích, kde se technicky využívá interferencí (např. měřicí technika). [4]



Obr. 7 - Nekoherentní záření svítivny (1), Monochromatické koherentní laserové záření (2) [4]

1.4.2 Stimulovaná emise záření

Jde o proces, který poprvé zavedl světoznámý fyzik Albert Einstein v roce 1912. Příchozí foton naráží na vybuzený atom aktivního média laseru mezi nižší a vyšší energetickou hladinou. Tento přechod je podmíněný existencí budícího elektromagnetického záření. Výsledné záření má stejnou frekvenci, stejný směr pohybu a fázovou polohu jako měl původní příchozí foton. [7]



Obr. 8 – Stimulovaná emise [8]

1.4.3 Inverzní populace

Přítomnost populační inverze je nutným předpokladem pro stimulované emise. Jedná se o přebytek částic na vyšších energetických hladinách vůči počtu částic na hladinách nižších. Z nižší energetické hladiny jsou vybuzeny elektrony do vyšší energetické hladiny. Samotnému procesu vybuzení se za přítomnosti elektrické, optické nebo chemické energie také říká čerpání. [7]

1.5 Rozdělení laserů

Lasery můžeme dělit podle:

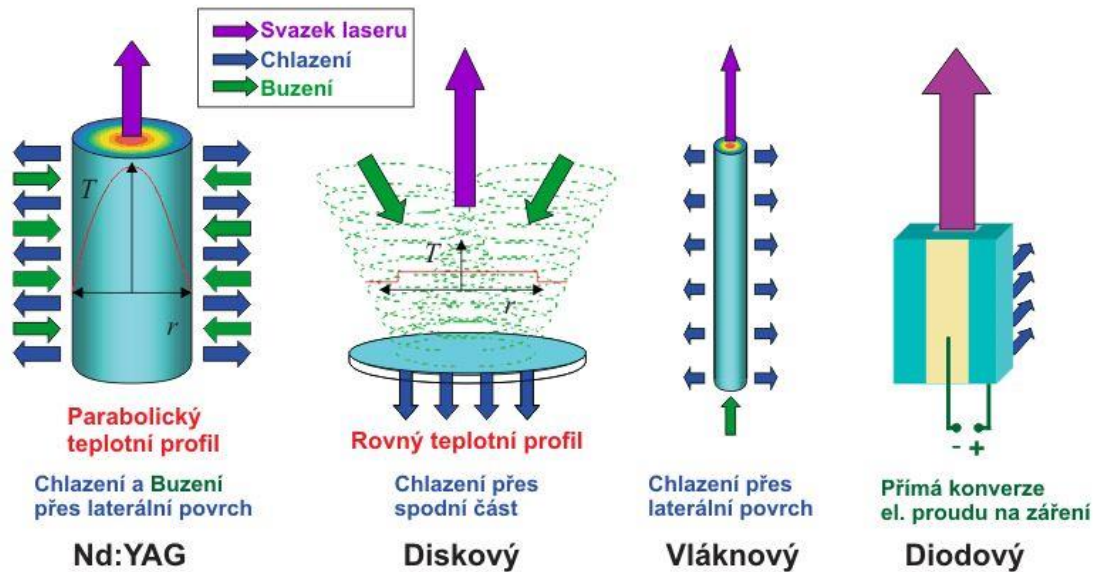
- a) Aktivního prostředí
 - b) Výkonu
 - c) Způsobu čerpání energie
 - d) Režimu paprsku
 - e) Vlnové délky
 - f) Použití
- a) Podle aktivního prostředí
- Plynové – atomární, iontové, excimerové
 - Kapalinové
 - Pevnolátkové
 - Diskové
 - Vláknové

- Polovodičové
- b) Podle dosahovaného výkonu
 - Nízkovýkonové – desetiny W až stovky W
 - Vysokovýkonové – 1 KW až 30 KW
- c) Podle způsobu čerpání energie
 - Optické
 - Elektrické
 - Chemické
 - Termodynamické
- d) Podle režimu paprsku
 - Kontinuální
 - Pulzní
 - Impulsní
- e) Podle vlnové délky
 - Infračervené
 - V oblasti viditelného pásma
 - Ultrafialové
 - Rentgenové
- f) Podle použití
 - Výzkumné
 - Měřicí
 - Lékařské
 - Technologické
 - Energetické
 - Vojenské [9]

1.6 Základní přehled průmyslových laserů

V současnosti se využívá pět hlavních typů laserů, které jsou uvedeny v následující tabulce. Každý z nich se pak dále dělí podle typu buzení, pracovního režimu (kontinuální, pulsní) a dalších jiných parametrů. Jednotlivý typ má svoje výhody/nevýhody a také specifické

aplikace, pro které je nejlépe vhodný. Již zmíněná tabulka udává naprosto základní přehled jednotlivých typů laserů, kde je třeba brát jejich uvedené parametry s nadhledem. [10]



Obr. 9 – Schéma chlazení a buzení jednotlivých laserů [10]

Tab. 1 – Základní přehled průmyslových laserů [10]

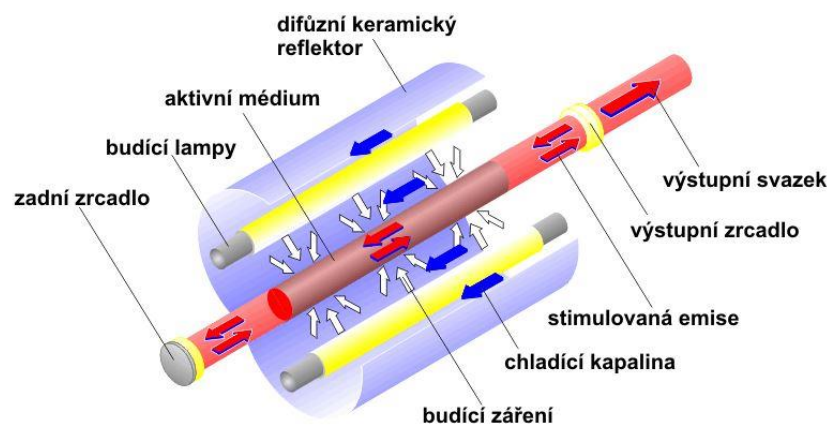
Laser	Vlnová délka (nm)	Buzení	Efektivita	Režim	Výkon / Energie	Typické aplikace	Údržba	Životnost (h)
Nd:YAG	1064	LD	7%	CW	až 6 KW	Ř,S	Ano	10 000
				Pulsní	100 W	Z,G		1000
		Lampy	3%	Pulsní	600 W	S		
CO ₂	10600	RF	10%	CW/pulsní	10 - 250 W	Z,G,Ř,nk	Ano	20 000
					až 5 KW	Ř,S		-
		El.	25%		až 20 KW			
Diskový	1070	LD	15%	CW	až 16 KW	Ř,S	Ano	10 000
Vlákňový	1070	LD	30%	CW	až 80 KW	Ř,S	Ne	100 000
				QCW	1,2 KW	Z,G,M		
				Pulsní	100 W			
Diodový	808 - 980	El.	60%	CW	až 10 KW	S,K,N	Ne	15 000

Pozn: LD – Laserové diody; RF – Radio frekvenčně; El – Elektricky (výboj, proud); Ř – Řezání; S – Svařování; Z – Značení; G – Gravírování; K – Kalení; N – Nanášení

vrstev; M – Mikroobrábění; Nk – Někvy; CW – Kontinuální; QCW – Kvazi kontinuální

1.6.1 Nd:YAG laser

Samotná zkratka Nd:YAG označuje aktivní médium. Tím je izotropní krystal Yttrium Aluminiový Granát ($Y_3Al_5O_{12}$) s postupně přidávanými ionty neodymu (Nd^{3+}). Yttritohlinitý granát je bezbarvý, opticky izotropní krystal kubické struktury. Pro tyto druhy laseru je nejvýznamnějším, protože způsob výroby a zpracování je technologicky zvládnutelný proces. Jedná se o historicky nejstarší typ aplikovaného laseru používaného v průmyslu. Budí se buď výbojkami (LPSS), nebo laserovými diodami (DPSS). Lasery s výbojkami mají nízkou účinnost změny elektrické energie na světelnou, protože se velká část energie výbojky nevyužije a přemění na teplo. Tím pádem se musí chladit vodou. Používají se zejména v pulsním režimu u svařování laserem a vrtání. Lasery s diodami mají vyšší účinnost a taktéž lepší kvalitu svazku. Hlavní použití je pro značení a gravírování kovů, plastů a dalších materiálů. Mají vyšší účinnost, delší životnost a menší požadavky na chlazení, než LPSS. Jelikož jejich používání nepatrně klesá, jsou pomalu nahrazovány vláknovými pulsními lasery, které nabízejí v podstatě pouze výhody. [10]



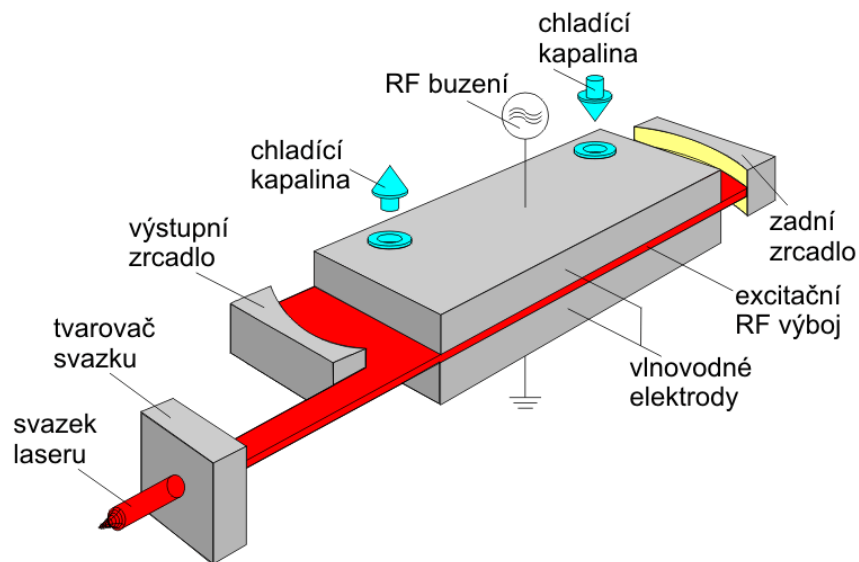
Obr. 10 – Schéma Nd:YAG laseru buzeného lampami [10]

1.6.2 CO₂ laser

CO₂ lasery patří do skupiny plynových laserů, kde je jejich aktivní prostředí směs plynů obsahující převážně oxid uhličitý. V průmyslu se používají lasery buzené buď radiofrekvenčně, nebo elektrickým výbojem. Z hlediska možnosti uzavření rezonátoru se dělí na lasery s hermeticky uzavřeným rezonátorem a na průtočné lasery, kdy plyn rezonátorem neustále proudí, který se uplatní u laserů s vysokým výkonem. Aktivní plyn se budí pomocí

radio-frekvenčního vlnění, které probíhá mezi dvěma elektrodami a současně zajišťuje difúzní chlazení plynu v rezonátoru. Tyto lasery se vyznačují vysokou spolehlivostí, dlouhou životností a nízkými provozními náklady. Využívají se pro značení, gravírování a řezání nekovových materiálů převážně tam, kde nelze použít lasery s vlnovou délkou 1 μ m. Další průmyslovou aplikací je řezání a svařování kovů. [10]

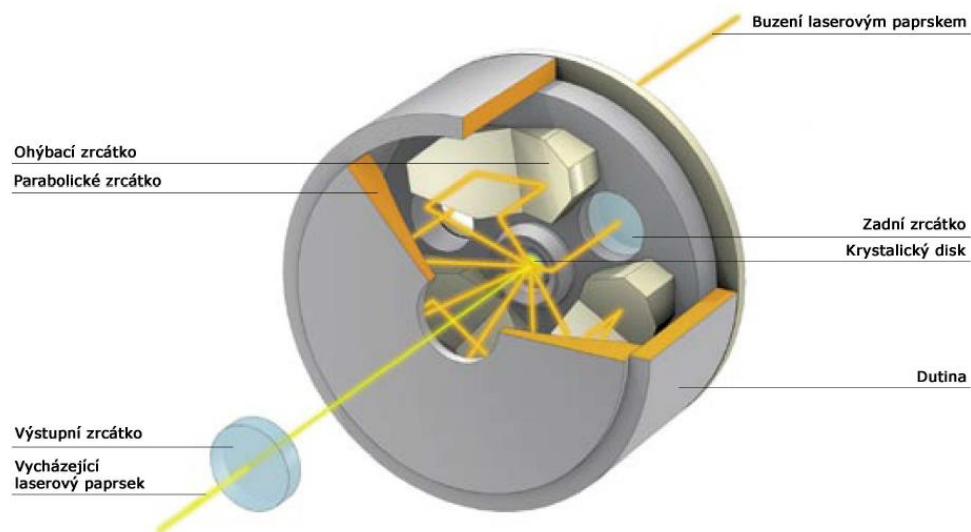
- S pomalým axiálním prouděním – Jedná se o nejstarší typ CO₂ laseru s pomalým prouděním plynů v rezonátoru. Aktivnímu prostředí se přivádí energie prostřednictvím střídavého, nebo stejnosměrného elektrického výboje. Ten má identický směr s osou rezonátoru. Dosahuje se stabilního výstupního výkonu a kvalitní módovou strukturou svazku záření.
- S rychlým axiálním prouděním – Aktivní plyn plyne dutinou laseru poměrně vysokou rychlostí. Chlazení je zajišťováno mimo dutinu rezonátoru. Konečná módová struktura svazku záření je celkově správná, ale často může dojít k rychlým fluktuacím modu, což pak vede ke zhoršení kvality řezu.
- S příčným prouděním – Laserový svazek, proud plynu a zároveň elektrický výboj jsou ve třech různých směrech. Tento typ laseru nemůže být všeobecně pulsován. Jejich módová struktura je pro řezání nejvíce prospěšný, než u jiných druhů CO₂ laserů. Jsou používány u svařování a tepelného zpracování. [11]



Obr. 11 – Schéma a popis CO₂ laseru [10]

1.6.3 Diskový laser

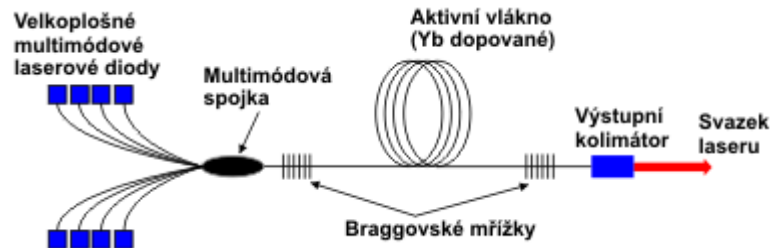
Princip diskového laseru je podobný jako u laseru Nd:YAG. Jako aktivní prostředí je zde ale používán malý disk. Značnou výhodou je teplotní profil po celém disku, který lze vidět na obrázku č. 13. Ten umožňuje dosáhnout vyšších výkonů a to až 16 KW společně s dobrou kvalitou výstupního svazku, což byl právě velký problém u laseru Nd:YAG. Diskové lasery se používají pro výkonově náročné operace, jako např. svařování a řezání kovů. Jejich nevýhoda je menší účinnost a nižší životnost, než u celkově vláknových laserů.



Obr. 12 – Schéma a popis diskového laseru [10]

1.6.4 Vláknový laser

Typ laseru, u kterého se vytváří záření v místě jádra optického vlákna spolu s dalšími přidanými chemickými prvky. Laser je technologicky novodobým zařízením, u kterého je aktivní prostředí dlouhé optické vlákno dopované yterbiem. Způsob buzení je pomocí diod vedeno přes optickou spojku do aktivního vlákna, kde jsou místo zrcadel tzv. Bragovké mřížky, které představují struktury vytvořené přímo na optickém vlákne. Velkou výhodou tohoto laseru je jeho jednoduchost, robustnost a modularita. Dalšími výhodami jsou vysoká účinnost, životnost, kvalita svazku a téměř žádné nároky na údržbu. [10]



Obr. 13 – Schéma a popis vláknového laseru [10]

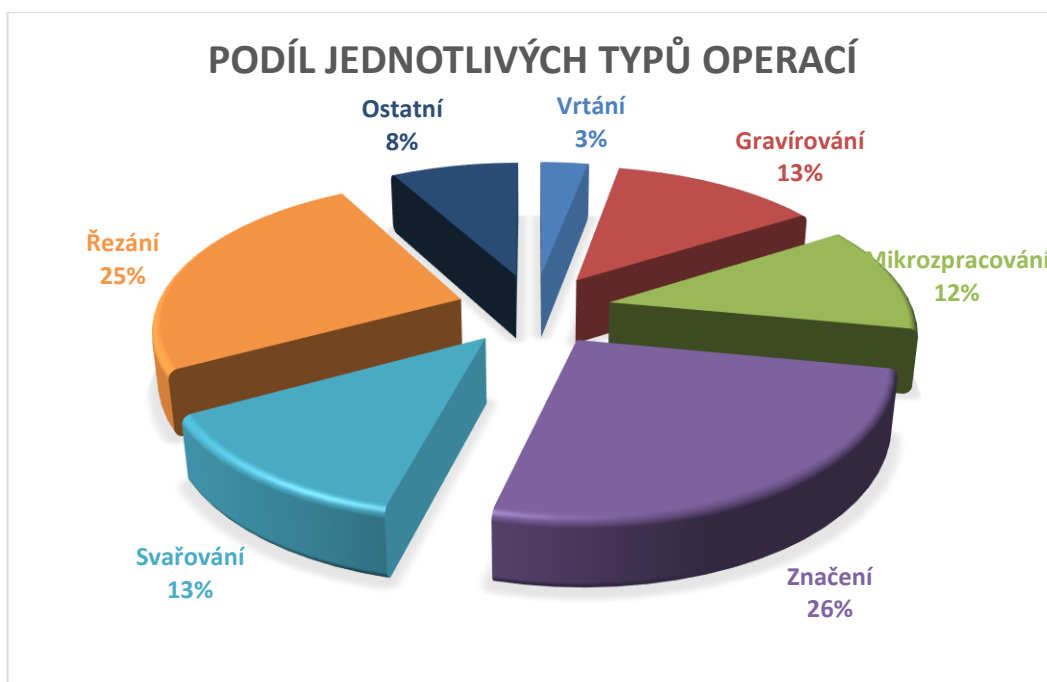
1.7 Použití laserů

S laserem se denně setkáváme v běžném životě a často si to ani neuvědomujeme. Např. ve formě snímače čárových kódů v obchodech, u ukazovátek, u přístrojů v lékařství, na zařízeních určené k zaměřování a měření vzdáleností a dalších. V dnešní době má evidentně velmi široký rozsah použití a můžeme jej rozdělit do 4 základních skupin.

- V průmyslu
 - Svařování
 - Řezání
 - Gravírování
 - Vrtání
 - Mikroobrábění
 - Měření vzdáleností
- V holografii
 - Funkce hologramů
- V lékařství
 - Dermatologie
 - Oční operace
 - Chirurgie
 - Onkologie
 - Stomatologie
- Ostatní
 - Ekologie
 - Fyzika, jaderná fyzika
 - CD, DVD, Blu-Ray
 - Laserové kopírky a tiskárny
 - Metrologie [12]



Obr. 14 – Laserový mikroskop, snímač čárového kódu, zařízení k měření vzdáleností [13]



Obr. 15 – Podíl jednotlivých typů operací [14]

2 TEPELNÉ ÚČINKY LASEROVÉHO ZÁŘENÍ

Díky možnosti soustředění svazku na velmi malý průměr, je laser zdrojem záření s vysokou plošnou hustotou o velmi silném výkonu. Krátce po sestrojení vůbec prvního laseru se stal postupem času nepostradatelným nástrojem v oblasti vrtání, řezání, svařování nebo úpravy povrchů součástí díky vysoké kvalitě opracování bez mechanického kontaktu.

Laserový paprsek dokáže materiál:

- Ohřívat (kalit, pájet)
- Tavit (řezat, svařovat)
- Odpařovat nebo rozkládat (vrtat) [9]

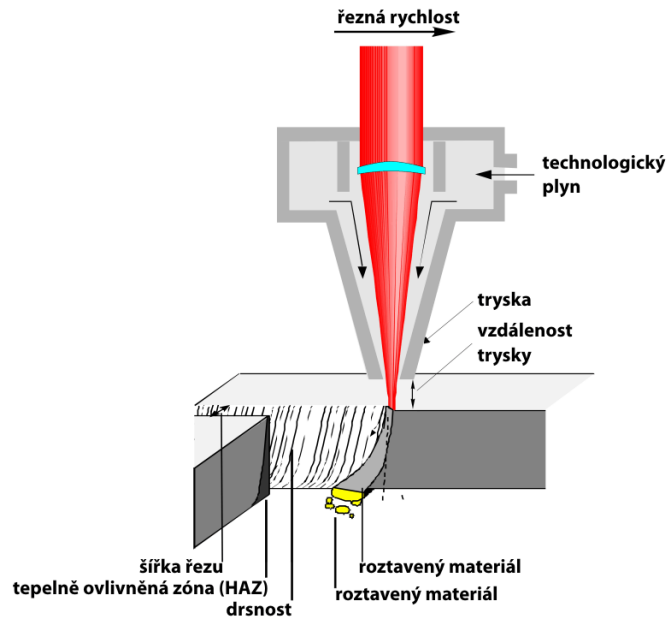
2.1 Laserové řezání

Řezání a dělení laserem patří mezi nejrozšířenější laserovou technologií s možností použití pro širokou škálu jednotlivých materiálů. Mezi které spadá například papír, karton, dřevo, textilie, ale i až 30 mm tlustá ocel. Laserové řezání je výrazně přesnější, rychlejší a ekonomičtější v porovnání s tradičními technikami řezání.

Pro laserové řezání se v současnosti používají především CO₂ lasery nebo vláknové lasery, které jsou zasazené v 2D plotterových, nebo v 3D robotických systémech. V těchto strojích se laser pohybuje nahoře, případně kolem zpracovávaného materiálu a vyřezává do něj tvar podle zadaného výrobku. Laser je také možné použít pro tzv. vzdálené řezání, kdy se laserový svazek přivádí k pracovnímu místu pomocí optiky, zatímco izolovaná hlava zůstává nehybně uložena v těle zařízení. V tomto případě bývá řezání rychlejší než u plotterů nebo robotů.

Laserem je možné řezat:

- Kovy - ocel, hliník, bronz, stříbro, mosaz, měď
- Nekovové materiály - plast, guma, akrylát, papír, dřevo, překližka, textil, kůže, pryž, kevlar a další [15]



Obr. 16 – Princip laserového řezání [16]

2.1.1 Sublimační řezání

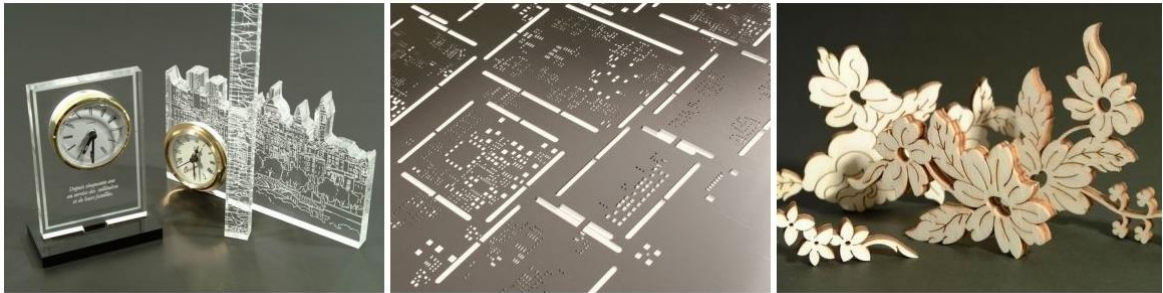
Pulsní laserový paprsek ohřívá materiál na teplotu varu. Materiál je z místa řezu odpařován pomocí vysoké intenzity laserového řezání, kterou je dosaženo vhodným nastavením parametrů laseru a fokusační optiky. Vytvořené kovové částičky jsou odfukovány pomocí technologického plynu. Používá se dusík nebo argon, aby nedocházelo k oxidaci materiálu. Jelikož téměř nedochází k tavení materiálu, je řez kvalitní, hladký a bez otřepů.

2.1.2 Tavné řezání

Tavné řezání vyžaduje nižší výkony, než sublimační řezání. Dochází zde pouze k tavení materiálu a ten je následně vyfukován proudem plynu. Povrch řezných ploch je kovově lesklý, bez oxidů i charakteristického oxidového zbarvení. Typickými materiály pro tavné řezání jsou například vysoce legované oceli, měď, hliník, nikl a nekovové materiály jako je keramika, plexisklo, dřevo atd.

2.1.3 Řezání plamenem

Díky vysoké řezné rychlosti se řezání plamenem používá u běžných a konstrukčních ocelí. Místo inertního plynu se používá jako asistenční plyn O_2 . Materiál je zahřát na určitou teplotu, kdy dojde k exotermické reakci, která dodává energii. Oproti sublimačnímu a tavnému řezání jsou řezné rychlosti zhruba dvakrát vyšší. Kvalita řezu sice není tak dobrá, ale pro velkou většinu aplikací se stala dostačující. [15]



Obr. 17 – Řezání plexiskla, kovů a překližky laserem [15]

2.2 Laserové svařování

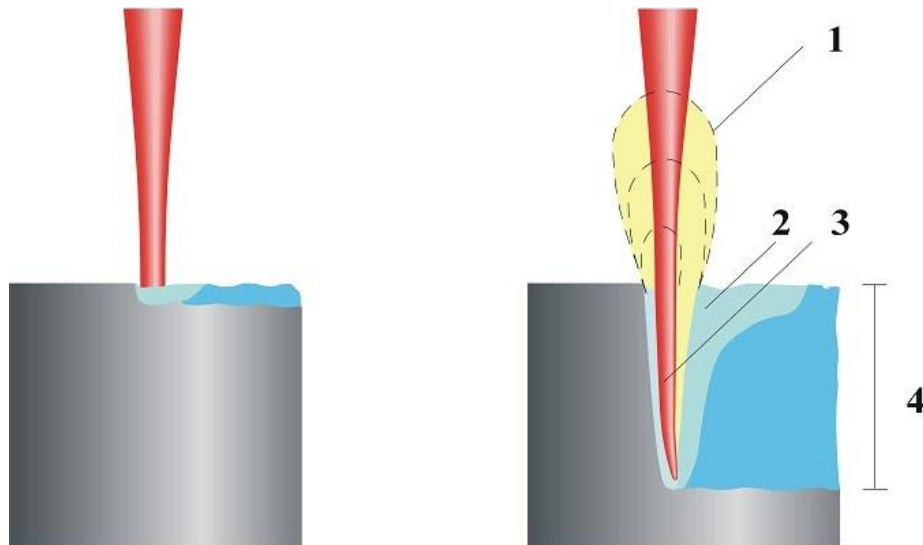
Technologie umožňující svařovat materiály, které se klasickými metodami spojí jen těžko nebo se svařit vůbec nedají. Vytváří nerozebíratelné spojení součástí o vysoké jakosti, spolehlivosti a dobrým vzhledem. Používá se například v oblastech svařování plastů a u složitých procesů svařování hliníku, mědi či mosaze. Výhodou je také vysoká pevnost, rychlost (až 15 m/min), kvalita svarů, opakovatelnost a také snadná automatizace procesu. Spolu s přídatnými materiály lze budoucí složení svarů ovlivňovat.

Laserem je možné svařovat materiály:

- Kovy - ocel, hliník, měď, bronz, mosaz, stříbro
- Nekovové materiály – plasty [17]

V následujícím obrázku jsou schematicky znázorněny dva základní mechanismy laserového svařování. Na levé části obrázku dochází k vedení tepla, kde se materiál taví absorpcí a na pravé části obrázku dochází pomocí působení vysoké plošné energie fokusovaného laserového svazku k tvorbě plasmu. Tím pádem zde začíná docházet k hlubokému provařování.

Laserový paprsek vytvoří kapiláru, která má průměr (1,5 – 2x) násobek průměru ohniska svazku. Vzniklý tlak vystupujících z kapiláry pak tedy brání jejímu uzavření. Plasma, která je umístěna nad povrchem materiálu, modifikuje podobu kapiláry. Ze stěn kapiláry se následně dostává vložená energie laserového paprsku do materiálu. Paprsek může pak pronikat hluboko a vytváří tzv. keyhole, který v upraveném překladu znamená lokální díra. Tím se uvnitř kapiláry zlepšuje absorpce v místě dopadu laserového paprsku a vznikne úzký a hluboký svár.



Obr. 18 – Princip laserového svařování

(1. Plasma, 2. Roztavený materiál, 3. Lokální díra, 4. Hloubka svaru) [18]

Svařování a jeho stabilita je závislá na mnoha parametrech:

- Vlastnosti a parametry svařovaného materiálu
- Vlnová délka laseru
- Rychlost svařování (posuvu)
- Objem a typ asistenčního plynu
- Polarizace laserového zařízení
- Poloha ohniska paprsku vůči trysce a povrchu svařovaného materiálu [18]

2.2.1 Laserové svařování plastů

Ve srovnání s obvyklými metodami svařování umožňuje svařování plastů jakostní spojení materiálů s minimální degradací. Hlavními výhodami jsou vysoká kvalita svarů, produktivita, svařování i při vysokých teplotách a vzhled svarů. Velikou výhodou je i celá bezkontaktnost procesu s dobrým cílením tepelného zatížení. Je možné svařovat téměř všechny druhy plastů. Záleží zde na chemické kompatibilitě, absorpci a složení příměsí.

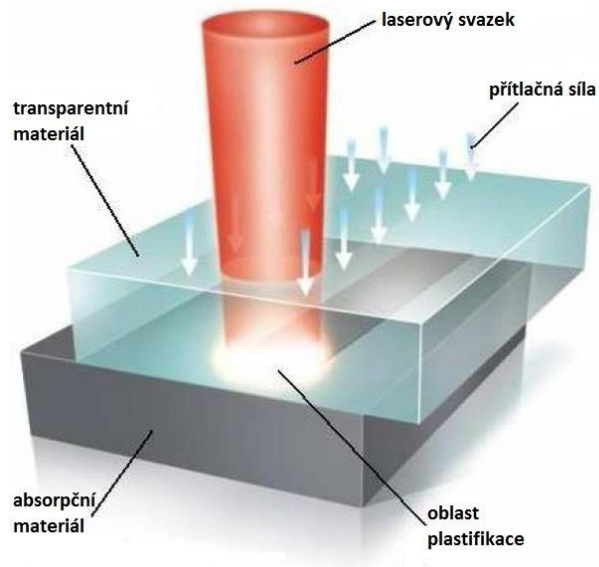
Ve většině případů se využívá propustné svařování, tj. svařování transparentního a neprůhledného materiálu. Používají se diodové nebo pevnolátkové lasery o výkonech do 200W. Velmi často se využívá skenovací optika místo klasické statické svařovací hlavy.

Rozdělení:

- Propustné svařování (Transmission welding)
- Přímé svařování (Direct welding)

Přednosti:

- Kvalita svarů
- Vysoká pevnost
- Rychlost procesu
- Opakovatelnost, bezkontaktnost
- Lokální ohřev na malých plochách
- Rychlé ochlazení
- Možnost svářet materiály různých druhů
- Malá deformace výrobku
- Spolehlivost v sériové výrobě [19]



Obr. 19 - Princip transmisivního svařování [19]

2.2.2 Laserové svařování kovových materiálů

Jedná se o efektivní metodu spojování kovových konstrukčních materiálů. Vyznačuje se vysokými rychlostmi, minimálními deformacemi spojovaných dílů a velmi úzkou tepelně ovlivněnou oblastí. Technologie svařování je vhodná tam, kde je nutné zrealizovat velmi náročné precizní svary z hlediska kvalitativního a z hlediska sériové a hromadné výroby při požadavku automatizace tohoto procesu. Používá se především tedy v automobilovém průmyslu, přesném strojírenství, zbrojní výrobě, elektrotechnické výrobě (výrobě článků, konektorů), výrobě zdravotnické techniky (zubní technologii, výrobě chirurgických nástrojů a medicínských komponentů), obrábění tenkých kovových plechů, výrobě svařovaných profilů a trubek, tepelných výměníků, hřídelí, ozubených kol, apod. Dále je lze aplikovat kromě výrobních operací také v opravárenství (vytváření a opravy nástrojů a forem). V průmyslovém svařování se dříve využívala CO₂ nebo Nd:YAG technologie. Obě jsou ale již několik let nahrazovány vláknovými lasery v pulzním nebo kontinuálním módu o výkonech několika desítek KW.

Přednosti:

- Lehce dosažitelné svary
- Produktivita, bezkontaktnost
- Možnost pracovat i na těžko dostupných místech
- Vysoká kvalita a hloubka svaru
- Svařovací linka není vidět
- Výsledek je odolný proti opotřebení [19]



Obr. 20 – Příklad svařování kovů [20]

2.3 Vrtání laserem

Lasery se používají i pro zhotovování děr velmi malých otvorů od 0,1 mm, nebo velmi přesných otvorů do kovových i nekovových materiálů v různých úhlech. Řadí se mezi nejstarší aplikaci laseru. Čím hlubší je vrtaná díra, tím více se odchyluje tvar díry od základní geometrie, což je způsobeno rozdělením energie paprsku. Jedná se o bezkontaktní, přesnou a reprodukovatelnou technologii použitelnou v místech, kde je to pomocí dalších metod hodně obtížné nebo zcela nemožné. Vrtané díry mohou být kruhové i tvarové a můžou být i 50 mm hluboké. Tato technologie se používá pro vrtání kamenů do hodinek, filtrů, vstřikovacích trysek a především do součástí turbínových motorů letadel. Otvory malých průměrů se na součásti nachází velmi blízko sebe a ve velkém počtu. Tím se dosahuje účinnějšího chlazení motoru letadla.

Používají se:

- CO₂ lasery - Vyřezávání otvorů, nejmenší průměr vyřezávaného otvoru je 5 mm, nejmenší průměr vrtané díry je 0,2 mm.
- Nd:YAG lasery - Vrtání děr o menším průměru, nejmenší průměr vrtané díry je 0,025 mm.
- Excimerové lasery - Vrtání děr do keramiky.

Laserem je možné vrtat materiály:

- Kovy - ocel, hliník, měď, bronz, mosaz, stříbro
- Nekovové materiály – plast, akrylát, papír, dřevo, překližka, kevlar

Přednosti:

- Vytváření velmi malých otvorů o průměru od 100 μm v místech, kde je to pomocí jiných metod obtížné nebo dokonce nemožné
- Přesnost, stabilita
- Rychlost, bezkontaktnost
- Nízké tepelné ovlivnění materiálu
- Možnost vrtání na těžko dostupných místech
- Dlouhá životnost technologie [21]



Obr. 21 – Ukázka vrtání laserem [22]

2.3.1 Vrtání jednotlivými impulsy a nárazové vrtání

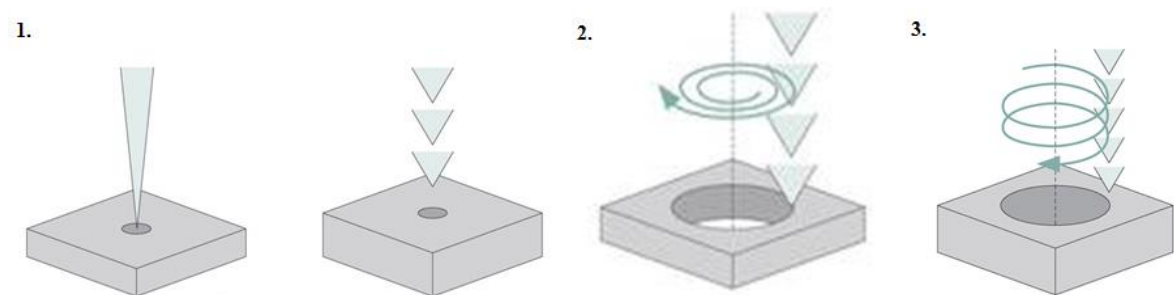
Jediný impuls laseru vytvoří otvor se srovnatelně velkou energií impulsu. Tímto způsobem lze velmi rychle vytvořit velké množství dalších děr. Při nárazovém vrtání vzniká otvor více impulsy laseru s pomoci nižšího trvání a menší energií impulsu. Tato metoda vytváří hlubší a výrazně přesnější otvory, než vrtání jednotlivými impulsy. A navíc umožňuje zhotovovat menší průměry otvorů.

2.3.2 Trepanační vrtání

Při trepanaci vzniká otvor také několika impulsy. Laser nejprve vyvrtá počáteční otvor pomocí nárazového vrtání, poté zvětší počáteční otvor tím, že obíhá nad obrobkem v několika zvětšujících se kruhových drahách. Největší část roztaveného materiálu je přitom uvolňována z otvoru směrem dolů.

2.3.3 Spirálové vrtání

U spirálového vrtání není potřeba vytvářet žádný počáteční otvor. Laser se pohybuje nad materiálem v kruhové dráze, kde tím způsobem vystupuje velké množství materiálu směrem nahoru. Laser se propracovává do hloubky ve tvaru spirály a přitom tedy může sledovat ohnisko. Jestliže laser pronikne materiálem, lze ještě přidat hloubku několika kruhových elementů. Ty slouží k rozšíření spodní části otvoru a začištění okrajů. Tímto typem vrtání lze vytvářet velmi velké a hluboké otvory o vysoké kvalitě. [23]



Obr. 22 – Ukázka vrtání laserem

(1. Vrtání jednotlivými impulsy a nárazové vrtání, 2. Trepanační vrtání, 3. Spirálové vrtání) [22]

2.4 Laserové značení a gravírování

Laser je také velmi vhodný na značení a hloubkové gravírování kovů, kdy se snaží vyznamenat vysokou přesností, rychlostí a flexibilitou. Existuje velmi málo omezení v gravírované grafice. Výsledkem použití této technologie je přesný a trvalý popis na výrobku, který lze odstranit pouze hrubou silou. Při gravírování laserový paprsek ubírá materiál. V obrobku vznikne prohlubeň tzv. gravura. V případě potřeby lze také vytvořit barevné oxidace, které výsledný popis ještě více zvýrazní. [24]

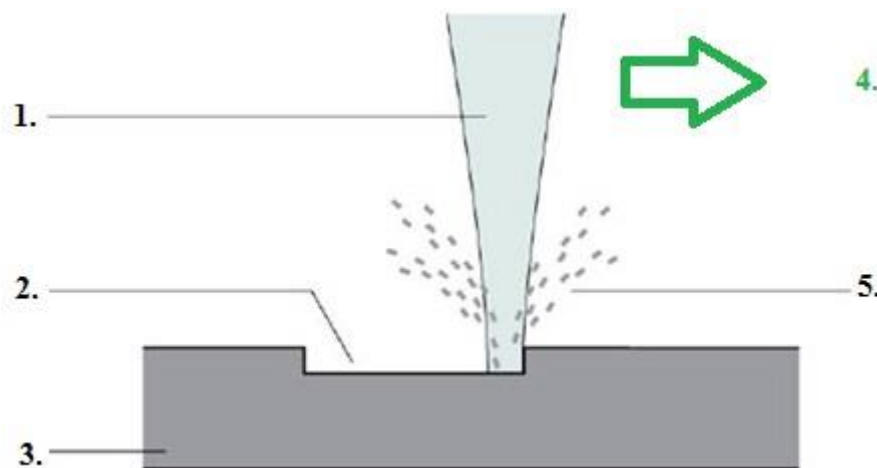
Díky výjimečnostem, jakých tato technologie dosahuje, se lasery čím dál více používají ke značení mikročipů, potravinových obalů, lepenky, laminátů a dalších. Výkony jsou tak vysoké, že základní materiál nebo vrchní vrstva se roztaví a odpaří, nebo zcela rozpadne. Je možné značit a gravírovat velmi složité tvary s jemnými a přesnými detaily rychlostí až 8 m/s respektive 450 bodů/s. Nejčastěji se používají CO₂ a pevnolátkové lasery uchycené do plotrů, nebo do tzv. systémů s rozmítací hlavou. U laserových plotrů se laser pohybuje v poloze nad materiálem, do kterého vyznačuje nebo gravíruje vzor podle zadaného modelu šablony. V systémech s rozmítací hlavou se samotný laser nehýbe, ale jeho svazek je pomocí speciální optiky dopravován k pracovnímu bodu. Značení s hlavou bývá rychlejší, protože na něj klade určitý vliv setrvačnost poměrně těžkého laseru, který se musí v plotrech nad materiálem různě pohybovat, ale méně přesné.

Laserem je možné gravírovat materiály:

- Kovy – ocel, hliník, měď, stříbro a mosaz
- Nekovové materiály - plast, guma, akrylát, papír, dřevo, překližka, sklo, korek, textil, kůže, pryž, kevlar a další

Přednosti:

- Nesmazatelnost
- Bezkontaktnost, originalita
- Minimální tepelné narušení povrchu
- Rychlost značení až 8 m/s respektive 450 bodů/s
- Kvalita a detailní ostrost popisu
- Možnost popisu nerovného povrchu [25252525]



Obr. 23 – Ukázka gravírování laserem

(1.Laserový paprsek, 2. Gravura, 3.Obrobek, 4.Směr obrábění,
5.Odštěpený materiál) [26]

2.4.1 Značení a gravírování kovových materiálů

Mezi nejdůležitější výhody gravírování kovů zahrnujeme vysoký kontrast a čitelnost popisované plochy, malou tepelně ovlivněnou zónu, vysokou rychlost až 8 m/s, nízké provozní náklady a dlouhou životnost. Používají se lasery o výkonosti 10 – 50W, např. pevnolátkové lasery – Fiber, nebo Nd:YAG.

Technologie je vhodná jako náhrada za raznice, termotransfery nebo DOD technologie. Lehce jdou značit čárové kódy, QR kódy, dlouhá sériová čísla, atd. Pomocí laseru se dají opracovávat skoro všechny kovové materiály – ocel, hliník, měď, mosaz a další. [27]



Obr. 24 – Příklad gravírování kovů [27]

2.4.2 Značení a gravírování nekovových materiálů

Jak již bylo zmíněno, laserová technologie umožňuje velmi rychlé a naprosto přesné značení a gravírování i těch nejjemnějších ornamentů, obrázků, čárových kódů apod. Především se používají CO₂ laserové zařízení.

Další z mnoha výhod je fakt, že jde o bezkontaktní metodu, která zabezpečuje jistotu umístění při obrábění a bezprašnost procesu. Prašnost bývá častým problémem hlavně v případech, kdy jsou plniva součástí plastů, jako např. vápenec nebo skleněné vlákna. Plast je používán zejména proto, že se s ním velmi dobře pracuje. Dá se nesmírně snadno tvarovat, ale i jednoduše gravírovat. Využívá se v potravinářství, ale i jako ochranné kryty, nebo firemní cedule. Při laserovém značení a gravírování je nutno myslet na to, že vznikají zplodiny, které je potřeba odsávat nezbytnými zařízeními (průmyslovými odsavači). [28]



Obr. 25 – Příklad gravírování a popisování plastových dílů [29]

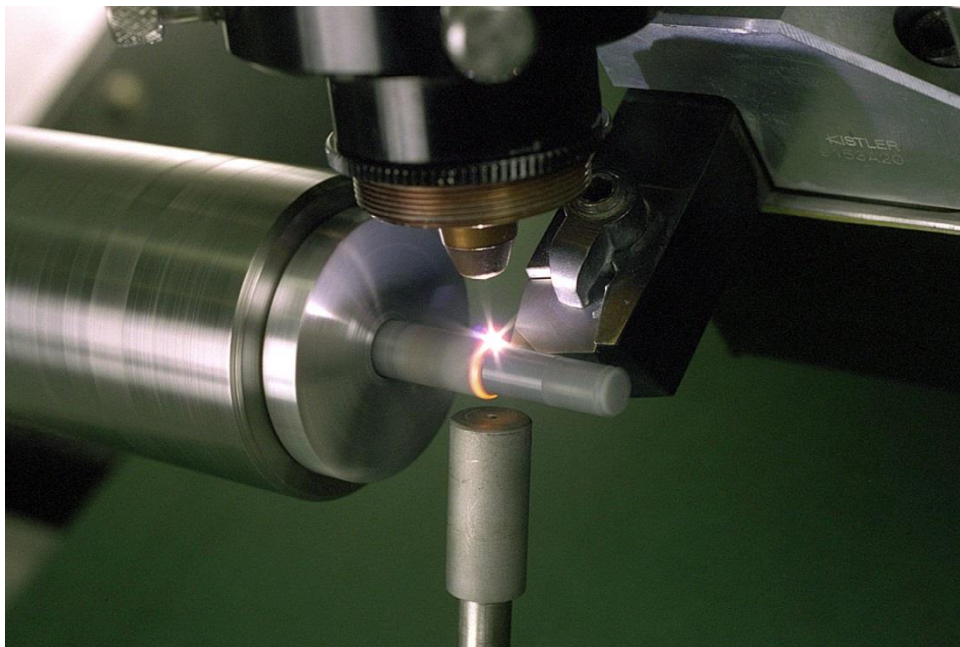
2.5 3D obrábění

Řezání laserem se řadí mezi dvourozměrné procesy a vrtání mezi jednorozměrný proces. Pro odebrání materiálu v trojrozměrném prostoru byly vyvinuty různé dílčí aplikace. Nejznámějšími z nich je laserem podporované obrábění (LAM) a obrábění laserem (LM).

2.5.1 Laserem podporované obrábění

Technologie, která se řadí mezi konvenční způsob obrábění, za účinku laseru jako tepelného předehřevu. Metoda, do které ještě zahrnujeme soustružení, frézování, broušení a další, je určena především pro obrábění keramických a těžko obrobitelných materiálů. Při obvyklém obrábění těchto materiálů je potřeba dosáhnout pomalých rychlostí, aby nedocházelo ke vzniku povrchových a podpovrchových vad.

Laserem podporované obrábění nabízí z hlediska ekonomiky převážně efektivní volbu, kde je možné odebrat materiál s větší šířkou záběru ostří, dosahovat také vyšších životností nástroje a minimalizovat strojní časy. Pro předehřívání obrobku je vhodný Nd:YAG i CO₂ laser. [30]



Obr. 26 – Ukázka laserem podporovaného soustružení [31]

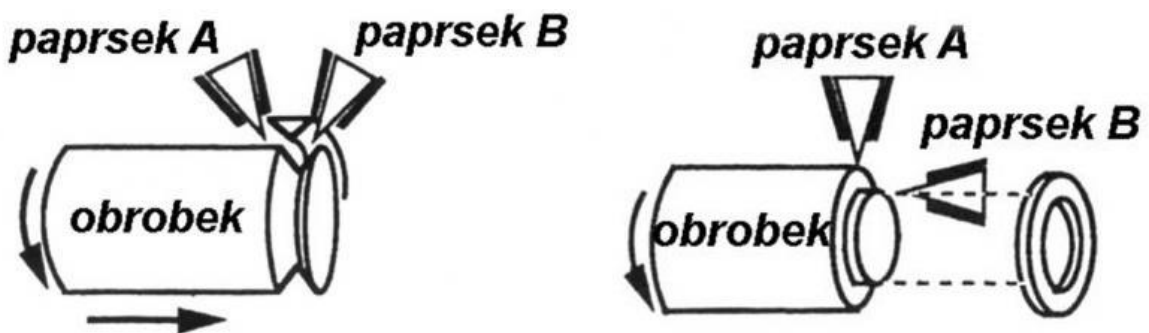
2.5.2 Obrábění laserem

Paprsek laseru je u obrábění laserem používán jako nástroj, který odebírá materiál u obrobku. Jedná se vlastně o dvě specifické metody, kdy se obrábí pomocí jednoho, nebo dvou vzájemně působících paprsků. Při aplikaci jednoho paprsku se materiál odpařuje, kde hlava laseru vyzařuje paprsek kolmo na obrobek a současně koná vedlejší pohyb (posuv) ve stejné dráze. Metoda je vhodná pro základní 3D obrábění, frézování jednodušších tvarů. Při použití dvou paprsků se oba v určitém místě střetnou. Výsledným aspektem je úběr materiálu. Nejčastěji se používá u soustružení a frézování keramických a těžko obrobitelných materiálů. [30]

2.5.2.1 Soustružení laserem

Pro soustružení obrobků s využitím laserové technologie se používají tři metody:

- Obrábění s předehřevem – Při rostoucí teplotě u obráběného materiálu dochází ke změně jeho mechanických (snižuje se pevnost a tvrdost, tím pádem se zlepšuje obrobitelnost). Princip metody spočívá v nasměrování paprsku laseru na obráběnou plochu obrobku bezprostředně před břit rezného nástroje.
- Odtavování materiálu z povrchu obrobku – Obrobek koná rotační pohyb, který se otáčí proti paprsku laseru, čímž je způsoben intenzivní přívod tepla na samotný obrobek. Působením tepla se materiál odtavuje a pomocí asistenčního plynu je materiál odstraňován z místa obrábění.
- Odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky laseru - Dva na době nezávislé paprsky laseru jsou vzájemně pod určitým úhlem skloněny a za jejich působení se materiál odděluje. Rozlišují se 2 způsoby, které jsou znázorněny na následujícím obrázku.



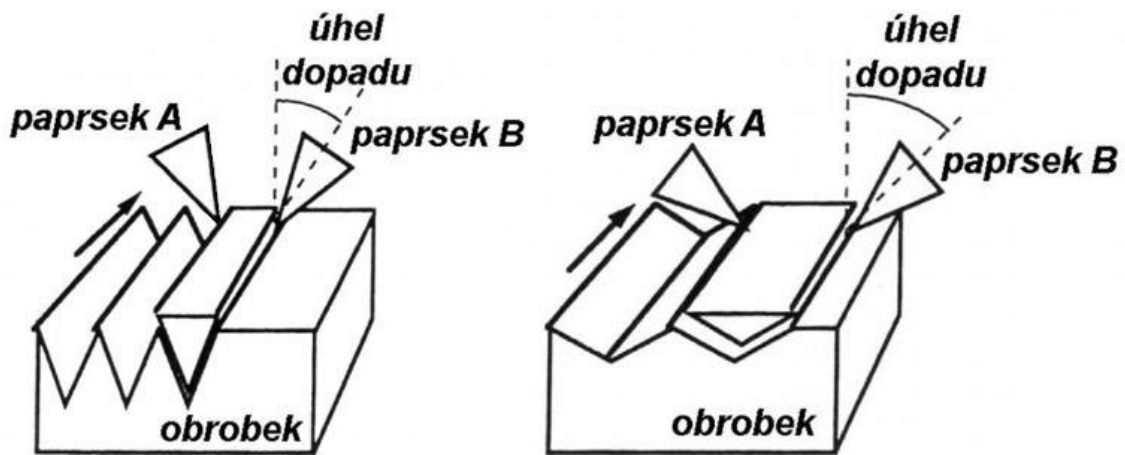
Obr. 27 – Princip šroubovicového (vlevo) a prstencového úběru materiálu [32]

2.5.2.2 Frézování laserem

Při frézování se používají dva principy, které jsou popsány již u soustružení:

- Odtavování (odpařování) materiálu z povrchu obrobku
- Odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky laseru

U frézování se používají především CO₂ a Nd:YAG lasery o výstupních výkonech 500 – 2500W resp. 100 – 500W. Pracovní parametry jsou při frézování stejné, jako při řezání materiálů laserem. [32]



Obr. 28 – Princip odřezávání materiálu – malý (vlevo) a velký úhel dopadu [32]

2.6 Mikroobrábění

Laserové mikroobrábění nachází v poslední době velké uplatnění. Konkrétně v technologických oblastech nástrojářství, elektroniky, fotoniky a lékařství. Hlavní výhodou jsou krátké impulsy laseru, které vytvářejí tak vysokou energii že se materiál přímo odpaří. Využívají se pevnolátkové i plynové excimerové lasery. Každý impuls laseru vytvoří jednu malou prohloubeninu. Měří obvykle několik desítek mikrometrů v průměru a jen několik mikrometrů na hloubku. Využívají se převážně lasery s nižší vlnovou délkou (355 – 532nm).

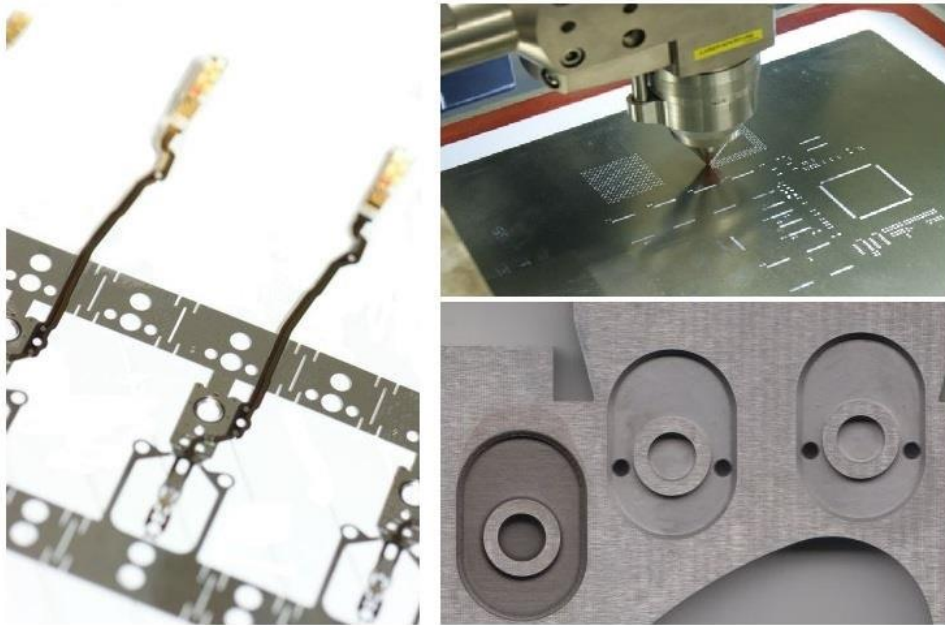
Laserem je možné obrábět materiály:

- Kovy - Ocel, měď, hliník, stříbro, mosaz a bronz

Přednosti:

- Rychlost a spolehlivost procesu
- Přesnost, bezkontaktnost

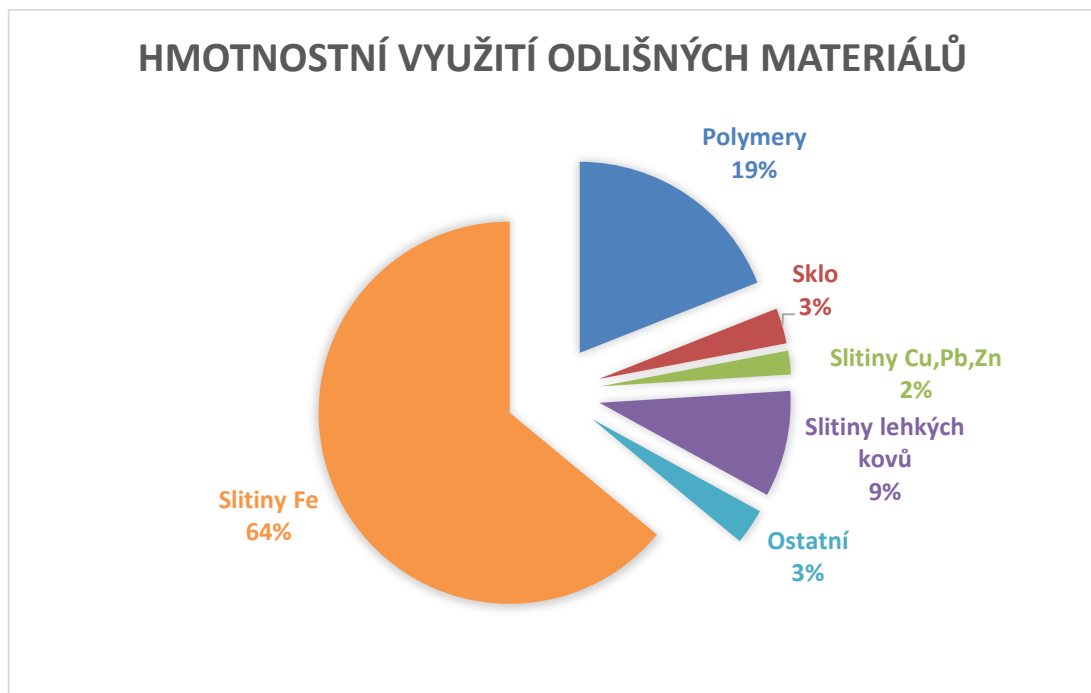
- Možnost krátkých pulsů
- Minimálně tepelně ovlivněná zóna
- Řízené odebrání objemu materiálu [33]



Obr. 29 – Ukázka laserového mikroobrábění [33]

3 KOVOVÉ MATERIÁLY

Kovové materiály jsou aktuálně důležité a univerzální technické materiály. Titulní název můžeme chápat jako pevné látky, které člověk využívá ke své činnosti. Jejich hlavní složkou je kovový prvek (Fe, Cu, Al, Au atd.). Není možné vyrobit absolutně čistý kov, vždy se jedná o slitiny více kovů, popřípadě kovů s nekovy. Samotnou slitinu považujeme za materiál, který vznikl společným roztavením a následným ztuhnutím (slitím) více elementů. Ty označujeme jako nečistoty, nebo složky přidané za účelem zlepšení zejména mechanických vlastností. Úmyslné přidávání přísad se nazývá legování. Ve skutečnosti vlastně všechna odvětví lidské činnosti od těch běžných (např.: stavebnictví) až po ty extrémně náročné (např.: vesmírné odvětví) jsou naprosto závislé na existenci kovových materiálů. Na následujícím obrázku je znázorněno hmotnostní zastoupení dalších materiálů u výroby osobního automobilu Škoda Octavia.



Obr. 30 – Hmotnostní využití odlišných materiálů [34]

3.1 Společné vlastnosti

Společné vlastnosti lze definovat jako rysy, které jsou společné celé skupině kovových materiálů. Nepatří do nich fyzikální a mechanické vlastnosti kovů, které jsou velmi různorodé a mění se v relativně širokých mezích.

3.1.1 Tvárnost

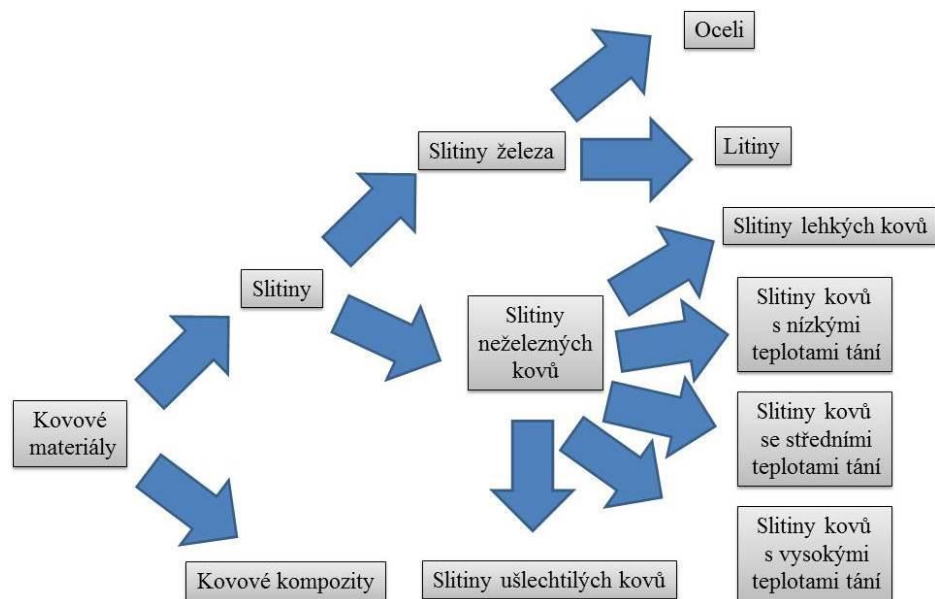
Je označována také jako kujnost. Všeobecně je to schopnost se trvale deformovat. Tato vlastnost je velmi důležitá pro zpracování materiálu do požadovaného tvaru. Tvarují se za pokojové teploty, nebo za mnohem vyšší. Tvárnost vyplývající z krystalické struktury je zvláštním typem chemické vazby.

3.1.2 Elektrická a tepelná vodivost

Oba druhy jsou důsledkem elektronové struktury kovů a důkladně spolu souvisí. Kovy jsou kvalitními elektrickými a tepelnými vodiči. V případě mědi a hliníku je elektrická vodivost užívána pro vedení elektrického proudu.

3.1.3 Typický kovový lesk, odrazivost viditelného záření

Kovový lesk je způsoben interakcí kovů s viditelným zářením, tzn. elektromagnetickým vlněním. Při dopadu fotonu na povrch kovu dochází k excitaci elektronu do vyšší energetické hladiny. Navenek tento případ způsobuje klasický kovový lesk. U některých kovů (Cu, Au) se vyskytuje jejich typické zbarvení, které je způsobeno vnitřní elektronovou strukturou. [34]



Obr. 31 – Rozdělení kovových materiálů [34]

3.2 Ocel

Ocel je slitina železa do 2,14% uhlíku spolu s doprovodnými prvky jako jsou Si, P, S a Cu, které se přidávají do oceli při samotné výrobě. Kromě vedlejších prvků obsahují některé oceli tzv. legující prvky, jako Cr, W, Mo, V, Ni a další. Čisté železo je relativně měkký a tvárný kov s malou pevností. Jedná se také o technicky nejvýznamnější kov.

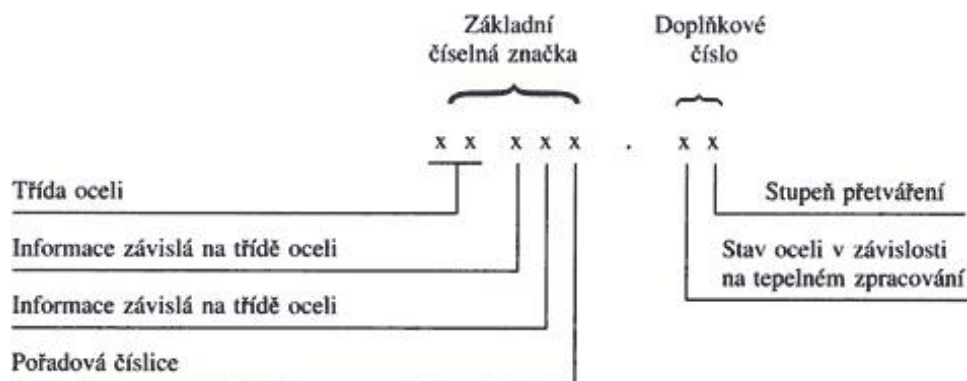
Litiny jsou železné materiály s obsahem 2,14% až 6,67% uhlíku a používají se ke slévání. Oceli společně s litinami jsou pro jejich nízkou výrobní cenu nepoužívanějšími kovovými konstrukčními materiály. Rozmanitost oceli jako materiálu pro stavbu strojů a nástrojů, společně vede k vývoji a výrobě ocelí o nejrůznějších mechanických a technologických vlastnostech. Oceli a litiny se vyrábí ze surového železa, které se získává ve vysoké peci, kde dochází k redukci oxidů železa v železné rudě oxidem uhelnatým a uhlíkem. [35]

Tab. 2 – Vlastnosti železa [34]

Vlastnost	Hodnota [jednotka]
Atomové číslo	26
Atomová hmotnost	55,874 [g/mol]
Teplota tání	1539°C
Teplota varu	3070°C
Hustota	7,874 [g/cm ³]
Modul pružnosti v tahu	204 GPa
Mez pevnosti v tahu	180 - 250 MPa
Mez kluzu	80 - 140 MPa
Tažnost	50%
Tvrdoost	45 - 55 HB

3.2.1 Značení ocelí podle ČSN

Označení ocelí je v Evropě jednotně stanoveno normou EN 10027. Část 1 stanovuje systém zkráceného označování a část 2 systém číselného označování. Symboly zkráceného označení označují použití, vlastnosti nebo skladbu příměsí. Kromě těchto uvedených systémů značení ocelí se v České republice v současnosti stále používá starší označování ocelí do devíti tříd: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 19. Pokud je první číslo 1, jedná se o ocel (tvářenou). Oceli jsou označovány symboly skládajícími z pěti číslic XX X₁X₂X₃ (např.: 15 220, 11 240, 19 355 atd.) za nimiž mohou následovat další doplňková dvojice čísel X₄X₅ (např.: 11 378.11, 12071.21 atd.). [36]



Obr. 32 – Schéma číselného označení oceli dle ČSN [37]

Číslice X_1 a X_2 u tříd 10 a 11 značí střední mez pevnosti v desetinách MPa, při čemž nejmenší je číslo 30. U tříd 12 až 16 vyjadřuje X_1 součet středních obsahů legujících prvků v procentech a X_2 střední obsah uhlíku v desetinách hmotnostních procentech. Hodnota X_3 dále označuje bližší vlastnost ocelí.

Tab. 3 – Rozdělení ocelí do tříd [35]

Třída oceli	Oceli podle:		Charakteristika ocelí:	
	Použití	Stupeň 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) a dalších prvků	
12			Ušlechtilé oceli s předepsaným obsahem C, Mn, Si, P, S, popř. (P+S) a dalších prvků	
13		Legované	Nízko a středně legované	Legující prvky: Mn, Si (V)
14				Legující prvky: Cr (Mn, Si, Al)
15				Legující prvky: Mo, W, V (Cr)
16				Legující prvky: Ni (Cr, W, Mo, V)
17	Středně a vysoko legované	Legující prvky: Cr, Ni, Mn		
19	Nástrojové	Nelegované	Předepsaný obsah C, Mn, Si, P, S	
		Legované (nízko, středně, vysoko)	Legující prvky: Cr, V, Mo, W, Ni, Co	

Třída č. 18 se víceméně neuvádí, protože se jedná o slinuté karbidy vyrobené pomocí práškové metalurgie. Číslice X_4 a X_5 , která se někdy doplňují za prvními pěti čísly, se

oddělují tečkou. Tyto číslice pojmenovávají tepelné zpracování oceli a stupeň tváření (např. 11 378.11). Poslední hodnota X_5 se udává pro ocel třídy 10 až 16. [38]

Tab. 4 – Číselné značení tepelného zpracování ocelí [36]

Číslice X_4	Tepelné zpracování
.0	Tepelně nezpracováno
.1	Normalizačně žháno
.2	Žháno
.3	Žháno naměkko
.4	Kaleno a popuštěno při nízkých teplotách
.5	Normalizačně žháno a popuštěno
.6	Zušlechtěno na dolní pevnost
.7	Zušlechtěno na střední pevnost
.8	Zušlechtěno na horní pevnost
.9	Tepelně zpracováno podle zvláštního ujednání

Tab. 5 – Číselné značení stupně tváření za studena [38]

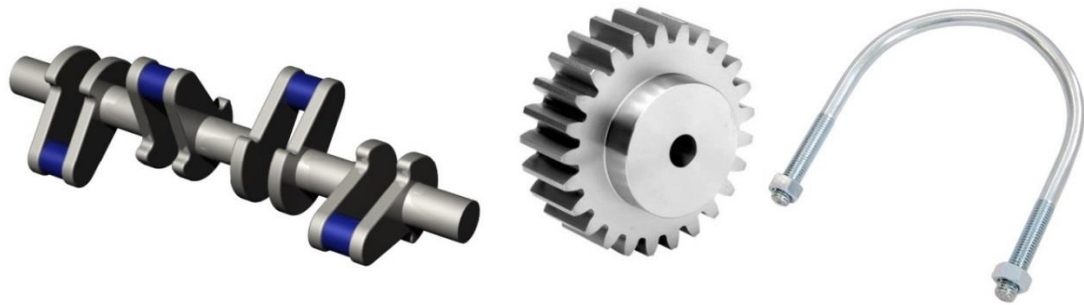
Číslice X_5	Tepelné zpracování
0	Za studena nepřeválcovaný
1	Za studena lehce převálcovaný
2	1/4 tvrdý
3	1/2 tvrdý
4	3/4 tvrdý
5	4/4 tvrdý
6	5/4 tvrdý
7	Netvořící čtyřlístky
8 a 9	Zpevněný na základě dohody mezi výrobcem a odběratelem

3.2.2 Ocel třídy 11

Konstrukční nelegované oceli třídy 11 se vyrábí s obsahem uhlíku do 0,65%, jsou v jakosti vhodné pro tváření a je u nich zaručen určitý obsah fosforu a síry. Jejich vlastnosti jsou klasifikovány v závislosti na obsahu uhlíku od nejmenší pevnosti v normalizačně žhaném stavu 340 MPa (např.: 11 340 – obsah 0,1% uhlíku) do 900 MPa (např.: 11 901).

Ocel 11 340 je dobře svařitelná, tvárná za tepla i za studena. Dodává se jako hlubokotažné plechy a lze ji i cementovat. Od hranice 0,3% uhlíku je možno oceli zušlechtovat, přičemž dosahovaná pevnost s obsahem uhlíku roste. Oceli třídy 11 právě s obsahem uhlíku 0,3% jsou nejběžněji používané. Můžou se zušlechtovat nejvýše na pevnost okolo hodnoty 700 MPa. Oceli 11 600, 11 700, 11 800 se používají na části vystavené značným měrným tlakům

a opotřebení (např.: klíny, vodící hřídele, vřetena lisů). Zvláštní oceli tzv. automatové (11 109, 11 110, 11 120, 11 121, 11 140), obsahují až 0,2 % síry. Ta je navázána na zvýšený obsah manganu (kolem 1%) na MnS. Tyto oceli dosahují dobré obrobitelnosti s dobrou jakostí povrchu při velké řezné rychlosti. [37]



Obr. 33 – Příklady použití ocelí třídy 11 – Kliková hřídel, ozubené kolo a svorník [39]

3.2.3 Ocel třídy 12

Konstrukční oceli třídy 12 jsou nelegované, proto mají ve značce třetí číslici 0 (výjimku tvoří ocel 12 140 – na hřídele velkých rozměrů). Převážná většina z nich se obtížně svařuje. Pro cementování má 0,06 až 0,2% uhlíku a dodává se ve stavu přírodním (pouze válcované popř. kované), kdežto ocel určená k zušlechťování obsahuje 0,25 až 0,7% uhlíku. Pro hřídele u elektromotorů a dynama se vyrábějí z normalizačně žíhané oceli 12 050. Rotory pro turbogenerátory malých průměrů se zhotovují z oceli 12 040. Z oceli 12 062, která obsahuje 0,55% uhlíku se vyrábějí velká ozubená kola, ozubené tyče, věnce, šneky, hnací soukolí a další. Oceli určené k cementování s nižším obsahem uhlíku se používají u součástí strojů a silničních motorových vozidel (čepy, zasouvací vidlice, řetězová kola apod.). Oceli k zušlechťování mají dostatečnou tvrdost po zakalení a používají se u klikových hřídelí, čerpadel, lisů, velkých spalovacích motorů, vřeten obráběcích strojů, ozubených kol.



Obr. 34 – Příklady použití ocelí třídy 12 – Ozubené soukolí, hřeben a věnec [40]

3.2.4 Ocel třídy 14

Konstrukční oceli jsou legovány chromem, popř. chromem a manganem či křemíkem a hliníkem. Jsou dobře prokalitelné, lze je nitridovat a povrchově kalit, jsou tvrdé a odolné proti otěru. Mají široké použití pro namáhané součásti. Jsou to nejvíce používané nízkolegované slitinové oceli, které umožňují dosáhnout velmi dobrých vlastností bez použití cizích prvků. Oceli jsou vhodným materiálem na magnety, ojnice, součásti kuličkových a válečkových ložisek, v zušlechtěném stavu se používají na výrobu ozubených kol, pístních kroužků, vaček a klikových hřídelů. Na tento druh ocelí je kladen velký požadavek, co se týká mikročistoty materiálu. Musí se sledovat hlavně velikost a tvar nekovových částic.



Obr. 35 – Příklady použití ocelí třídy 14 – Kuličkové a válečkové ložiska, ojnice [41]

3.2.5 Ocel třídy 19

Zatímco ostatní skupiny ocelí jsou určeny pro konstrukci strojů, staveb atd. ocel třídy 19 se nazývá nástrojová a používá se pro výrobu nástrojů pro zpracování jiných dalších materiálů (kovových i nekovových). Zpracováním máme na mysli obrábění a tváření. U obrábění to jsou vrtáky, soustružnické nože, frézy, pily a další a u tváření matrice, razníky zápusťky a další. Hlavními požadavky na oceli třídy 19 jsou vysoká tvrdost a tedy i vysoká odolnost proti opotřebení. Rovněž se klade požadavek na odolnost proti popouštění, což znamená schopnost materiálu zachovat si při výšené teplotě vysokou tvrdost. Vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení můžeme dosáhnout u této třídy ocele zvýšením obsahu uhlíku (0,6 – 2%), případně také karbidotvorných prvků (Cr, V, Mo, W a další).

Tab. 6 – Číselné značení ocele třídy 19 [37]

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

Podle chemického složení dělíme nástrojové oceli na:

- Nelegované (uhlíkové) – výroba ručních nástrojů
- Legované – výroba střížných, řezných a tvářecích nástrojů
- Rychlořezné – vysoce řezné nástroje

Nelegované oceli jsou určeny pro nástroje pracující při ne moc náročných podmínkách a za relativně nízkých teplot, neboť s teplotou jejich tvrdost rychle klesá. Pro větší namáhání, nebo vyšší teploty jsou určeny legované oceli, které obsahují již zmíněné karbidotvorné prvky. Rychlořezné oceli se používají pro obrábění vysokými rychlostmi, kdy se nástroj silně zahřívá (až nad 500°C). Obsahují 0,7 – 1,3% uhlíku a velké množství karbidotvorných prvků (W, Cr a V). [34]

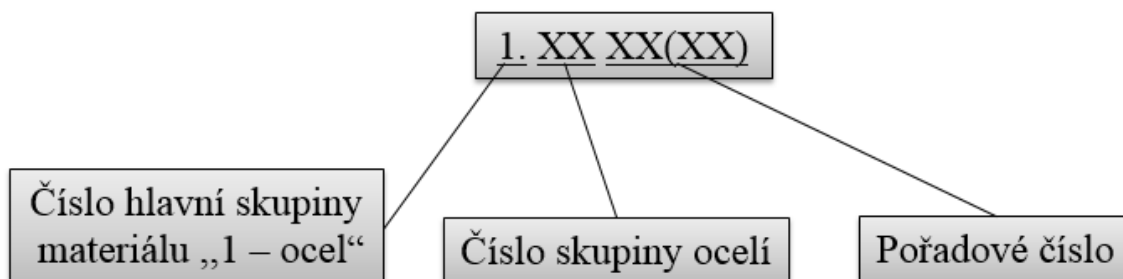


Obr. 36 – Příklady použití oceli třídy 19 – Frézovací nástroj s výměnnými noži, ráčnový klíč a tesařské kladívko [42]

3.2.6 Značení oceli dle EN

3.2.6.1 Číselné značení

Jedná se o nový způsob značení ocelí dle normy ČSN EN 10027 – 2. První číslo před tečkou označuje skupinu materiálů (1 – ocel). První dvojčíslí XX udává skupinu ocelí. Zbylé číslice udávají pořadové číslo oceli v dané skupině.



Obr. 37 – Schéma číselného označení oceli dle EN [36]

3.2.6.2 Značení podle účelu použití a podle vlastností

Ocel může mít značku vyjadřující její použití a mechanické vlastnosti, nebo značku popisující její chemické složení. Velké písmeno na začátku označuje použití oceli a číslice udávají minimální mez kluzu, nebo pevnosti oceli v MPa. Pokud je na začátku G, je ocel charakterizovaná na odlitky (pokud chybí, jedná se o tvářenou ocel).

Tab. 7 – Základní symboly v označování ocelí podle ČSN EN 10027 – 1 [36]

Symbol	Oblast použití:	Příklad:
D	Ploché výrobky pro tváření za studena	DC04EK
E	Strojní součásti	E295GC
H	Ploché výrobky válcované za studena s vyšší pevností	H400M
L	Potrubí, trubky	L360MB
P	Tlakové nádoby	P355NH
S	Ocelové konstrukce	S355J2G1W
R	Kolejnice	R0900Mn
T	Plechý pro obaly (plechovky, konzervy atd.)	T600
M	Plechý a pásy pro elektrotechniku	M140 – 30S
B	Výztuž do betonu	B500A

Například ocel S235 (11 378) je určena pro ocelové konstrukce (jeřáby, mosty, haly atd.) a má minimální mez kluzu 235 MPa. Většinou jsou tyto čtyřmístné symboly doplněny dalšími přídatnými symboly, např. typ tepelného zpracování apod. Ostatní velká písmena jsou znázorněny v následující tabulce spolu s příklady.

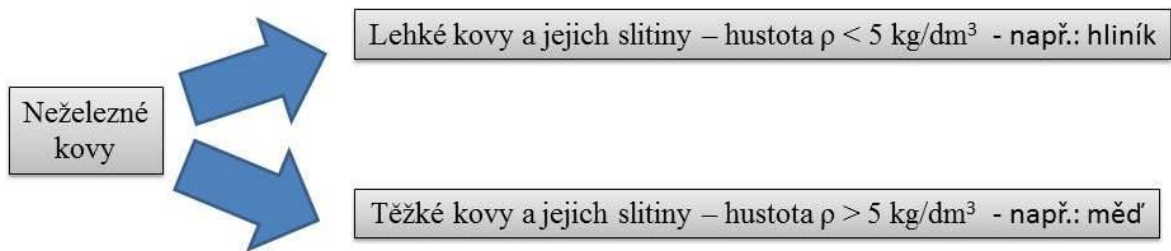
3.2.6.3 Značení podle chemického složení

Pro legované a nelegované oceli se využívá značení, které je odvozené z chemického složení ocelí. U ocelí na odlitky se opět píše G, jinak se jedná o tvářenou ocel. Značení poté může mít čtyři způsoby popisu složení:

- a) Nelegované oceli (obsah Mn < 1%)** – Symbol se skládá z písmena C, dvou číslic, které mají hodnotu uhlíku v setinách procent a z přídatných symbolů (E – předepsaný maximální obsah síry; R – předepsaný rozsah obsahu síry; C – pro tváření za studena; S – na pružiny; U – na nástroje; W – na svařovací dráty; D – k tažení drátů)
- b) Nelegované oceli (obsah Mn 1 – 5%)** – Symbol se skládá z číslice, která udává hodnotu uhlíku v setinách procent, chemických značek prvků charakterizujících ocel a čísel udávajících obsahy legujících prvků v procentech.
- c) Legované oceli (obsah minimálně jednoho legujícího prvku – nad 5%)** – Symbol začíná písmenem X, následuje číslo o hodnotě uhlíku v setinách procent, chemická značka legujících prvků a číslo udávající obsah legujících prvků v procentech.
- d) Nástrojové rychlořezné oceli** – Symbol se skládá z písmen HS (z angl. High speed) a z čísel zadávajících obsahy legujících prvků v procentech v pořadí W, Mo, V a Co. [36]

3.3 Slitiny oceli

Slitina označuje směs kovu spolu s dalšími kovy nebo jinými prvky či sloučeninami, většinou ve formě pevné látky. Získávají tím různé specifické fyzikální a chemické vlastnosti, které čisté kovy nemají a proto jsou používány po celou dobu historie zpracování. Slitiny se odvozují od čistých kovů, které se potom řadí podle převažujícího obsahu kovu. Některé mají své obchodní názvy, které se ve svých případech staly všeobecně známými (např.: invar, elinvar, alnico, kovar, nimonic, inconel, monel, dural, silumin a další).



Obr. 38 – Rozdělení neželezných kovů [35]

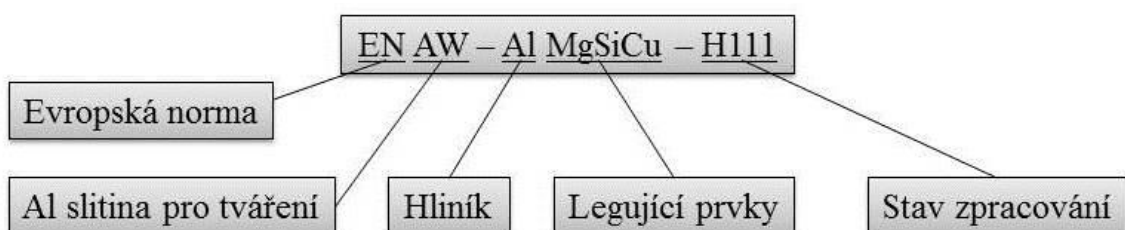
Nejdůležitější lehké kovy jsou hliník při hustotě $\rho = 2,7 \text{ kg/dm}^3$, hořčík $\rho = 1,7 \text{ kg/dm}^3$ a titan $\rho = 4,45 \text{ kg/dm}^3$. Slitiny těchto lehkých kovů mají při své velké pevnosti malou hustotu. Také mají velký význam jako konstrukční materiály při výrobě letadel, jízdních kol, spalovacích motorů a automobilů. Mezi těžké kovy potřebné pro výrobu dílů ve strojírenství patří měď ($\rho = 8,92 \text{ kg/dm}^3$), cín ($\rho = 7,3 \text{ kg/dm}^3$) a zinek ($\rho = 6,9 \text{ kg/dm}^3$). Dalšími kovy, které se užívají především k legování je chrom, nikl, vanadium, molybden a wolfram. [35]

3.3.1 Slitiny hliníku

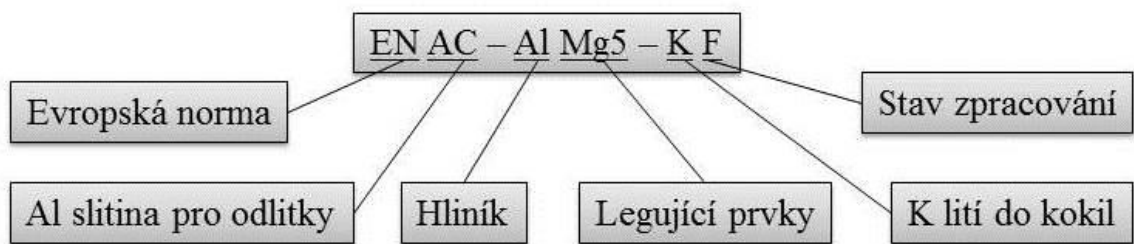
Hliník je stříbrobílý kov s malou hustotou $2,702 \text{ kg/dm}^3$ a vykazuje přibližně 1/3 hustoty železa ($\rho = 7,86 \text{ kg/dm}^3$). Je dobře tvárný zatepla i zastudena a také významný svou dobrou elektrickou i tepelnou vodivostí. Dodává se ve formě měkké, polotvrdé a tvrdé. Slitiny hliníku se odlišují nízkou hustotou, dobrými mechanickými vlastnostmi, dále jsou dobře obrobitelné, nemagnetické a až na několik výjimek dostatečně odolné proti atmosférické korozi. Těchto vlastností se ve značné míře může dosáhnout přidávanými kovy (Cu, Si, Zn, Mn, Ni), nebo precipitačním vytvrzováním.

Hlavní oblasti použití hliníku a jeho slitin:

- Obaly (fólie, nápojové plechovky)
- Dopravní prostředky (kostry letounů, motory a karoserie)
- Stavební prvky (střešní krytina, rámy oken a dveří)
- Elektrotechnika (rozvody elektrického proudu) a další. [34]



Obr. 39 – Číselné značení slitin hliníku k tváření [35]



Obr. 40 – Číselné značení slitin hliníku na odlitky [35]



Obr. 41 – Příklady použití slitin hliníku – Blok motoru, disk kola a plechovka [36]

3.3.1.1 Duraly

Mezi velmi pevné slitiny pro tvářeni patří zejména slitiny Al – Cu, případně Al – Cu – Mg, které se nazývají duraly. Obsahují cca 1 – 6% Cu a do 2% Mg. Ve vytvrzeném stavu dosahují velmi dobrých mechanických vlastností ($R_m =$ až 450 MPa). Materiál se nejdřív ohřeje na teplotu kolem 500°C, která je dostatečná k rozpuštění fáze $CuAl_2$ v hliníku a pak následuje rychlé ochlazení ve vodě. Intermetalická fáze se nedokáže z hliníku zpětně vyloučit a místo toho tím pádem vznikne přesycený tuhý roztok mědi v hliníku. V posledním kroku se ještě ohřeje na teplotu kolem 150°C. V zrnech tuhého roztoku mědi v hliníku vzniknou jemné částice neboli precipitáty. Precipitace je vlastně děj, kterým se značně zvýší tvrdost a pevnost slitiny.

Značnou nevýhodou těchto slitin je poměrně špatná odolnost proti korozi v porovnání s čistým uhlíkem. Když jsou například duralové součástky dlouhodobě vystaveny trvajícím povětrnostním podmínkám, pokrývají se tenkou vrstvou hliníku (tzv. plátování). Nacházejí tím široké využití zejména v leteckém, automobilovém průmyslu, nebo při výrobě sportovních pomůcek. [34]

4 BEZPEČNOST PRÁCE S LASERY

Při práci s laserovými zařízeními je důležité dodržovat předepsané normy a nařízení, které jsou vydány výrobcem těchto strojů. Je nezbytně nutné vyvarovat se nebo zabránit přímého zásahu laserovým světlem i při malém množství energie. Současný stav znalostí o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci je obsažen v platných právních předpisech, do nichž byla transponována legislativa evropská. [43]

4.1 Základní druhy rizik

U pracovníků, kteří obsluhují laserové zařízení, je nejvíce ohroženým lidským orgánem oko. Při zasažení zářením u něj může dojít k poškození rohovky, sítnice a cévní soustavy oka, díky čemuž mohou vzniknout krevní podlitiny. Když laser pracuje v určitých vlnových délkách, na které se oko plně soustředí, může u některých typů laserů způsobit, že je přijímaný paprsek soustředěn pouze do značně malého bodu na sítnici. To může bohužel vést k bodovému přehřátí sítnice a k trvalému poškození zraku.

Druhým dalším ohroženým místem je pokožka, zvláště rukou. Stupeň poškození závisí na několika činitelích jako délka světelného pulzu, vlnová délka záření, velikost energie, fokusace v místě dopadu paprsku, ale také na pigmentu v pokožce, případně uložení nervových vláken. K ochraně zraku se používají brýle, na nichž je nanášena odrazivá vrstva, pro vlnovou délku použitého vlnového záření. Ruce se chrání ochrannými rukavicemi, krémy, apod. Pozorování opracovávaného předmětu je umožněno přes ochranné sklo, nebo vhodnou snímacím zařízením (kamerou). Zařízení musí být zabezpečeno proti samovolnému spuštění. Pracovníci mají pravidelně chodit na lékařskou prohlídku a to zejména na vyšetření očního pozadí.

4.2 Ochrana zraku

Každé laserové zařízení má v sobě vložené technologické opatření, jako je ochranné pouzdro, zámky a hlavní vypínač nebo tlumič. Při použití určitých typů laserů je třeba ochrany očí, aby se zabránilo odraženým a rozptýleným paprskům. Veličiny, jako optická hustota, typ laseru a viditelnost, jsou při výběru ochranných prostředků všechny značně důležité. Stejná pomůcka nemusí poskytovat stejný stupeň ochrany proti infračervenému a ultrafialovému laserovému paprsku. Doporučují se brýle s bočním stíněním, protože umožňují poskytnutí ochrany proti zpětnému odrazu a bočnímu vstupu rozptýlených a odražených laserových paprsků. [44]



Obr. 42 – Ochranné laserové brýle a zástěna [45]

4.3 Ochrana kůže

Při poškození kůže záleží na typu laseru, výkonu laserového paprsku a době trvání vystavení pokožky. Laser totiž může proniknout lidským tělem stejně jednoduše, jako u kovových materiálů. Újma může sahát od lokalizovaného zarudnutí až k hlubokému zářezu do tkáně. Poškození kůže paprskem je popálení, nebo pořezání. Rány jsou čisté, vypálené a mnohem snadněji se zhojí, než u očí. Proto se klade velký důraz na ochranu proti laserovému paprsku. Ochranné oděvy, jako jsou šaty, čepice, masky, rukavice a taktéž ochrana očí jsou nezbytné pro všechny práce v nepatrné blízkosti laseru.

4.4 Nebezpečí úrazu elektřinou

Laserové zařízení se napájí pomocí velmi vysokého napětí. Úraz zde může vzniknout elektrickým proudem, pokud se nevyškolená, nebo neoprávněná osoba pokusí provádět údržbářské práce za nedodržení správných bezpečnostních postupů.

Zásadní bezpečnostní opatření:

- Označení laseru štítkem s informacemi o elektrickém napětí a příkonu.
- Předcházení kontaktů s elektrickými částmi včetně kondenzátorů obsahující elektrický náboj i po přerušení napájení.
- Hořlavé komponenty elektrického obvodu musí být testovány proti zkratu. [44]

5 CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

V návaznosti na literární rešerši bude provedeno:

- Experimentální obrábění neprůchozích drážek při změně technologických parametrů
 - Výroba vzorků na laseru Triumph L3030
 - Měření hloubky drážek a statistické vyhodnocení získaných dat
- Experimentální řezání oceli a duralu při změně technologických parametrů
 - Výroba vzorků
 - Vyhodnocení jakosti řezných ploch v závislosti na tloušťce a materiálu

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ

6.1 Laser Trumpf L3030

Laserový řezací stroj využívá novou moderní technologii CoolLine. Tato technologie umožňuje zmenšení vzdálenosti mezi jednotlivými díly a řezání jemnějších detailů při zachování vysoké kvality řezu. Používá se pro zpracování nejrůznějších materiálů v oblasti tenkých i tlustých plechů (25 mm).

- Hmotnost – 11 500 kg
- Výkon – 2200 W
- Typ rezonátoru – CO₂
- Přídavný plyn – Kyslík (O₂)
- Nejmenší programovatelná dráha – 0,01 mm
- Parametry
 - Pracovní rozsah (XYZ) – 3000 x 1500 x 115 mm
 - Maximální rychlost posuvu – 60 m/min

6.2 Carl Zeiss Jena

Mikroskop Carl Zeiss Jena je dílenský mikroskop, který pracuje s okulárem Dinocapture 2.0. Zvětšení měřeného předmětu je možné patnáctinásobně a padesátinásobně. Mikroskop má pojezdový stolek, se kterým je možné pohybovat lineárním posuvem v osách X, Y a zároveň může vykonávat rotační pohyb.

- Parametry pro měření
 - Teplota v místnosti – 20 °C
 - Vlhkost vzduchu v místnosti – 90 %
 - Atmosférický tlak – 1012 mbar
 - Typ cyklu – Lineární trojchodý
 - Rozsah dráhy – 0 až 25 mm
 - Rozlišitelnost – 0,001 mm
 - Velikost kroku – 1 mm

6.3 Sincrono CP 4000

2D laser nabízí technologii nové generace, má přednosti v plošném řezání menších a složitých dílců z tenkých materiálů. Je jednoznačně nejrychlejší stroj v dané třídě a má podstatně kratší dobu pálení, což se promítne na jeho odpovídající ceně. Podstavec laseru zaručuje vynikající pohlcování vibrací a optimální tepelnou stabilitu.

- Výrobce – Prima Industrie
- Výkon – 4000 W
- Typ rezonátoru – CO₂/CP4000
- Parametry
 - Maximální tloušťka obrobku – 20 mm
 - Maximální délka obrobku – 3000 mm
 - Maximální šířka obrobku – 1500 mm
 - Maximální rychlost posuvu – 24000 mm/min

6.4 Mitutoyo – Surftest SJ 301

Drsnoměr Mitutoyo slouží pro kontrolu jakosti povrchu s protiprachově chráněným, dotykově ovládaným displejem a zabudovanou tiskárnou. Je rychlý a používá se na nezávislé měření přímo ve výrobě.

- Možnost uložení až pěti naměřených a statistických dat
- Výdej naměřených hodnot a profilu na displej a integrovanou tiskárnu
- Parametry
 - Zdvih (rozsah osy Z) – 350 μm
 - Posuv (rozsah osy X) – 12,5 mm
 - Rozlišitelnost – 0,01 μm

6.5 Taylor Hobson Talysurf CLI 500

Talysurf CLI 500 je univerzální drsnoměr firmy Taylor Hobson pro měření struktury povrchu všem materiálů a povrchů. Základem přístrojového vybavení je firemní program Talymap Gold. Přístroj zaznamenává data pomocí bezdotykové sondy s CLA konfokální hlavou. Je určen hlavně pro 3D měření, ale bezproblémově zvládne změřit i 2D data.

- Hmotnost – 55 kg
- Nosnost – 10 kg
- Rychlost měření – 30, 15, 10, 5, 1 a 0,5 mm/s
- Rychlost polohování – max. 30 mm/s
- Délka posuvu ve všech osách – 50 mm
- Parametry
 - Celkový prostor měření – 100 x 50 x 50 mm
 - Celkové rozměry – 500 x 310 x 450 mm

6.6 Mikrometr Mitutoyo

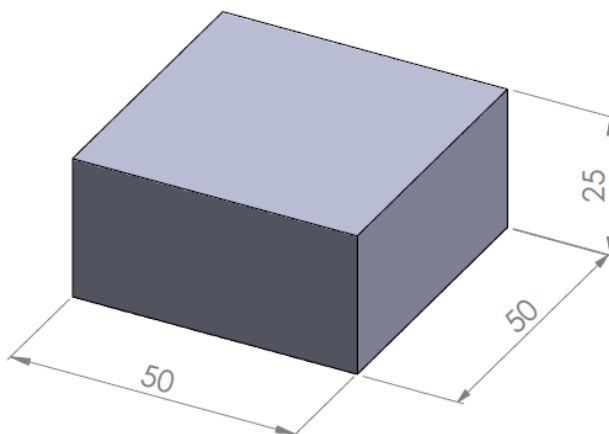
Třmenový mikrometr je o jeden řád přesnější mikrometrické měřidlo, než posuvná měřidla. Používá se na měření vnějších rozměrů. Jeho základem je mikrometrický šroub s maticí, dělicí bubínek, brzda a třecí spojka (řehtačka).

- Rozlišitelnost – 0,01 mm
- Měřicí rozsah – 25 až 50 mm
- Přítlačná síla – 7 ± 2 N

7 EXPERIMENTÁLNÍ OBRÁBĚNÍ NEPRŮCHOZÍCH DRÁŽEK PŘI ZMĚNĚ TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ

7.1 Tvar vzorků

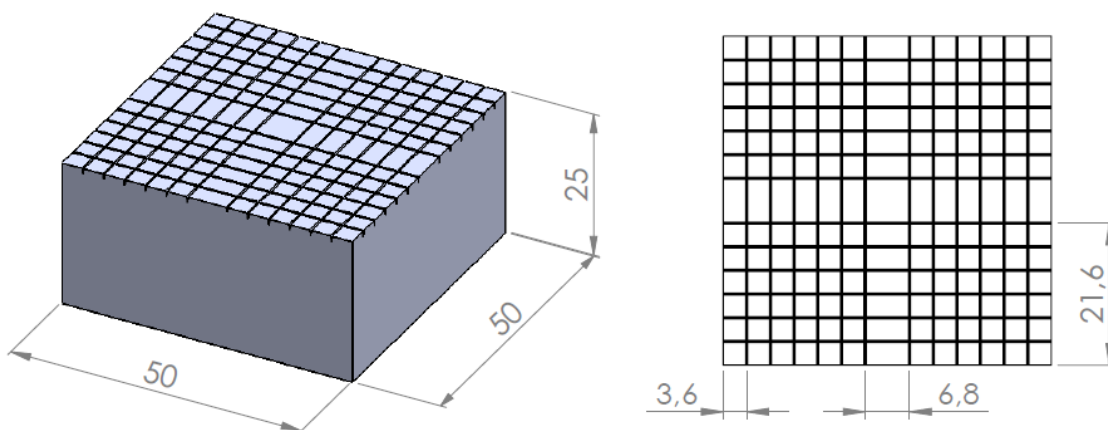
Byla použita sada vzorků po čtyřech kusech (4 druhy ocelových materiálů). Každý vzorek má tvar kvádrů 50 x 50 x 25 mm. Řezání bylo prováděno na obou čelních plochách (50 x 50 mm). Vzorky byly broušeny na hodnotu drsnosti $R_a = 0,8$ až $1,6 \mu\text{m}$.



Obr. 43 – Rozměry vzorku

7.2 Rozmístění drážek na ploše vzorku

Zkoušky byly prováděny pro 3 hodnoty výkonů, přičemž pro každý výkon bylo použito 6 rychlostí řezání (rychlost pohybu laserové řezací hlavy). Hodnoty rychlosti (0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,4) byly pro všechny výkony shodné.



Obr. 44 – Rozmístění drážek na vzorku

Na protilehlé straně vzorku (50 x 50 mm) bylo provedeno dalších 6 drážek při konstantním výkonu a konstantní řezné rychlosti.

7.3 Poloha vzorků při zkoušce

Vzorky byly umístěny na rovnou dřevěnou podložku, kde jejich boky přiléhaly těsně k sobě. Ve směru pohybu řezné hlavy byly umístěny v pořadí: 11 600, 12 060, 14 109 a 19 824.

7.4 Provedení zkoušky

Zkouška byla provedena na laseru Trumpf L3030, na kterém byly zvoleny následující parametry zkoušky. Kvůli nízkým hodnotám nebyl výkon P_1 do hodnocení zahrnut.

Tab. 8 – Parametry zkoušky

Rychlosti [m/min]		Výkony [W]
		$P_1 = 200$
$V_1 = 0,05$	$V_4 = 0,2$	$P_2 = 250$
$V_2 = 0,1$	$V_5 = 0,3$	$P_3 = 290$
$V_3 = 0,15$	$V_6 = 0,4$	$P_4 = 335$

Zkouška začínala maximálním výkonem P_4 a také maximální rychlostí V_6 . Po skončení řezání všech vzorků se řezací hlava posunula do polohy další drážky a vysokou rychlostí se vrátila do základní polohy. Následovalo snížení rychlosti a proces se opakoval. Po provedení všech řezů výkony P_3 a P_4 byly vzorky ručně pootočený o 90° a pokračovalo poslední řezání výkonem P_2 . Všechny řezy byly vedeny stejným směrem zleva doprava.

7.5 Materiál vzorků

Tab. 9 – Přiřazení značek ocelí ČSN ke značkám EN

Třída oceli ČSN		ČSN EN 10027 - 2	
		Značka	Číselné označení
Konstrukční oceli	11 600	E335	1.0060
	12 060	C55E	1.1219
	14 109	100Cr6	1.3505
Nástrojová ocel	19 824	HS18-0-1	1.3355

7.5.1 Ocel 1.0060 (11 600)

Neušlechtilá konstrukční ocel s vyšším obsahem uhlíku je vhodná pro strojní součásti namáhané staticky i dynamicky. Používá se pro součásti vystavené většímu měrnému tlaku jako např.: u hřídelí, os, ozubených a řetězových kol, pák, čepů, pístnic, kolíků, podpěr, držátek, objímek, šroubů, matic, per, ozubených hřebenů, kladek, spojek, segmentů, vložek v axiálních ložiscích, distančních kroužcích, různých upínacích elementů apod.

Tepelné zpracování:

- Kování – 1100 až 800°C
- Normalizační žíhání – 850 až 870°C
- Žíhání na měkko – 680 až 720°C
- Kalení do vody – 830 až 860°C
- Kalení do oleje – 840 až 870°C
- Popouštění – 560 až 670°C [46]

Tab. 10 – Obsah prvků u oceli 11 600 [47]

Chemický prvek	Množství
Uhlík (C)	max. 0,55%
Fosfor (P)	max. 0,055%
Síra (S)	max. 0,050%

7.5.2 Ocel 1.1219 (12 060)

Konstrukční nelegovaná ocel je vhodná u hřídelí turbokompresorů, karuselů, zalomených jiných hřídelí, ozubených kol, pístnic, vřeten, čepů, lamel, spojek, pojistek, západek, držáků, šroubů, pák, destiček abnormálních řetězů, různých spojovacích součástí, pružin, konstrukčních elementů lisovacích nářadí apod. Používá se také pro méně namáhané hřídele silničních vozidel a součásti strojů, které mají vzdorovat jakýchkoliv opotřebení (ozubené věnce i vřetena vrtaček).

Tepelné zpracování:

- Kování – 1100 až 800°C
- Normalizační žíhání – 810 až 840°C
- Žíhání na měkko – 680 až 720°C
- Kalení do vody – 790 až 830°C

- Kalení do oleje – 800 až 840°C
- Popouštění – 530 až 670°C [46]

Tab. 11 – Obsah prvků u oceli 12 060 [47]

Chemický prvek	Množství
Uhlík (C)	0,52 – 0,6%
Mangan (Mn)	0,5 – 0,8%
Křemík (Si)	0,17 – 0,37%
Chrom (Cr)	0,25%
Nikl (Ni) a Měď (Cu)	0,3%
Fosfor (P) a Síra (S)	max. 0,04%

7.5.3 Ocel 1.3505 (14 109)

Konstrukční nízkolegovaná ocel má dobrou obrobiteľnosť, tvárnosť za tepla a odolnosť proti korozi. Je vhodná pro výrobu kuliček do Ø 25 mm, válečků a kuželíků do Ø 18 mm a kroužků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm.

Tepelné zpracování:

- Kování – 1050 až 850 °C
- Žihání na měkko – 720 až 780°C
- Kalení do vody – 790 až 820°C
- Kalení do oleje – 820 až 840°C
- Popouštění – 120 až 170°C [46]

Tab. 12 – Obsah prvků u oceli 14 109 [47]

Chemický prvek	Množství
Uhlík (C)	0,9 – 1,1%
Mangan (Mn)	0,3 – 0,5%
Křemík (Si)	0,15 – 0,35%
Chrom (Cr)	1,3 – 1,65%
Nikl (Ni)	max. 0,3%
Měď (Cu)	0,25%

7.5.4 Ocel 1.3355 (19 824)

Rychlořezná nástrojová ocel třídy 19 je běžná pro použití se zvýšenou houževnatostí, ale zhoršenou tvárností za tepla. Využívá se na nástroje k obrábění materiálu s nižší až střední pevností, zejména nástroje s jemnými břity potřebující celkem dobrou houževnatost např. závitové a profilové frézy, vrtáky, závitníky, strojní výstružníky, obrážecí nože na ozubení, nástroje na obrábění dřeva apod.

Tepelné zpracování:

- Kování – 900 až 1170°C
- Žihání na měkko – 800 až 840°C
- Žihání ke snížení pnutí – 750 až 780°C
- Kalení do oleje – 1200 až 1240°C
- Popouštění – 180 až 220°C [46]

Tab. 13 – Obsah prvků u oceli 19 824 [47]

Chemický prvek	Množství
Uhlík (C)	0,7 – 0,8%
Mangan (Mn)	0,45%
Křemík (Si)	0,45%
Chrom (Cr)	3,8 – 4%
Molybden (Mo)	0,5%
Vanad (V)	1 – 1,6%
Wolfram (W)	17 – 19%

7.6 Měření hloubky drážek a statistické vyhodnocení získaných dat

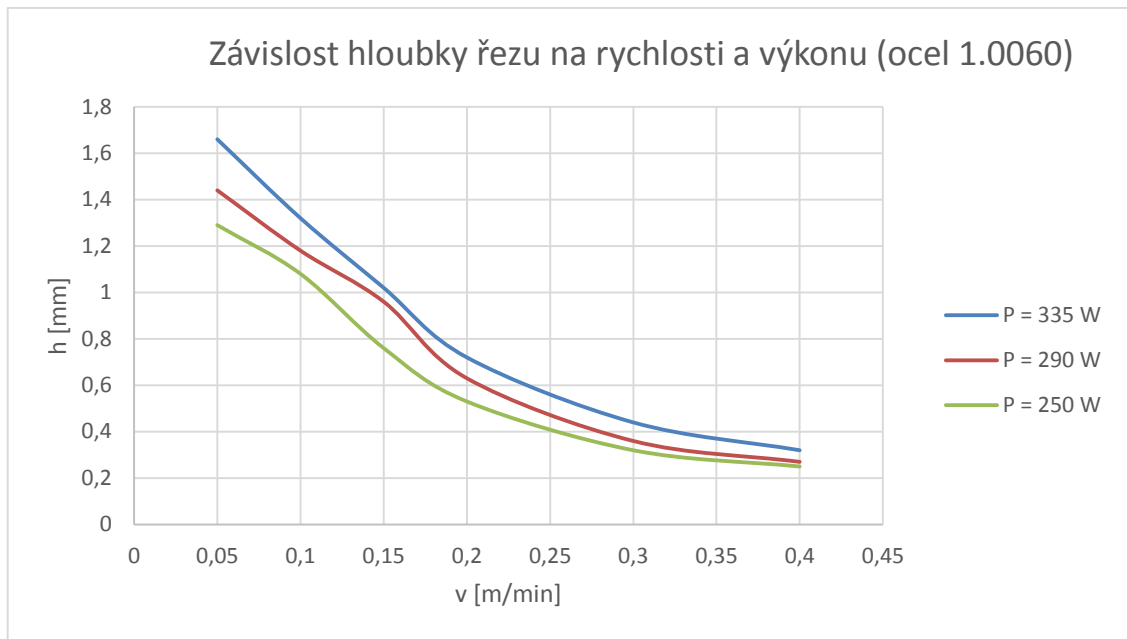
K měření hloubek byl použit mikroskop Carl Zeiss Jena s křížovým stolem se setinovým odečítáním. Provádělo se na bočních plochách vzorků.

7.6.1 Ocel 1.0060 (11 600)

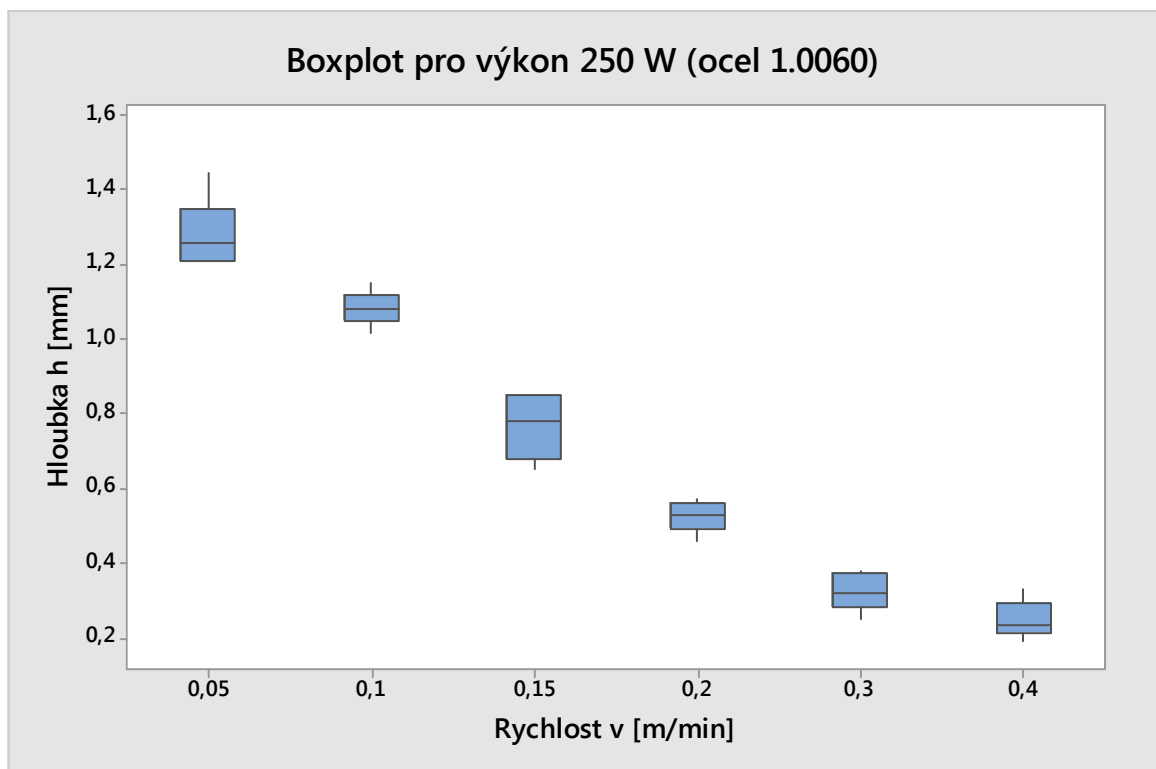
Tab. 14 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.0060)

Rychlost v [m/min]		0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
Hloubka h [mm]	P = 335 W	1,66	1,32	1,02	0,72	0,44	0,32
		1,45	1,41	1,11	0,81	0,38	0,31
		1,62	1,24	0,93	0,75	0,45	0,28
		1,73	1,21	0,95	0,65	0,49	0,26
		1,75	1,34	1,16	0,69	0,38	0,37
		1,59	1,36	1,11	0,73	0,42	0,41
		1,79	1,39	0,89	0,71	0,51	0,27
	\bar{x}	1,66	1,32	1,02	0,72	0,44	0,32
	P = 290 W	1,44	1,18	0,96	0,63	0,36	0,27
		1,46	1,09	1,12	0,58	0,31	0,31
		1,57	1,25	0,89	0,61	0,33	0,26
		1,49	1,15	0,92	0,52	0,42	0,26
		1,38	1,22	0,91	0,71	0,25	0,27
		1,32	1,15	0,85	0,69	0,48	0,31
		1,44	1,19	1,08	0,64	0,34	0,18
	\bar{x}	1,44	1,18	0,96	0,63	0,36	0,27
	P = 250 W	1,21	1,08	0,68	0,53	0,32	0,27
		1,25	1,06	0,85	0,49	0,25	0,29
1,32		1,11	0,65	0,56	0,35	0,21	
1,35		1,05	0,85	0,51	0,38	0,33	
1,45		1,15	0,68	0,46	0,28	0,21	
1,26		1,12	0,79	0,57	0,32	0,23	
1,21		1,02	0,78	0,56	0,37	0,19	
\bar{x}	1,29	1,08	0,75	0,53	0,32	0,25	

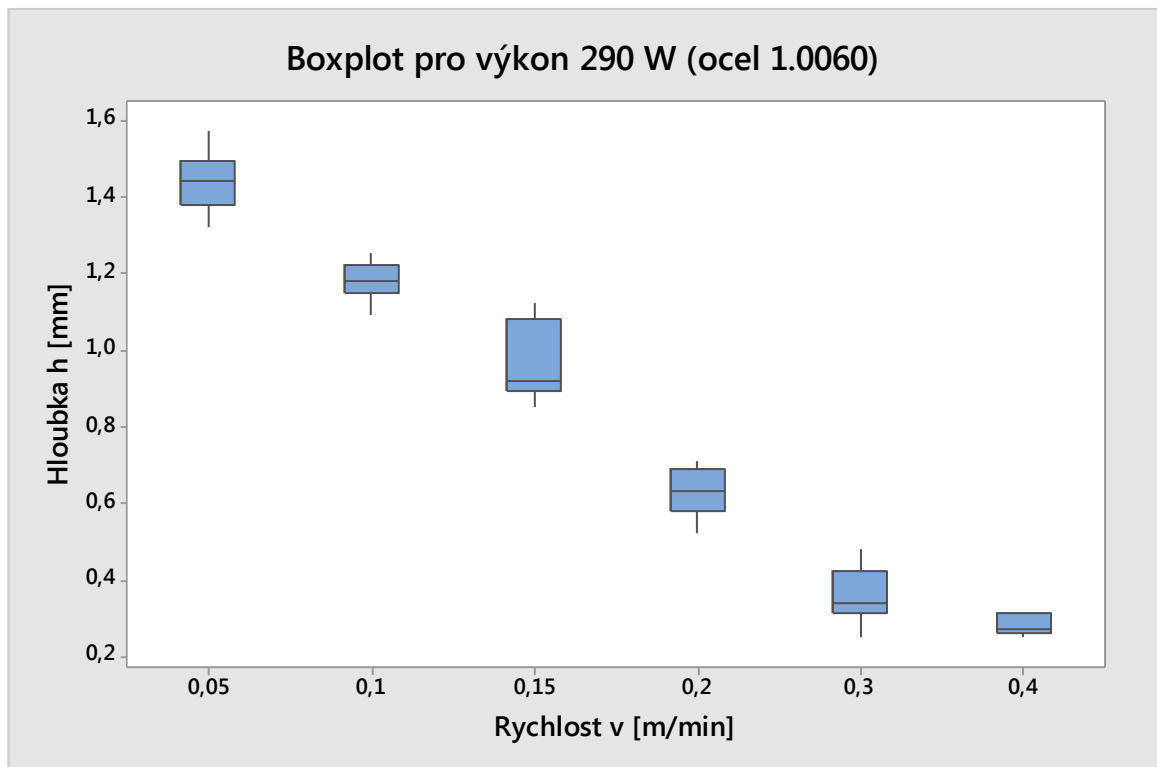
Na základě hodnot uvedených v tabulkách (Tab. 14 až 20) byly sestrojeny následující grafy (Obr. 45, 49, 53, 57, 61, 62 a 63) a boxploty, neboli krabicové diagramy (Obr. 46, 47, 48, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 58, 59 a 63), které jsou mnohem přehlednější a názornější v porovnání s tabulkovým způsobem záznamu změřených hodnot a závislostí.



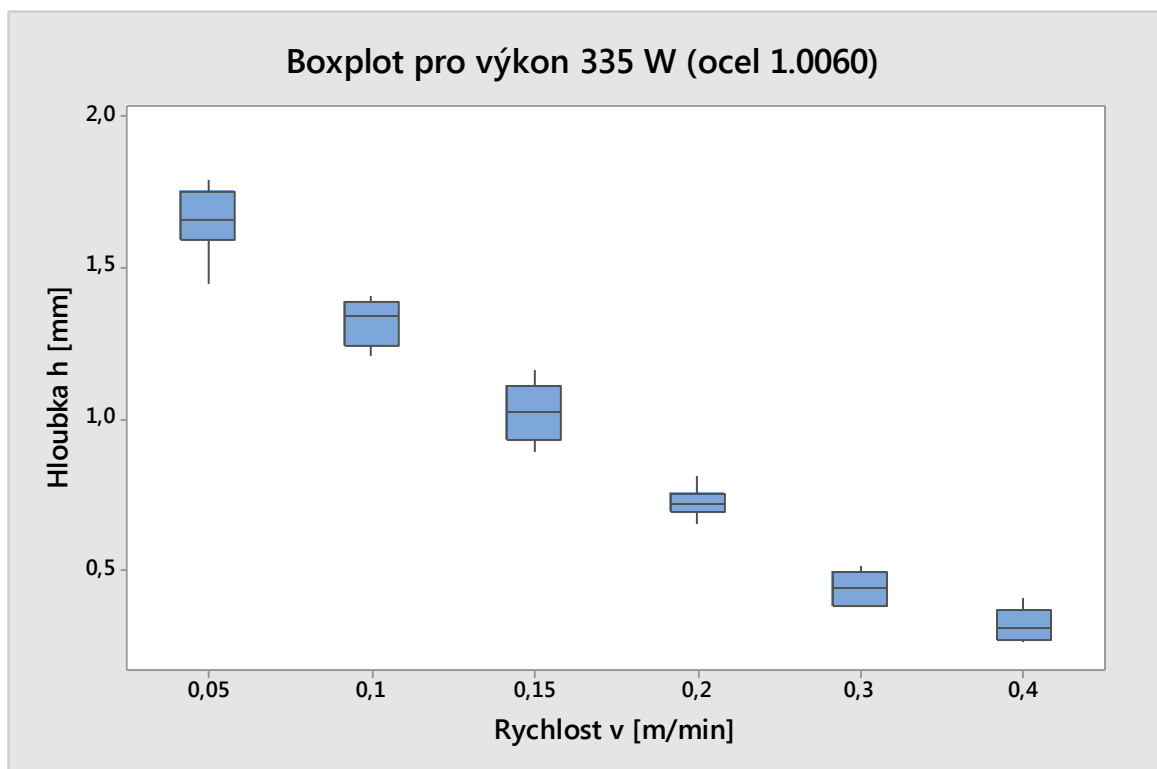
Obr. 45 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.0060)



Obr. 46 – Boxplot pro výkon 250 W (ocel 1.0060)



Obr. 47 – Boxplot pro výkon 290 W (ocel 1.0060)

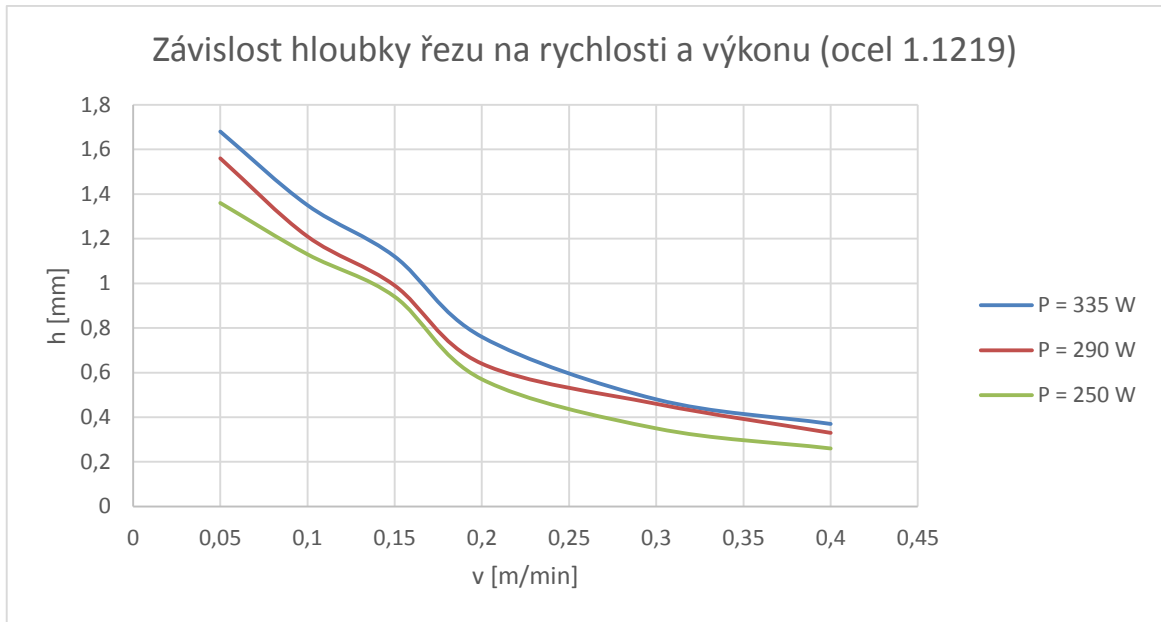


Obr. 48 – Boxplot pro výkon 335 W (ocel 1.0060)

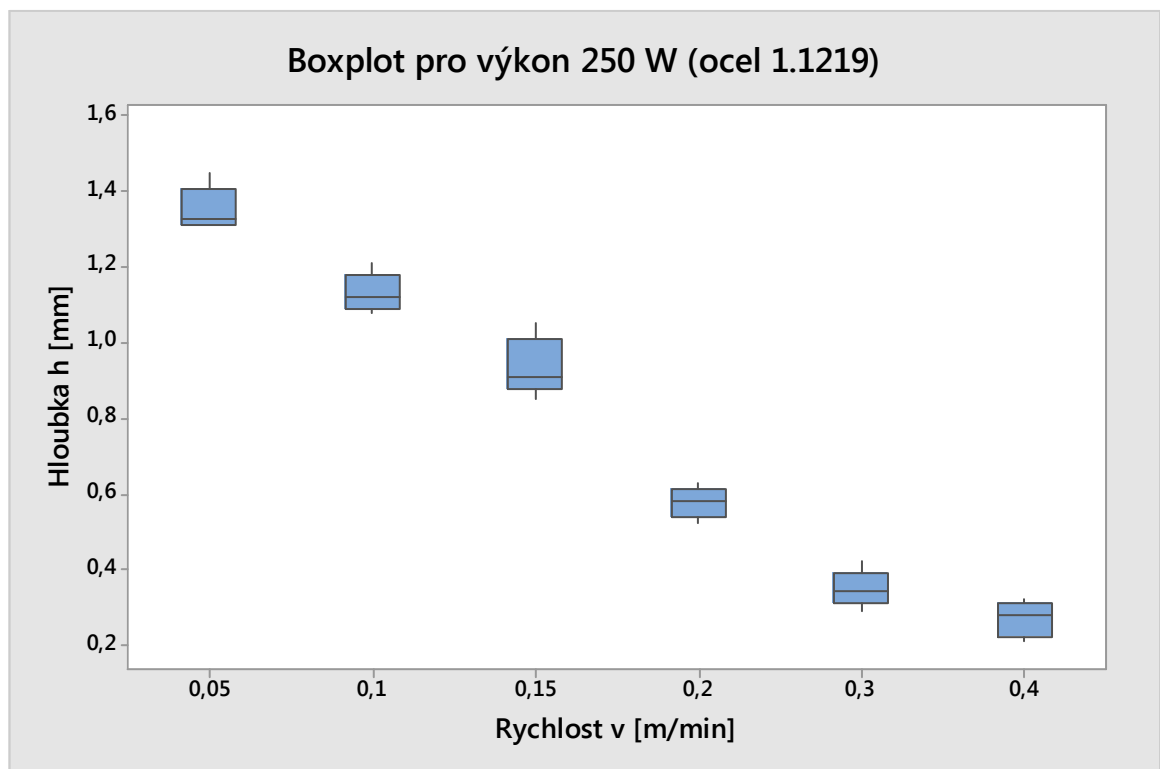
7.6.2 Ocel 1.1219 (12 060)

Tab. 15 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.1219)

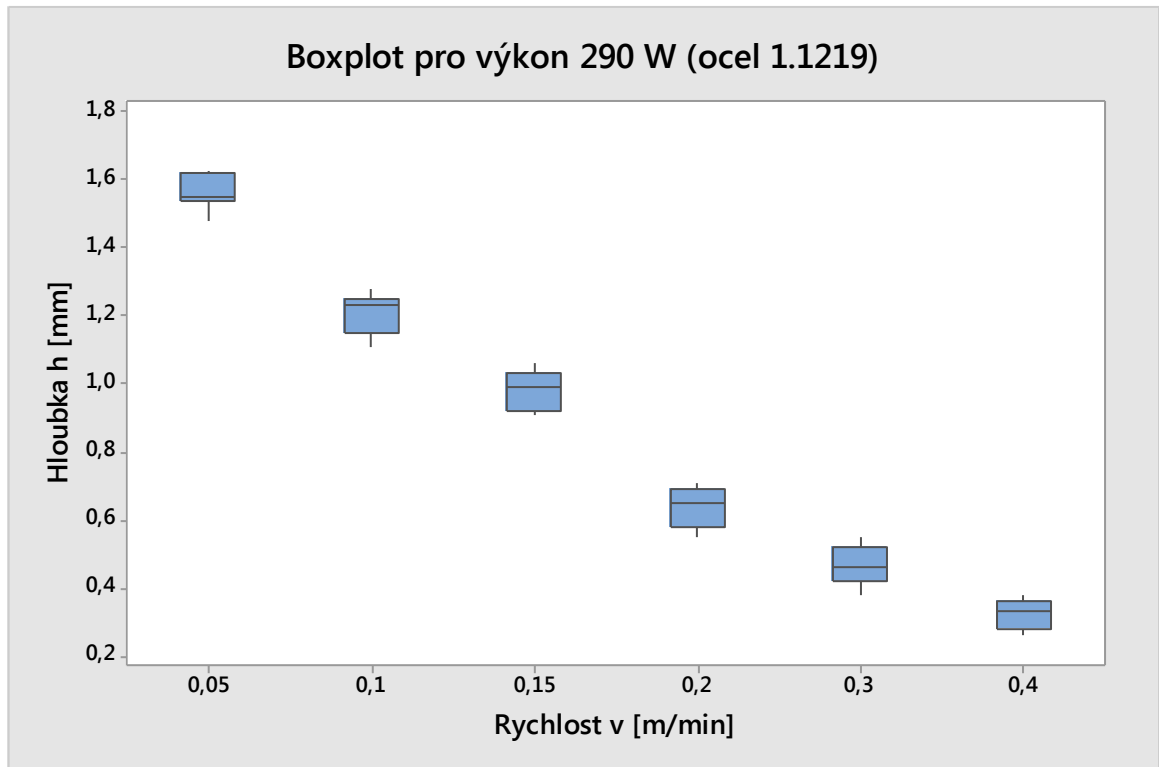
Rychlost v [m/min]		0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
Hloubka h [mm]	P = 335 W	1,63	1,29	1,12	0,73	0,42	0,39
		1,72	1,35	1,08	0,71	0,48	0,35
		1,69	1,31	1,09	0,81	0,37	0,37
		1,58	1,29	1,18	0,71	0,44	0,46
		1,68	1,35	1,12	0,74	0,53	0,41
		1,74	1,45	1,16	0,81	0,51	0,38
		1,69	1,38	1,11	0,84	0,59	0,26
	\bar{x}	1,68	1,35	1,12	0,76	0,48	0,37
	P = 290 W	1,54	1,11	0,91	0,58	0,52	0,26
		1,62	1,15	0,92	0,65	0,55	0,33
		1,63	1,25	0,99	0,63	0,48	0,28
		1,48	1,23	0,98	0,55	0,43	0,38
		1,56	1,17	1,03	0,65	0,42	0,35
		1,55	1,28	1,01	0,69	0,38	0,33
		1,55	1,25	1,06	0,71	0,46	0,36
	\bar{x}	1,56	1,21	0,99	0,64	0,46	0,33
	P = 250 W	1,41	1,12	0,96	0,54	0,33	0,23
		1,36	1,08	0,88	0,61	0,31	0,22
		1,45	1,09	0,91	0,63	0,34	0,28
		1,33	1,15	0,89	0,59	0,29	0,31
		1,31	1,18	0,85	0,58	0,35	0,32
1,33		1,21	1,01	0,55	0,42	0,28	
1,31		1,11	1,05	0,52	0,39	0,21	
\bar{x}	1,36	1,13	0,94	0,57	0,35	0,26	



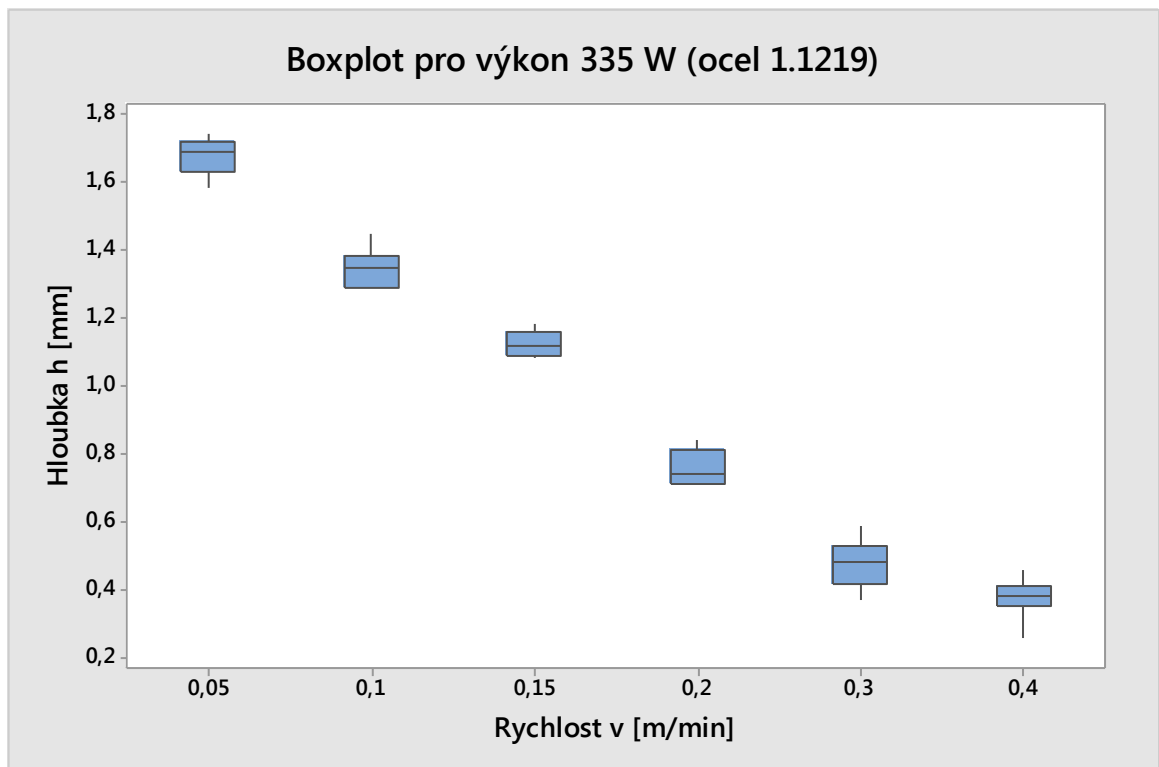
Obr. 49 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.1219)



Obr. 50 – Boxplot pro výkon 250 W (ocel 1.1219)



Obr. 51 – Boxplot pro výkon 290 W (ocel 1.1219)

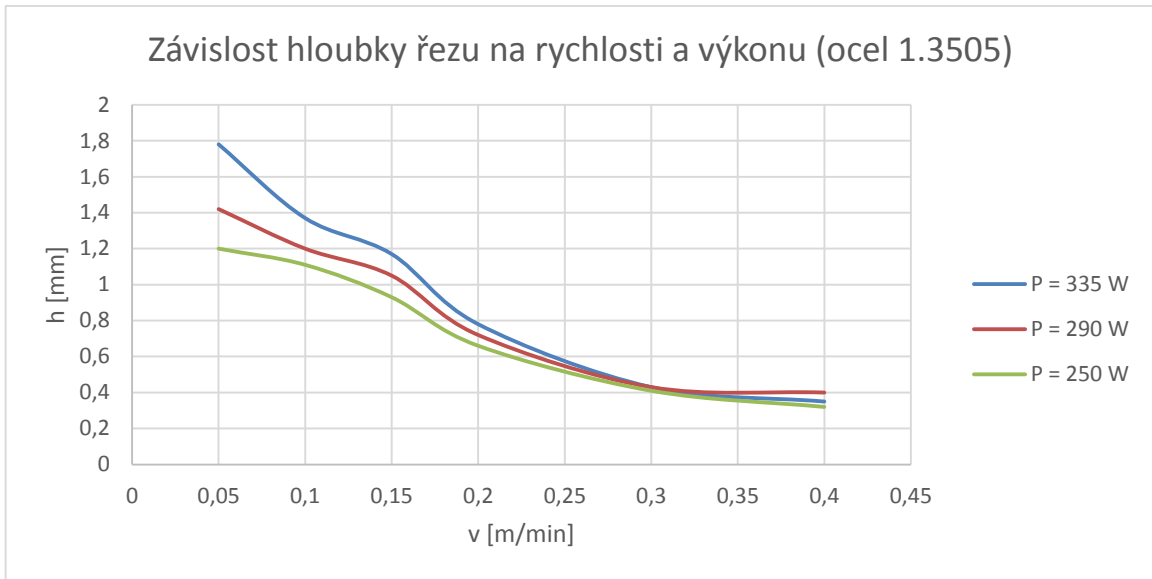


Obr. 52 – Boxplot pro výkon 335 W (ocel 1.1219)

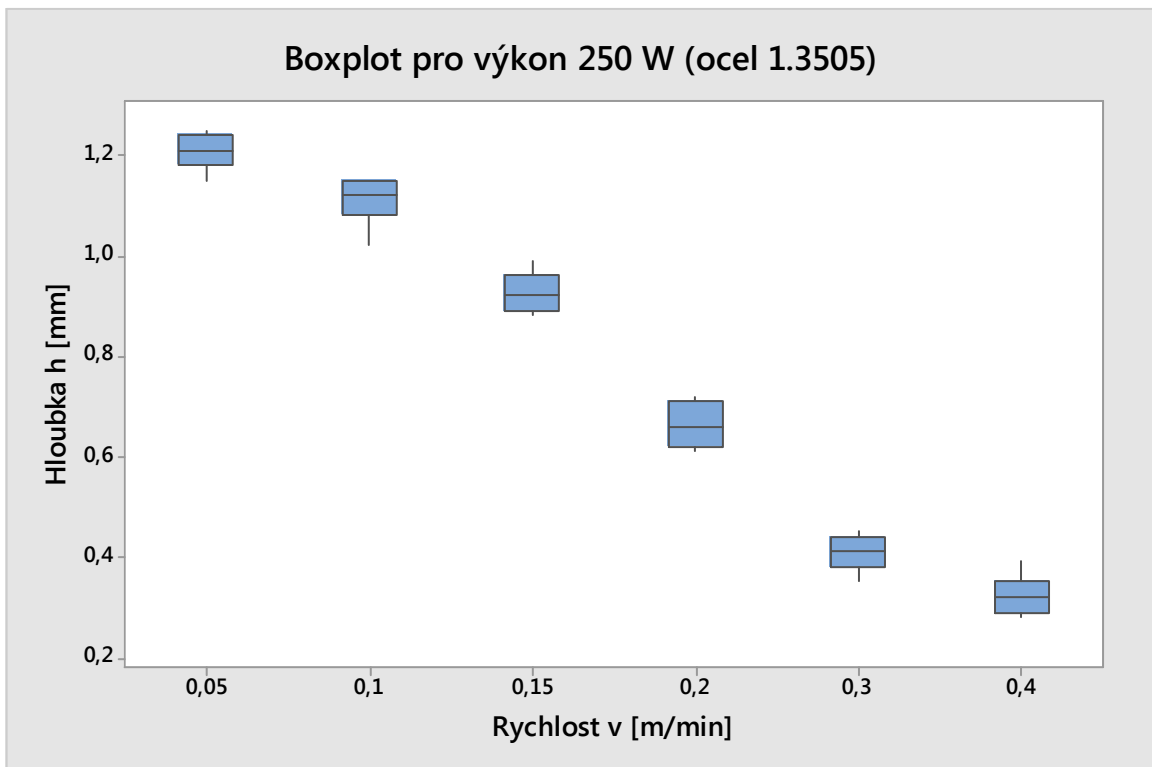
7.6.3 Ocel 1.3505 (14 109)

Tab. 16 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.3505)

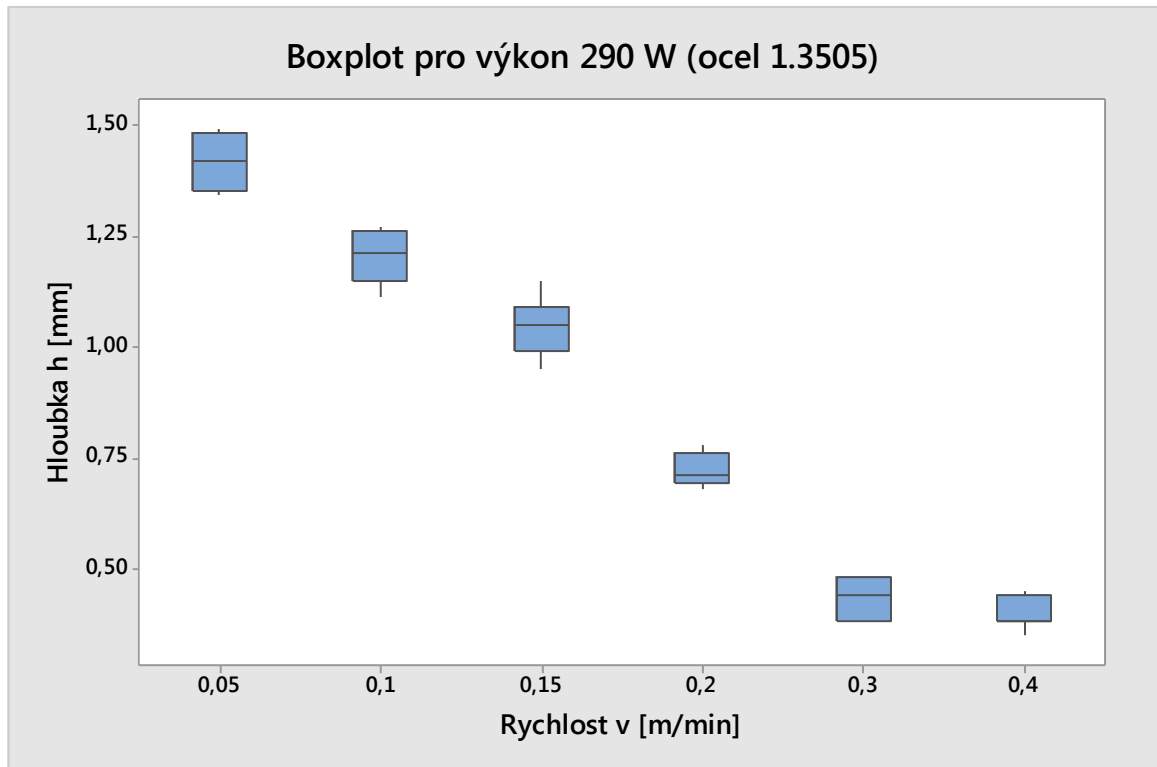
Rychlost v [m/min]		0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
Hloubka h [mm]	P = 335 W	1,75	1,35	1,21	0,77	0,39	0,29
		1,74	1,41	1,12	0,81	0,37	0,34
		1,77	1,39	1,24	0,71	0,48	0,37
		1,82	1,31	1,15	0,82	0,44	0,41
		1,84	1,41	1,25	0,82	0,49	0,28
		1,78	1,42	1,12	0,84	0,39	0,35
		1,77	1,33	1,11	0,72	0,47	0,39
	\bar{x}	1,78	1,37	1,17	0,78	0,43	0,35
	P = 290 W	1,48	1,11	0,99	0,68	0,38	0,44
		1,49	1,27	0,95	0,71	0,44	0,45
		1,34	1,26	1,01	0,69	0,48	0,38
		1,38	1,21	1,05	0,69	0,38	0,41
		1,42	1,25	1,08	0,76	0,38	0,35
		1,45	1,18	1,15	0,78	0,44	0,38
		1,35	1,15	1,09	0,76	0,48	0,38
	\bar{x}	1,42	1,20	1,05	0,72	0,43	0,40
	P = 250 W	1,21	1,02	0,89	0,72	0,35	0,35
		1,15	1,15	0,95	0,61	0,39	0,28
		1,21	1,08	0,96	0,69	0,45	0,39
		1,18	1,12	0,88	0,66	0,41	0,32
		1,25	1,13	0,99	0,71	0,38	0,29
1,24		1,15	0,89	0,63	0,44	0,31	
1,19		1,09	0,92	0,62	0,42	0,32	
\bar{x}	1,20	1,11	0,93	0,66	0,41	0,32	



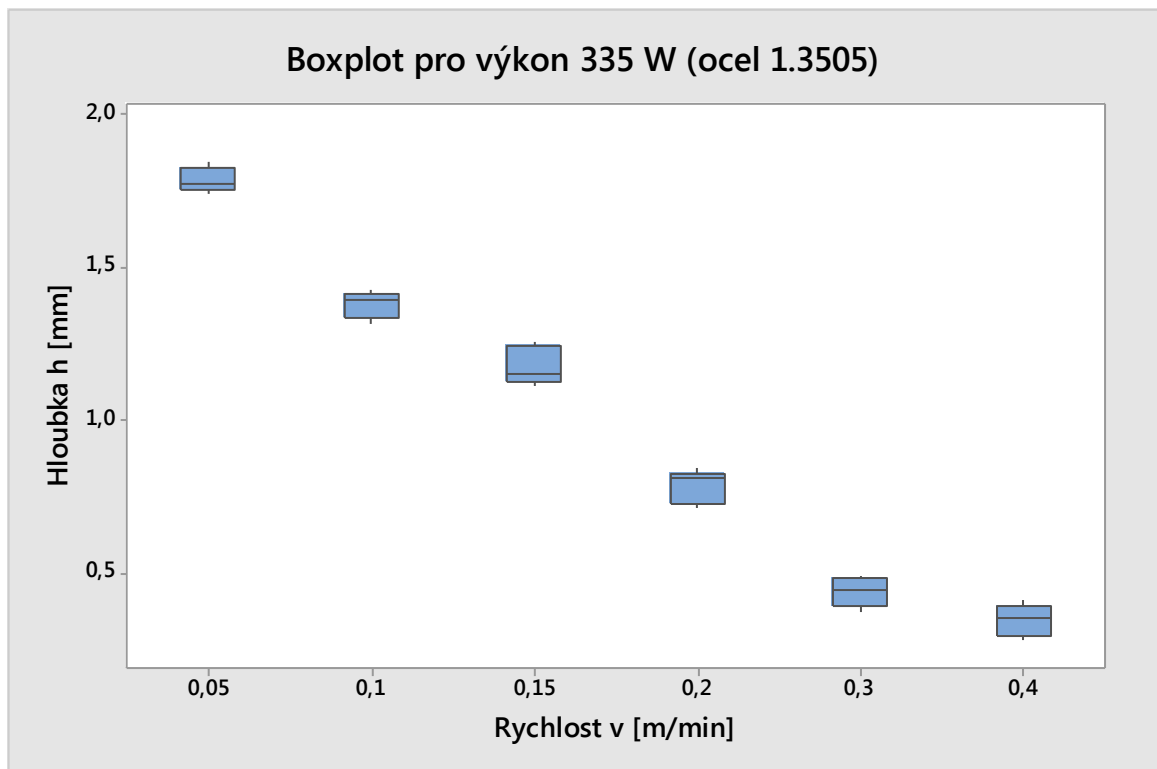
Obr. 53 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.3505)



Obr. 54 – Boxplot pro výkon 250 W (ocel 1.3505)



Obr. 55 – Boxplot pro výkon 290 W (ocel 1.3505)

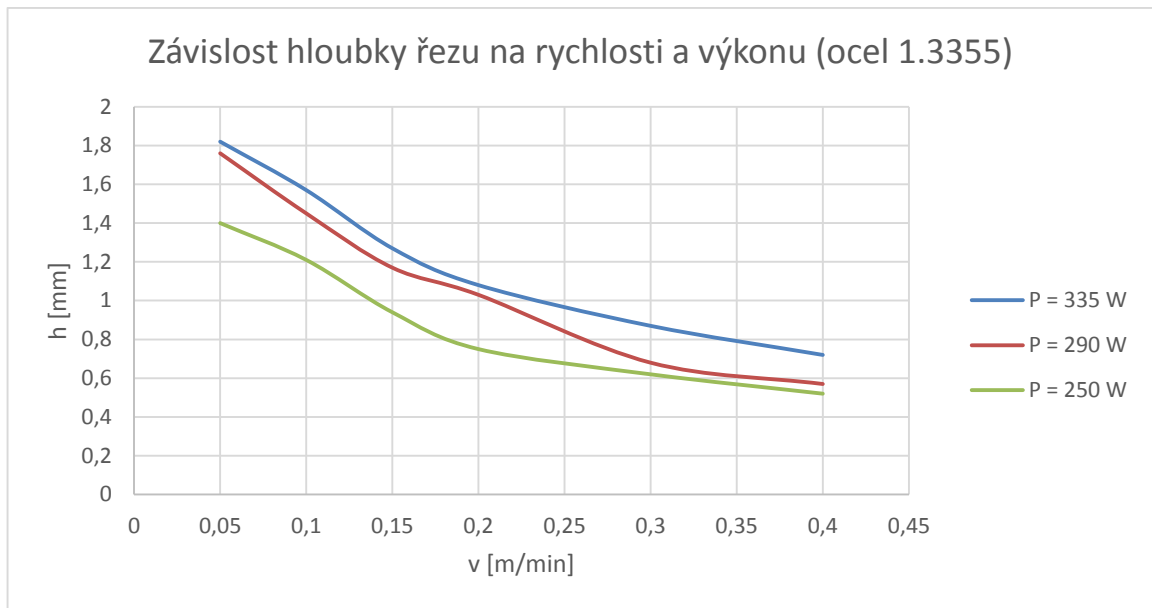


Obr. 56 – Boxplot pro výkon 335 W (ocel 1.3505)

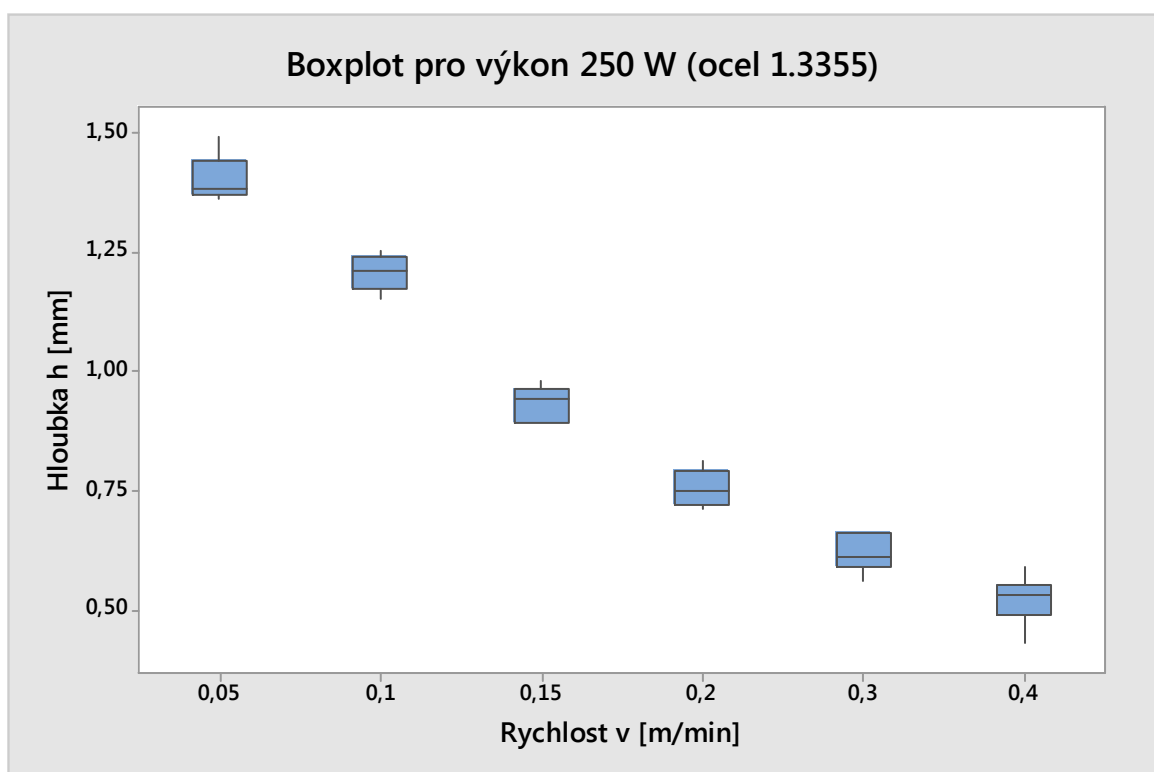
7.6.4 Ocel 1.3355 (19 824)

Tab. 17 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.3355)

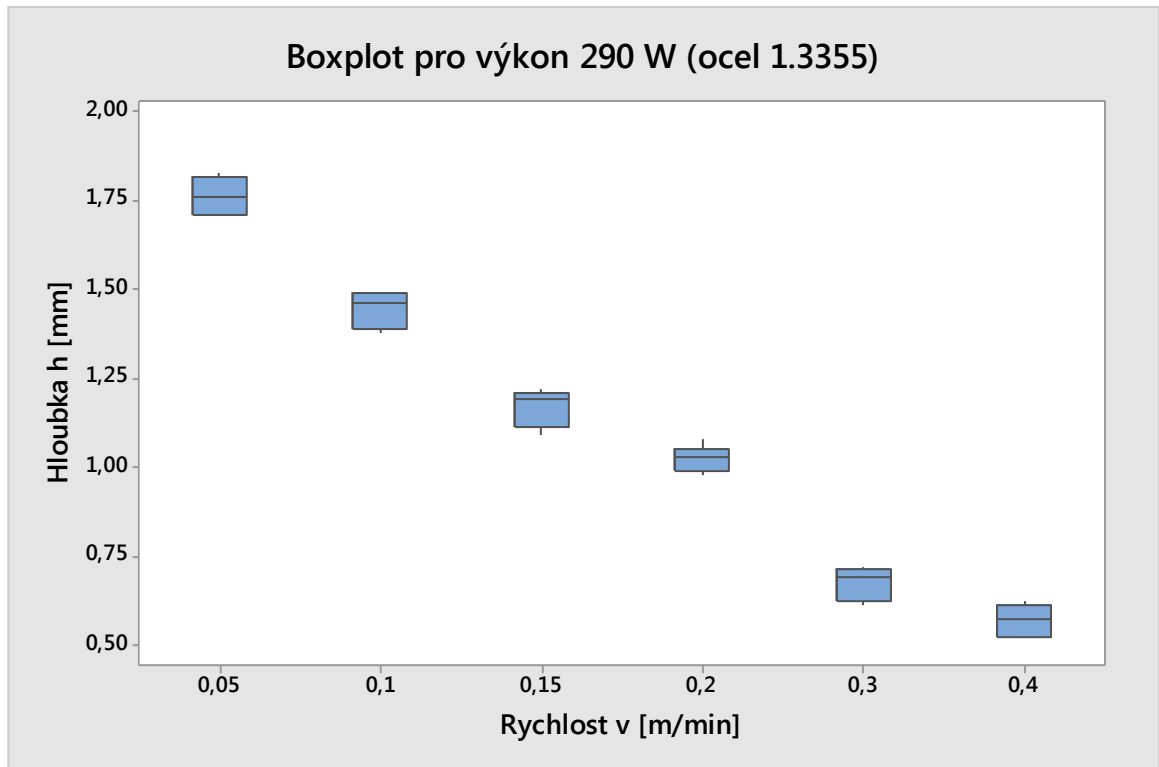
Rychlost v [m/min]		0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
Hloubka h [mm]	P = 335 W	1,75	1,62	1,31	1,11	0,85	0,65
		1,83	1,52	1,18	1,08	0,79	0,77
		1,86	1,51	1,27	1,09	0,91	0,75
		1,76	1,62	1,24	0,98	0,89	0,69
		1,82	1,56	1,34	1,09	0,81	0,74
		1,86	1,59	1,25	1,08	0,92	0,75
		1,88	1,61	1,27	1,11	0,91	0,69
	\bar{x}	1,82	1,58	1,27	1,08	0,87	0,72
	P = 290 W	1,76	1,38	1,09	1,08	0,68	0,52
		1,82	1,49	1,21	1,03	0,71	0,57
		1,71	1,49	1,11	0,98	0,61	0,61
		1,75	1,39	1,19	0,99	0,62	0,59
		1,83	1,45	1,22	1,05	0,72	0,62
		1,76	1,46	1,17	1,01	0,71	0,54
		1,71	1,46	1,21	1,05	0,69	0,52
	\bar{x}	1,76	1,45	1,17	1,03	0,68	0,57
	P = 250 W	1,41	1,15	0,89	0,72	0,61	0,52
		1,49	1,19	0,94	0,75	0,59	0,55
		1,38	1,25	0,96	0,79	0,56	0,43
		1,44	1,17	0,98	0,81	0,66	0,49
		1,38	1,21	0,89	0,72	0,66	0,59
1,37		1,23	0,96	0,71	0,62	0,55	
1,36		1,24	0,94	0,77	0,61	0,53	
\bar{x}	1,40	1,21	0,94	0,75	0,62	0,52	



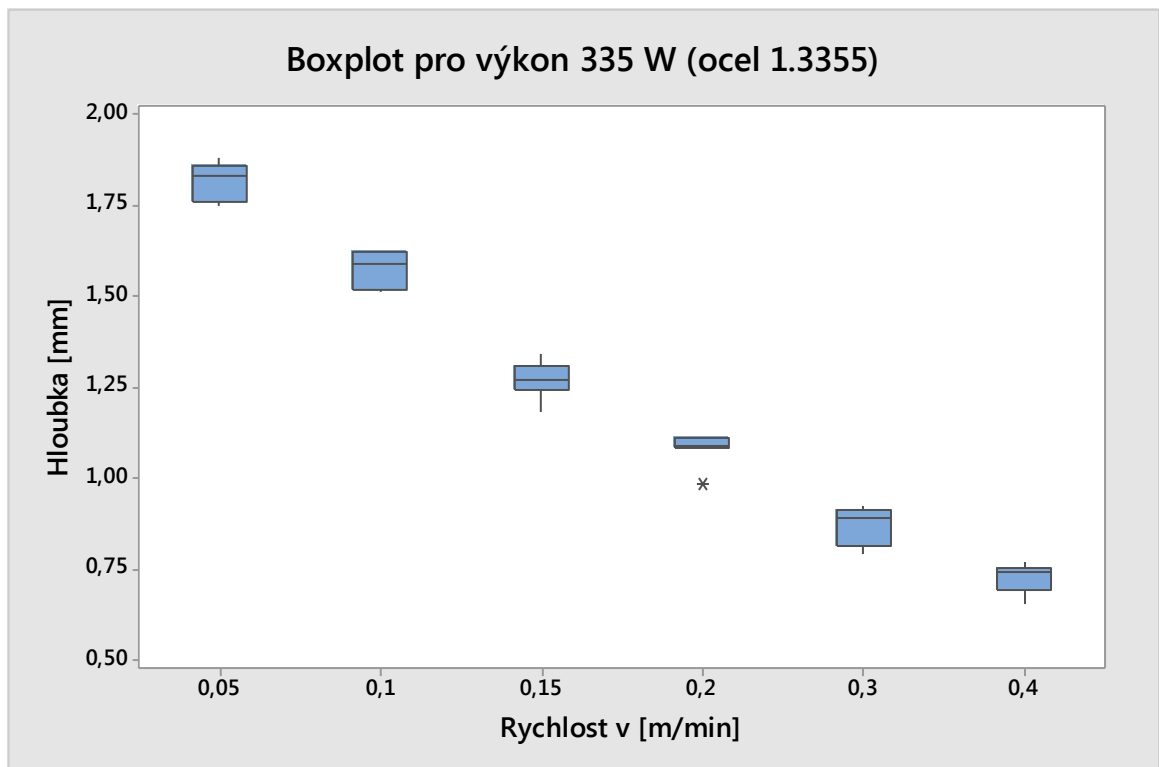
Obr. 57 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.3355)



Obr. 58 – Boxplot pro výkon 250 W (ocel 1.3355)



Obr. 59 – Boxplot pro výkon 290 W (ocel 1.3355)



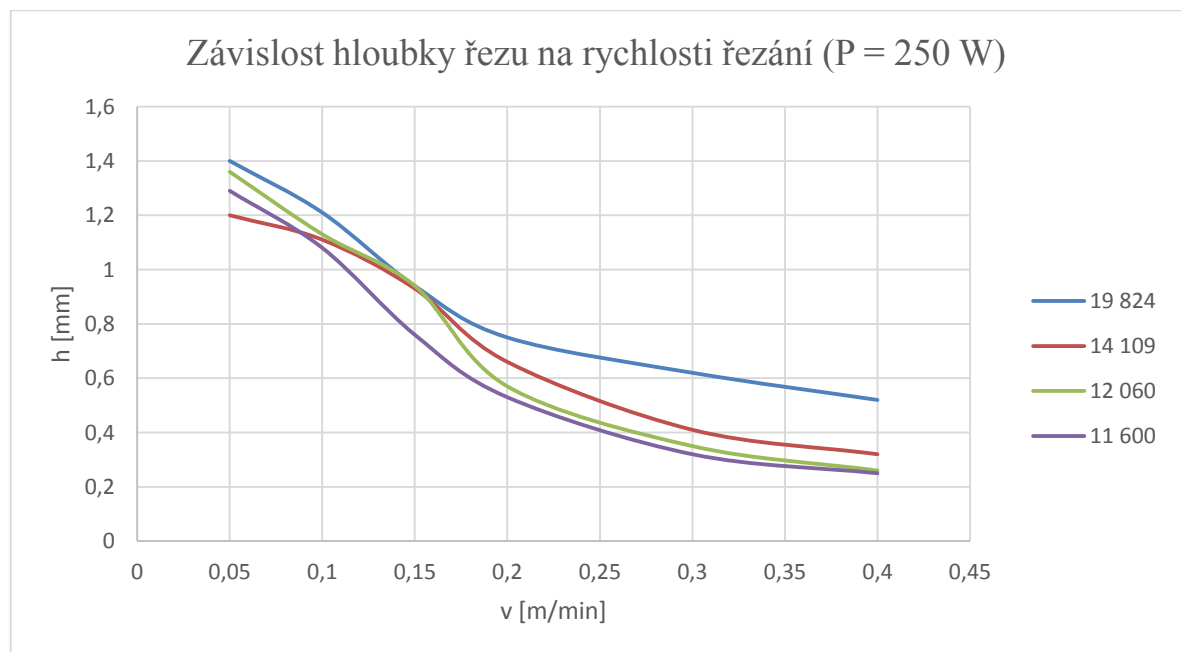
Obr. 60 – Boxplot pro výkon 335 W (ocel 1.3355)

7.7 Grafy závislosti naměřených hodnot

7.7.1 Výkon $P = 250 \text{ W}$

Tab. 18 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 250 \text{ W}$)

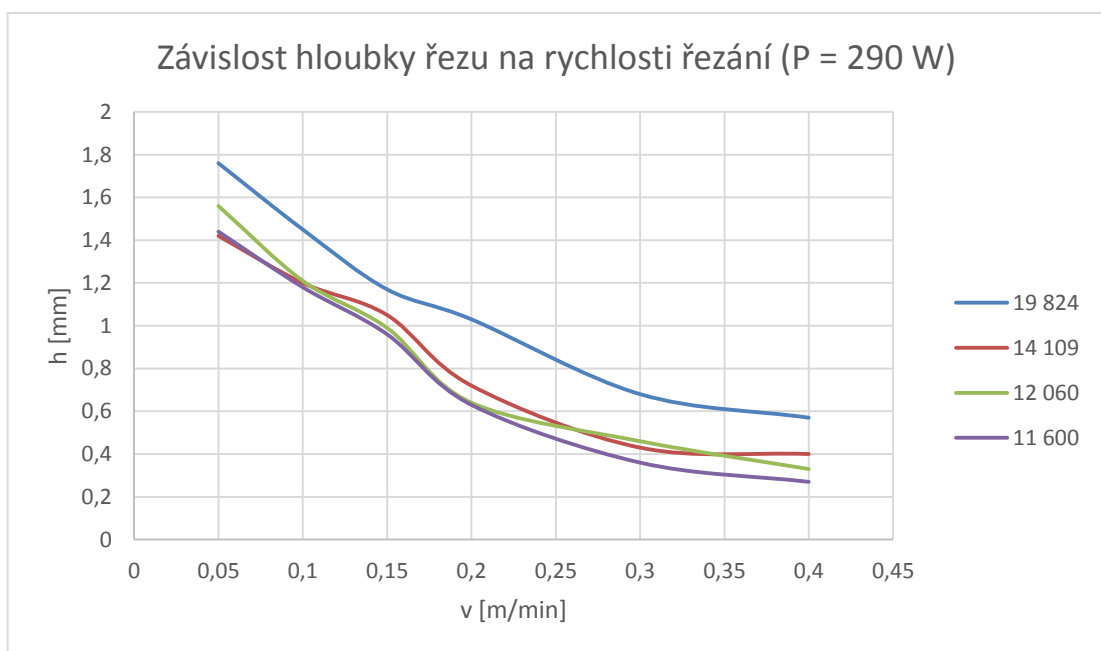
$P = 250 \text{ W}$		Rychlost – v [m/min]					
Typ oceli		0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
19 824	\bar{x}	1,4	1,21	0,94	0,75	0,62	0,52
14 109		1,2	1,11	0,93	0,66	0,41	0,32
12 060		1,36	1,13	0,94	0,57	0,35	0,26
11 600		1,29	1,08	0,76	0,53	0,32	0,25



Obr. 61 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 250 \text{ W}$)

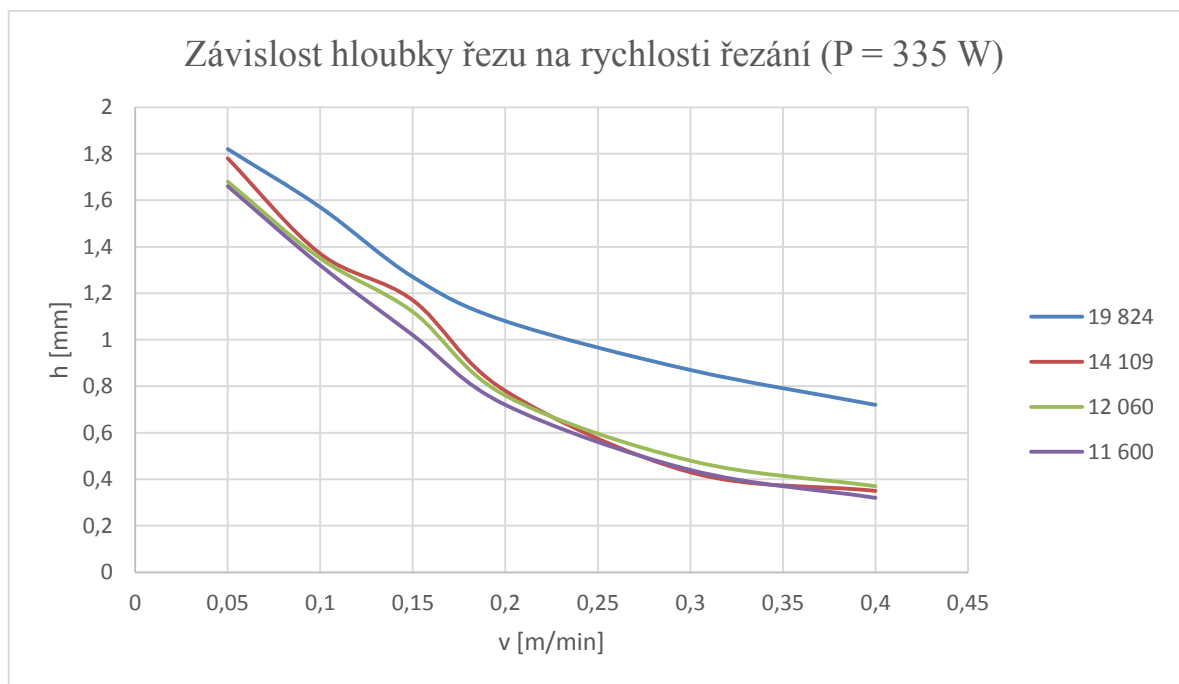
7.7.2 Výkon $P = 290 \text{ W}$ Tab. 19 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 290 \text{ W}$)

$P = 290 \text{ W}$		Rychlost – v [m/min]					
Typ oceli		0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
19 824	\bar{x}	1,76	1,45	1,17	1,03	0,68	0,57
14 109		1,42	1,2	1,05	0,72	0,43	0,4
12 060		1,56	1,21	0,99	0,64	0,46	0,33
11 600		1,44	1,18	0,96	0,63	0,36	0,27

Obr. 62 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 290 \text{ W}$)

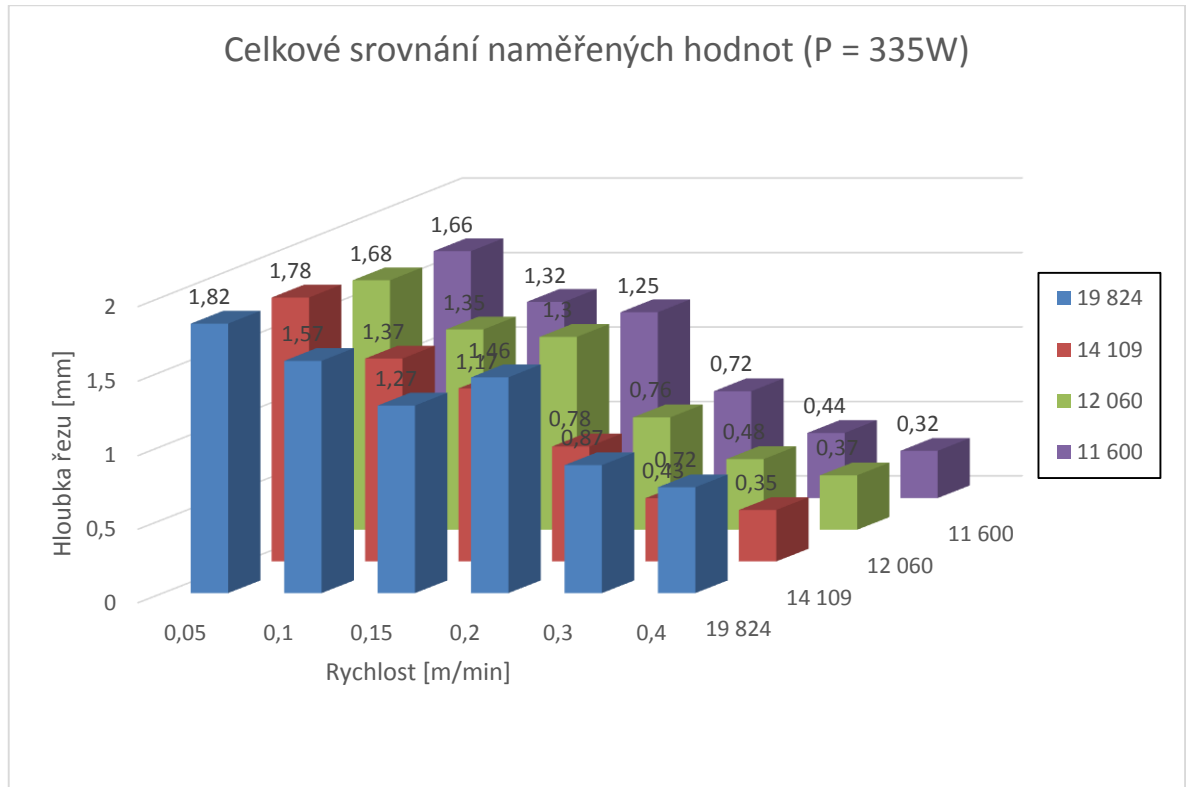
7.7.3 Výkon $P = 335 \text{ W}$ Tab. 20 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 335 \text{ W}$)

$P = 335 \text{ W}$		Rychlost – v [m/min]					
Typ oceli		0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
19 824	\bar{x}	1,82	1,57	1,27	1,08	0,87	0,72
14 109		1,78	1,37	1,17	0,78	0,43	0,35
12 060		1,68	1,35	1,12	0,76	0,48	0,37
11 600		1,66	1,32	1,02	0,72	0,44	0,32

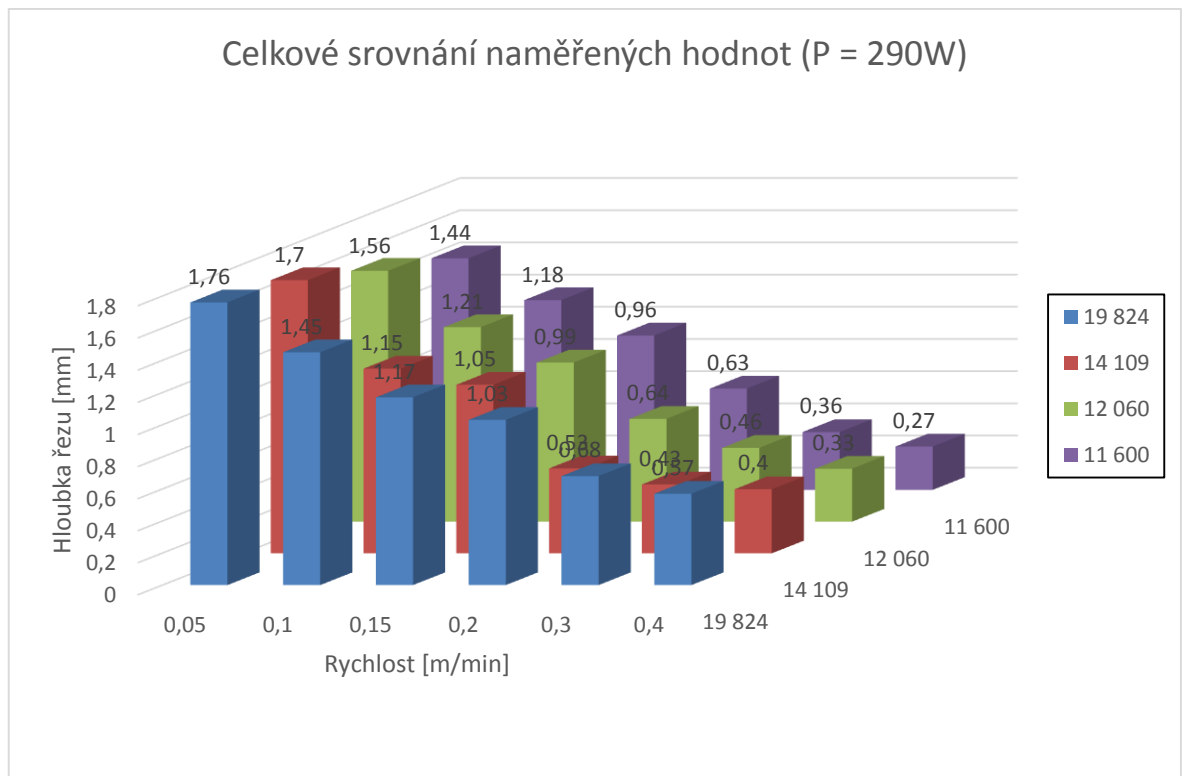
Obr. 63 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 335 \text{ W}$)

Z výsledných grafů a boxplotových diagramů je patrné, že s rostoucí řeznou rychlostí klesá hloubka řezu. Závislost se potvrdila u všech druhů zkoušených materiálů i výkonů. Zároveň ocel třídy 11 vykazuje nejnižší hodnoty a ocel třídy 19 zase naopak hodnoty nejvyšší, což je způsobeno lepší laserovou obrobiteľností, než u ostatních ocelí. Hodnoty jsou znázorněny v následujících sloupcových grafech (Obr. 64, 65, 66 a 67).

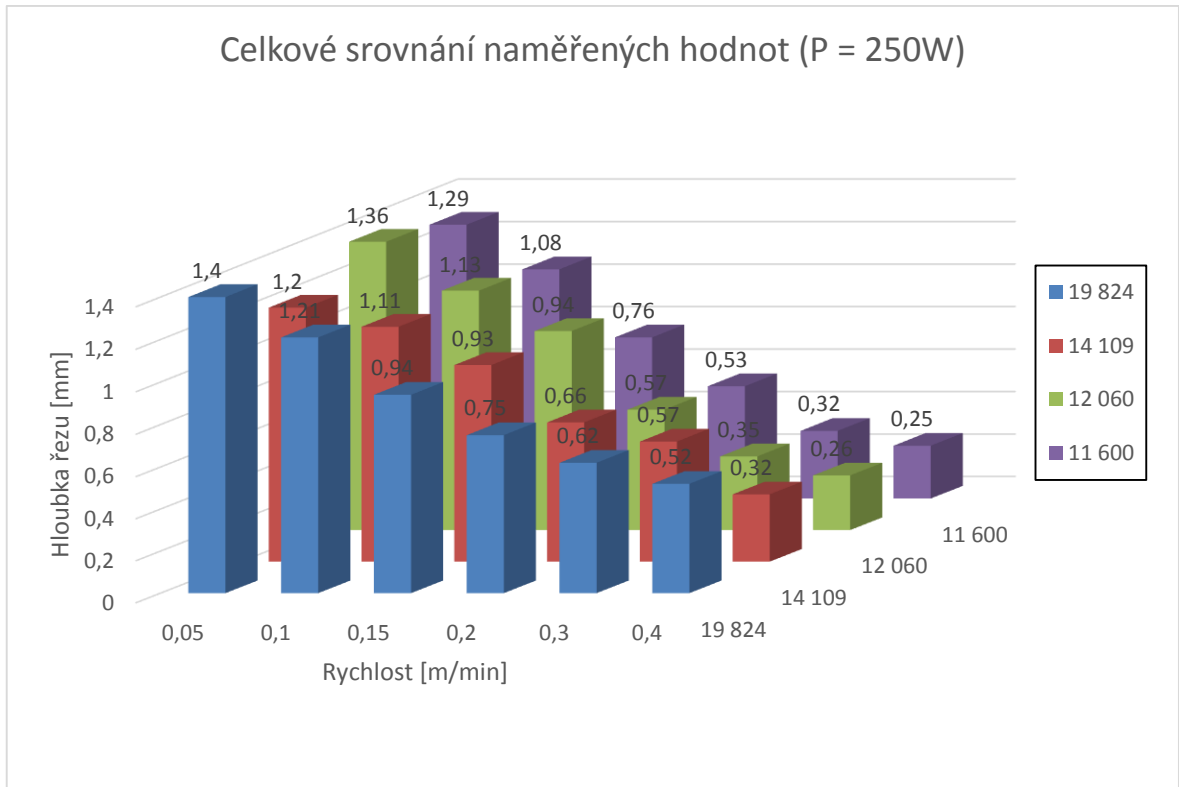
7.8 Celkové srovnání naměřených hodnot



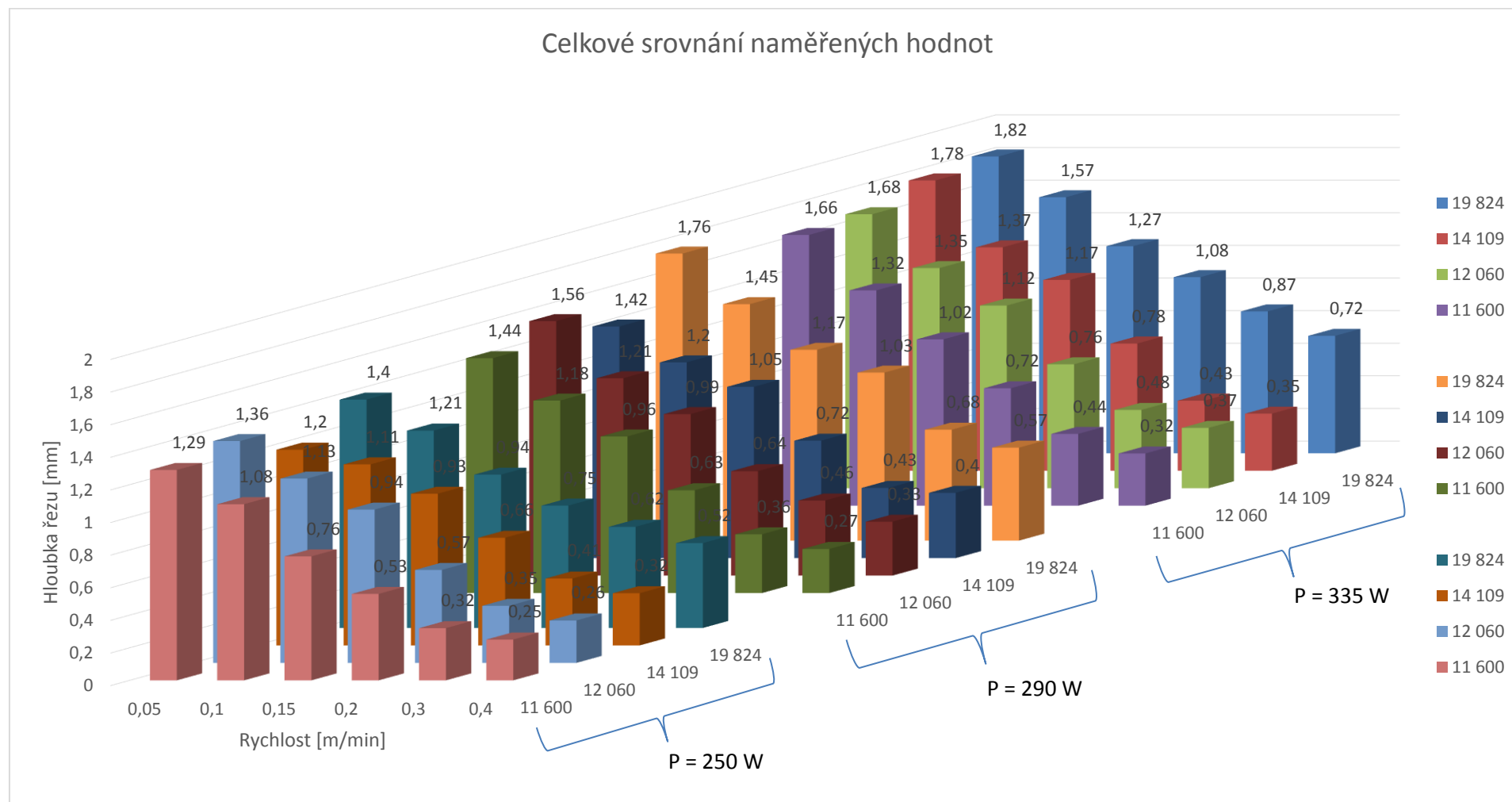
Obr. 64 – Celkové srovnání naměřených hodnot (P = 335 W)



Obr. 65 – Celkové srovnání naměřených hodnot (P = 290 W)



Obr. 66 – Celkové srovnání naměřených hodnot ($P = 250 W$)

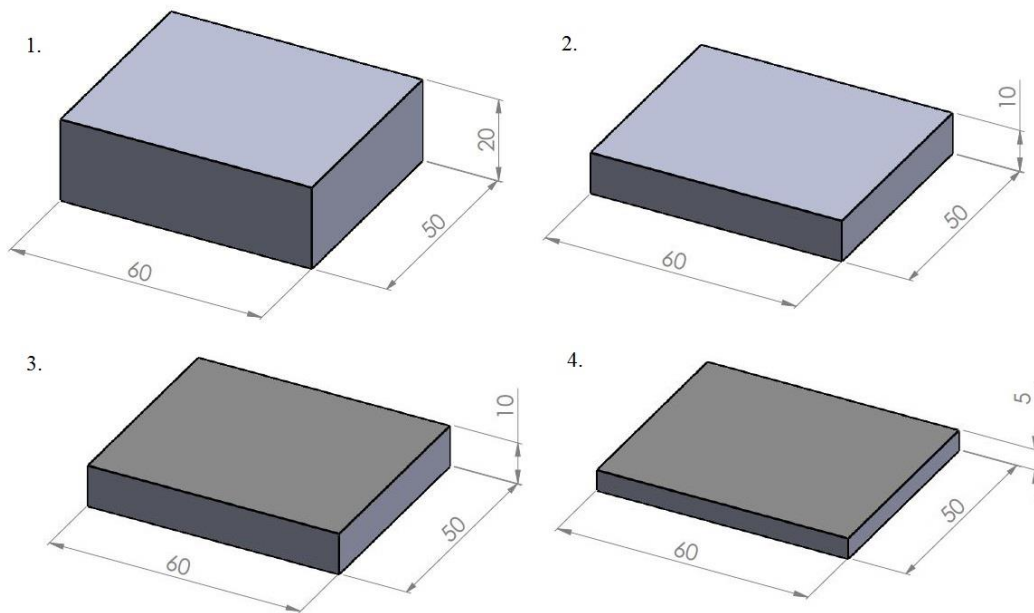


Obr. 67 – Celkové srovnání naměřených hodnot

8 EXPERIMENTÁLNÍ ŘEZÁNÍ OCELI A DURALU PŘI ZMĚNĚ TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ

8.1 Tvar vzorků

Vzorky jsou vyrobeny o rozměrech 60 x 50 mm. První z nich byla klasická konstrukční ocel s označením 1.0038 (11 375), která měla tloušťku 20 a 10 mm. Druhý materiál značky 3.1355 (42 4203) je dural o tloušťce 10 a 5 mm.



Obr. 68 – Rozměry všech vzorků

(1. Ocel tloušťky 20 mm, 2. Ocel tloušťky 10 mm, 3. Dural tloušťky 10 mm, 4. Dural tloušťky 5 mm)

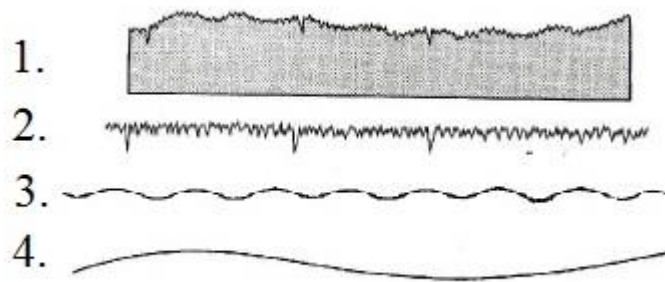
8.2 Drsnost povrchu

Drsnost se charakterizuje jako souhrn nerovností skutečného povrchu součásti v určité oblasti. Tyto nerovnosti se určují podle způsobu obrábění, vzhledu a hloubky stop, které na povrchu součásti zanechá nástroj po příslušné technologické operaci. Drsnost není stejná ve všech směrech u různých způsobů obrábění (např.: soustružení, frézování a další) a proto se rozlišuje na drsnost příčnou a podélnou. Příčná je ve směru kolmém na řezný pohyb a podélná v rovnoběžném směru na řezný pohyb. Nejrozšířenějšími přístroji pro měření drsnosti povrchu jsou dotykové profiloměry, kde se po povrchu součásti posouvá měřící

zařízení s velmi malým zaoblením hrotu. Dalšími zařízeními jsou drsnoměry, bezkontaktní porovnávací a měřicí mikroskopy, optické bezdotykové profiloměry a jiné přístroje.

Povrch materiálu se obecně jeví jako:

- Drsnost – R
- Vlnitost – W
- Základní profil – P

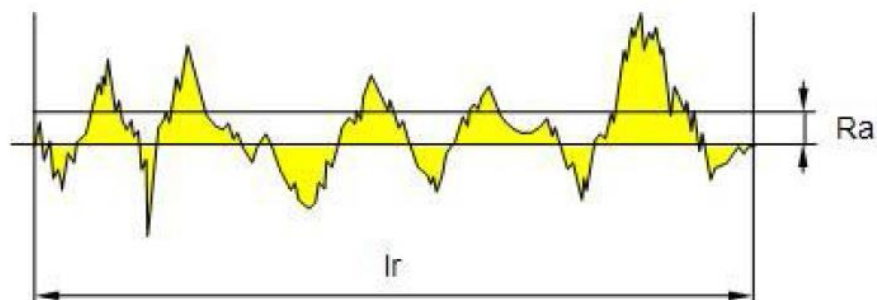


Obr. 69 – Základní pojmy (1. Skutečný profil povrchu, 2. Drsnost povrchu, 3. Vlnitost povrchu, 4. Obecný tvar povrchu) [48]

8.3 Profil drsnosti

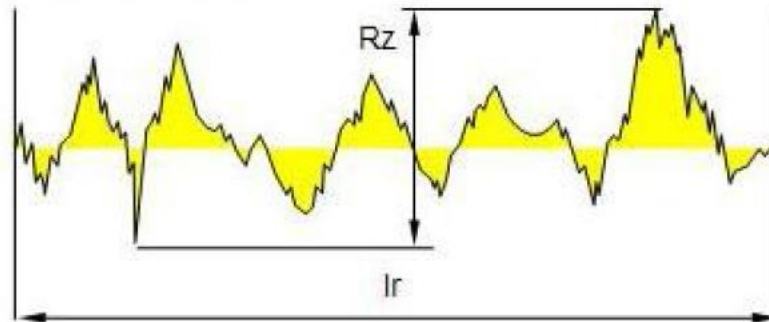
Jedná se o profil, který je základem pro hodnocení parametrů drsnosti a vzniká odfiltrováním vlnitosti povrchu a základního profilu. Jednotkou drsností povrchu je pak číselná hodnota v μm s použitým parametrem, např. R_a 1,6. V praxi je nejvíce využíváno parametrů R_a a R_z .

- Průměrná aritmetická úchylka R_a [μm] - Je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic v rozsahu základní délky.



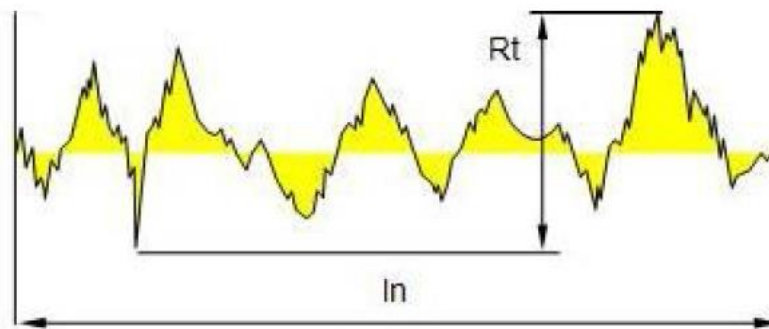
Obr. 70 – Průměrná aritmetická hodnota R_a [49]

- Největší výška profilu R_z [μm] - Je součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.



Obr. 71 – Nejvyšší výška profilu R_z [49]

- Celková výška profilu R_t [μm] - Je součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky. [48]



Obr. 72 – Celková výška profilu R_t [49]

8.4 Vlnitost povrchu

Představuje nerovnost, na které je nanesen profil drsnosti. Může být způsobena kmitáním, chvěním nebo deformací obrobku, příp. pnutím v materiálu součásti. Vlnitost bývá přisuzována hlavně vlastnostem stroje, např. špatné vyváženosti broušícího kotouče, nepřesností vodicích šroubů, nedostatečné tuhosti apod. [50]

8.5 Materiály vzorků

Tab. 21 – Přřazení značek oceli a hliníku ČSN ke značkám EN

Třída oceli ČSN	ČSN EN 10027 - 2	
	Značka	Číselné označení
11 375	S235JRG2	1.0038
42 4203	AW 2024	3.1355

8.5.1 Ocel 1.0038 (11 375)

Neušlechtilá konstrukční ocel je vhodná ke svařování. Nejčastěji se vyskytuje jako součásti konstrukcí a strojů středních tloušťek, které jsou namáhané staticky i dynamicky. Dále také u součástí vyráběných z plechů, podélně svařovaných dutých profilů, vtokových částí vodních turbín a spojek a podvozků vagónů. [51]

8.5.2 Dural ocel 3.1355 (42 4203)

Konstrukční slitina hliníku tvářená pro všeobecné účely obsahuje vysokou pevnost, menší tažnost a dobrou obrobiteľnost. Tvářitelnost je velmi dobrá za tepla i za studena. Svařitelnost je nevhodná, kromě bodového odporového svařování. Používá se u kol nákladních automobilů, nýtů a u různých konstrukčních (nýtových, nebo šroubových) účelů v dopravních prostředcích. Dále jsou duraly vhodné pro plechové, pásové a drátové díly. Tyče se z něj vyrábějí kruhové, čtvercové, ploché a šestihranné. [52]

8.6 Provedení zkoušky

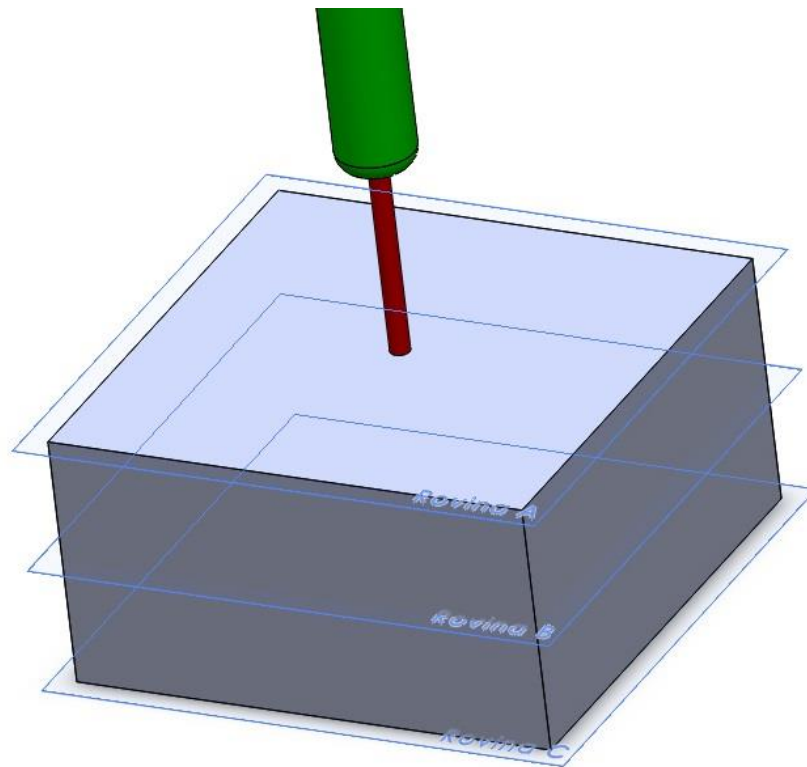
Vzorky byly řezány o různých tloušťkách na laseru Sincrono CP 4000. Pro výrobu vzorků byly použity optimalizované řezné podmínky, které jsou nejvíc vhodné pro dané tloušťky a druhy materiálů. Řezné rychlosti a použitý výkon jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 22 – Řezné podmínky

Druh vzorků	Řezná rychlost [m/min]	Řezný výkon [W]
Ocel 20 mm	0,5	3000
Ocel 10 mm	2	
Dural 10 mm	0,5	
Dural 5 mm	2	

8.7 Vyhodnocení výsledků

U každého vzorku byla drsnost měřena ve třech rovinách, na okraji řezu, kde paprsek vstupoval do materiálu, ve středu tloušťky materiálu a na místě výstupu paprsku z materiálu. V každé rovině byla drsnost měřena 10x na přístroji Mitutoyo – Surftest SJ 301, který je přístupný v dílenských prostorách.



Obr. 73 – Roviny měření drsnosti povrchu

Při zpracování výsledků byly použity vzorce:

$$\text{Aritmetický průměr: } \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

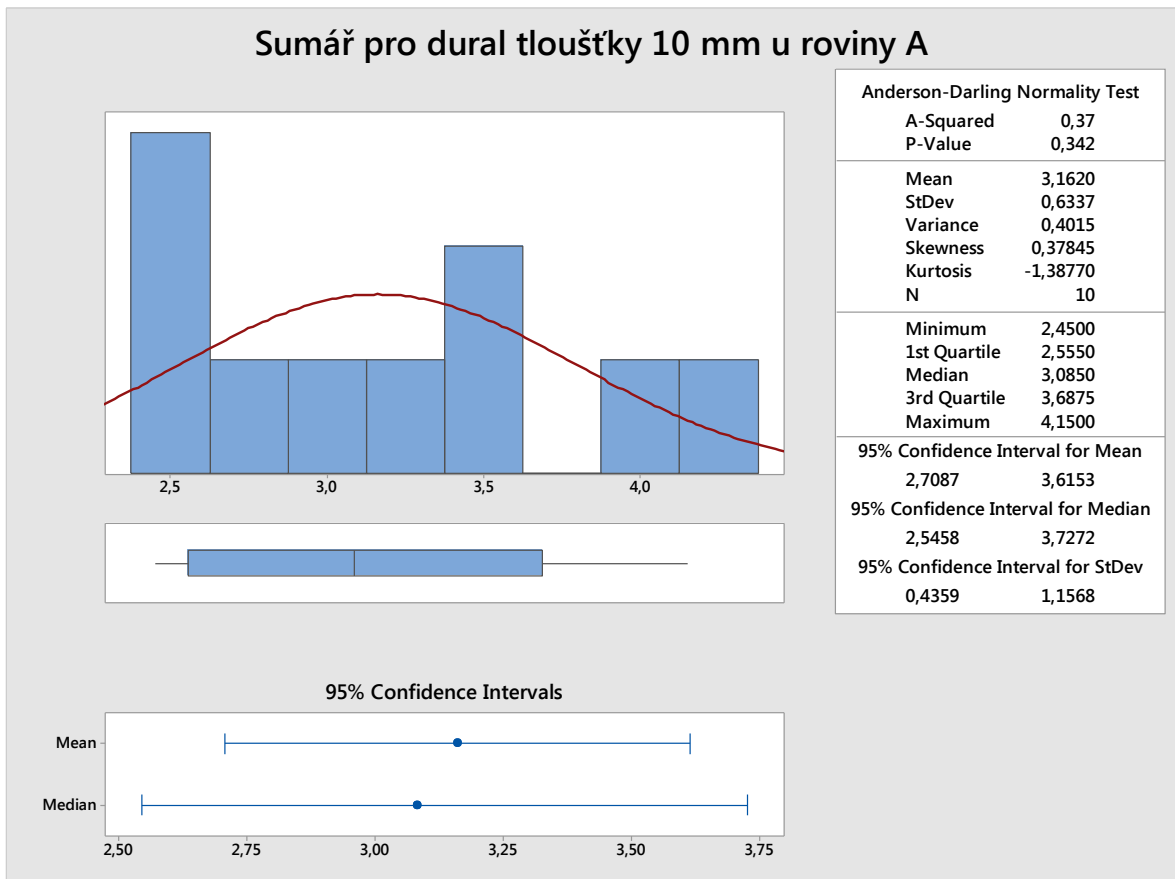
$$\text{Směrodatná odchylka: } S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

$$\text{Variační rozpětí: } V_x = \frac{s}{\bar{x}}$$

8.7.1 Dural ocel tloušťky 10 mm

Tab. 23 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 10 mm pro rovinu A

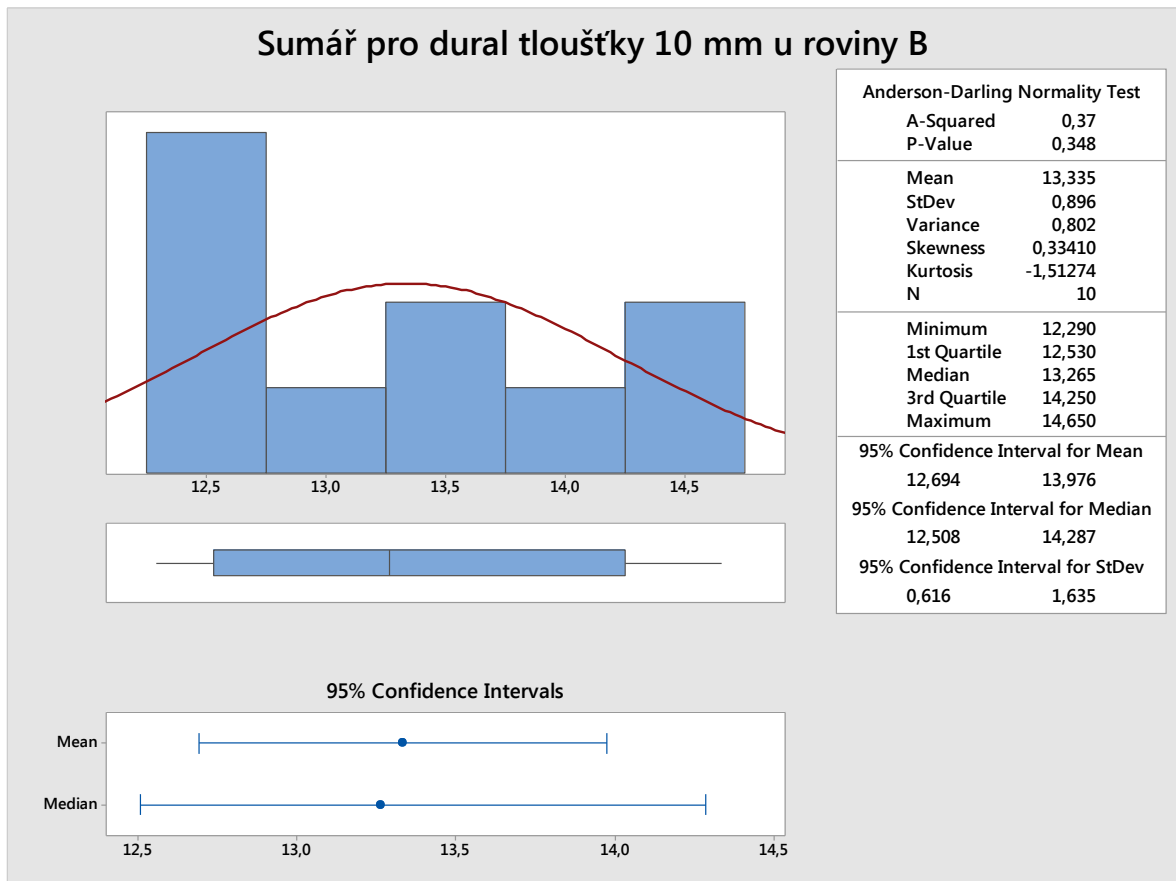
Dural ocel, tloušťka 10 mm, rovina A						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	3,55	3,162	0,39	0,15	0,296	0,094
2	4,15		0,99	0,98		
3	3,02		-0,14	0,02		
4	4,01		0,85	0,72		
5	2,45		-0,71	0,51		
6	2,58		-0,58	0,34		
7	2,48		-0,68	0,47		
8	3,58		0,42	0,17		
9	2,65		-0,51	0,26		
10	3,15		-0,01	0,00		



Obr. 74 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 10 mm pro rovinu A

Tab. 24 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 10 mm pro rovinu B

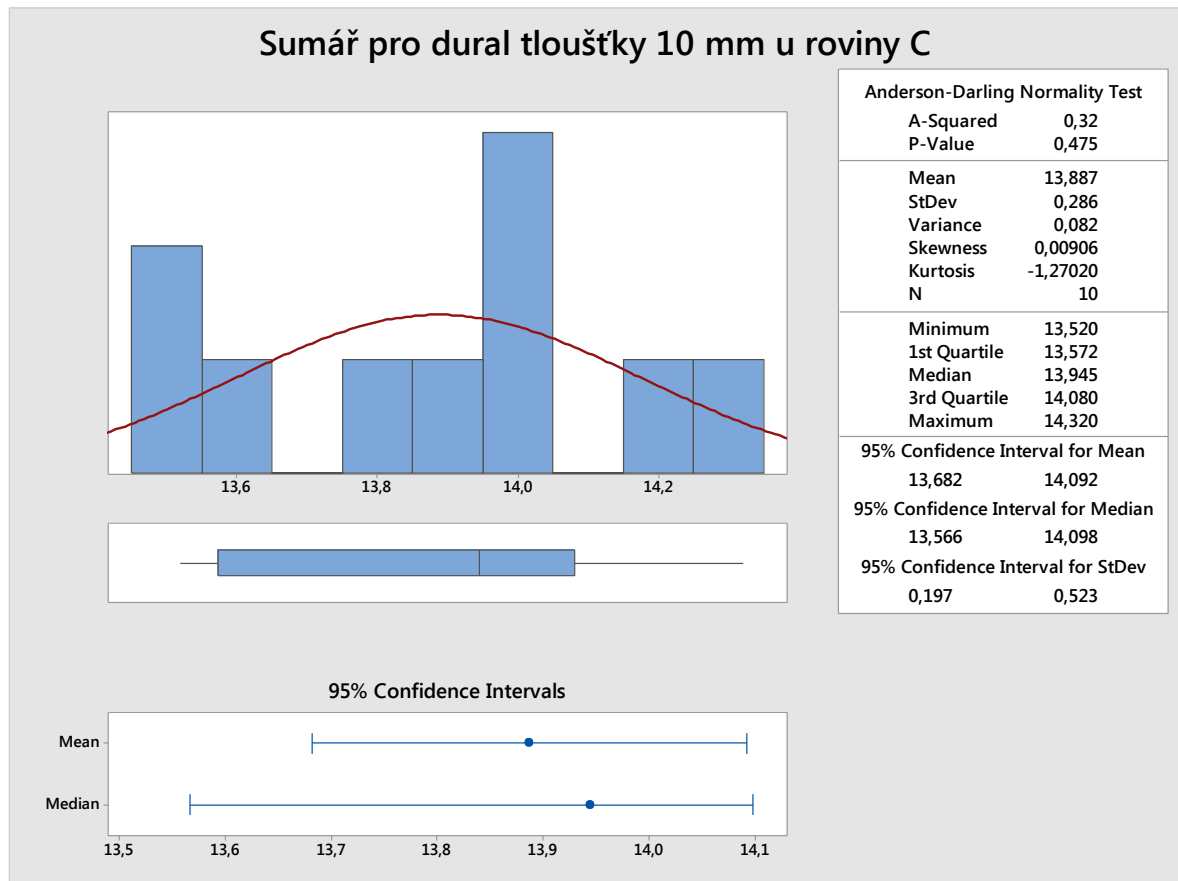
Dural ocel, tloušťka 10 mm, rovina B						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	12,62	13,34	-0,72	0,51	0,559	0,042
2	14,55		1,22	1,48		
3	13,62		0,29	0,08		
4	14,65		1,32	1,73		
5	14,15		0,82	0,66		
6	13,52		0,19	0,03		
7	12,29		-1,05	1,09		
8	12,35		-0,98	0,97		
9	13,01		-0,32	0,11		
10	12,59		-0,74	0,56		



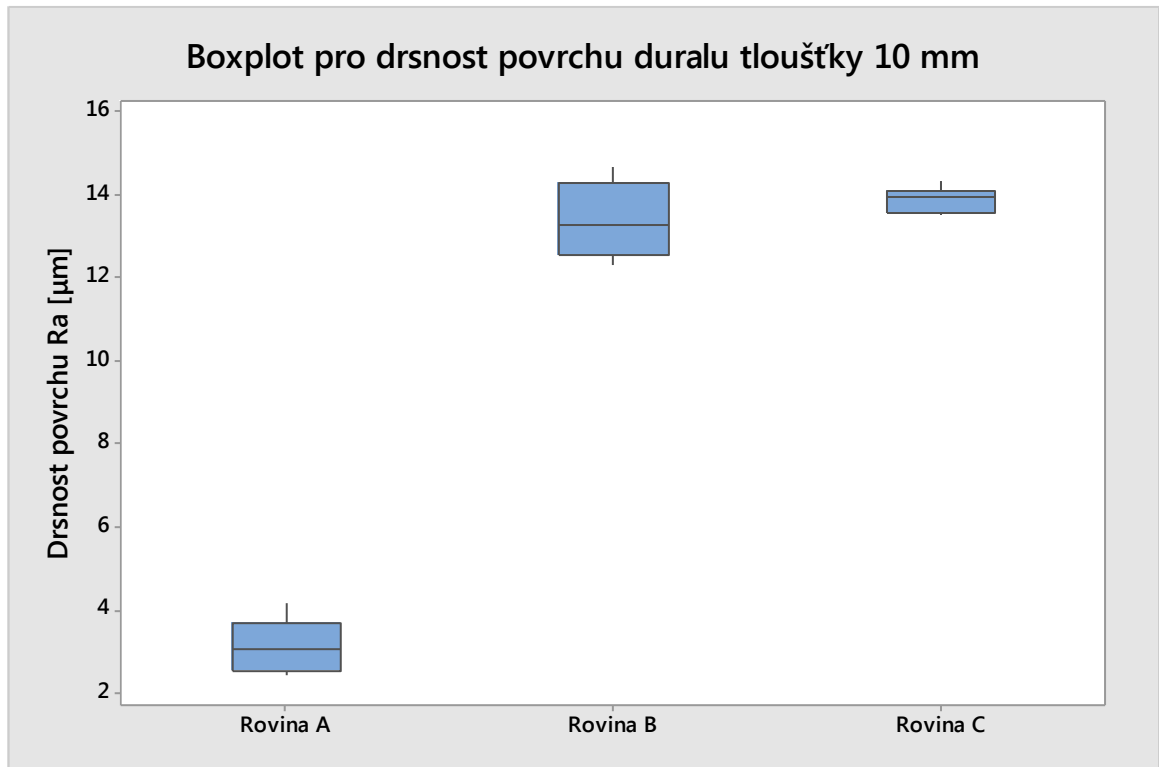
Obr. 75 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 10 mm pro rovinu B

Tab. 25 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 10 mm pro rovinu C

Dural ocel, tloušťka 10 mm, rovina C						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	13,75	13,89	-0,14	0,02	0,063	0,005
2	13,52		-0,37	0,13		
3	14,03		0,14	0,02		
4	14,32		0,43	0,19		
5	13,52		-0,37	0,13		
6	14,02		0,13	0,02		
7	13,87		-0,02	0,00		
8	14,23		0,34	0,12		
9	14,02		0,13	0,02		
10	13,59		-0,30	0,09		



Obr. 76 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 10 mm pro rovinu C

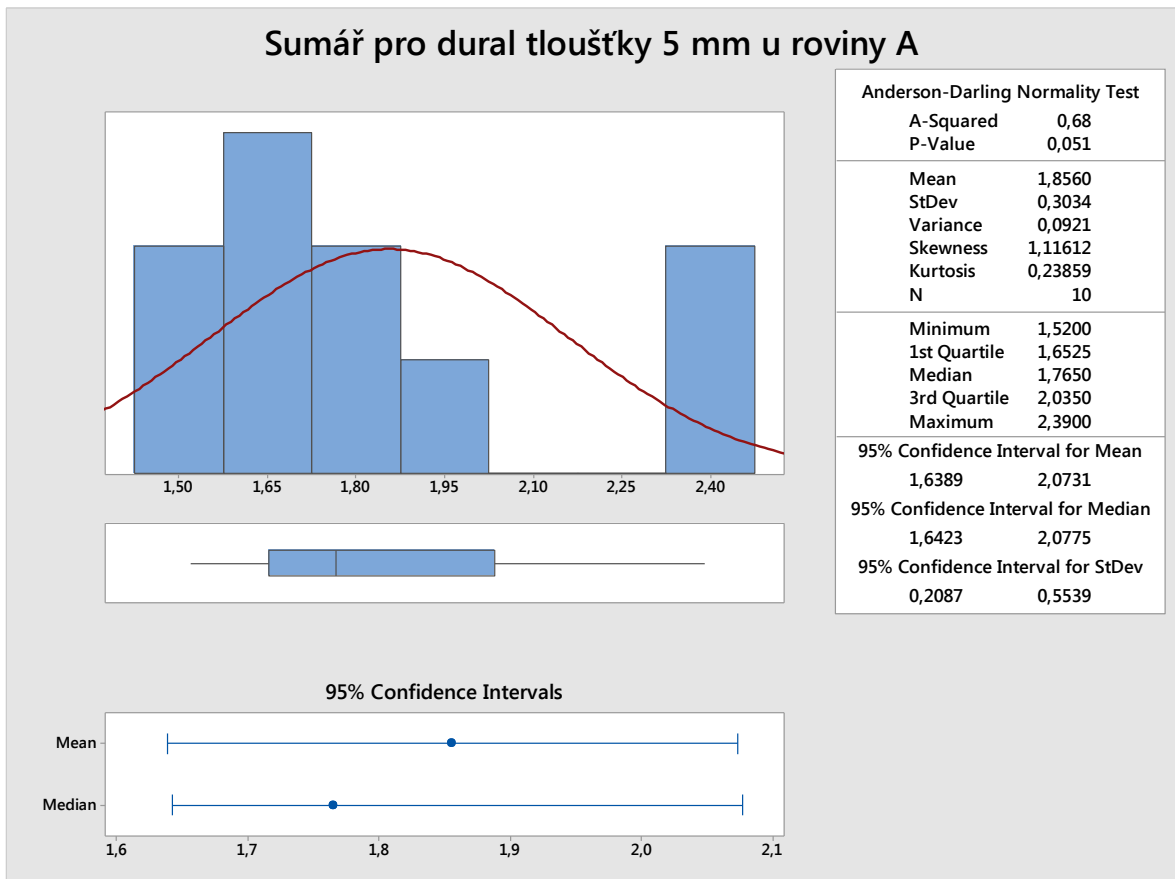


Obr. 77 – Boxplot pro drsnost povrchu duralu tloušťky 10 mm

8.7.2 Dural ocel tloušťky 5 mm

Tab. 26 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 5 mm pro rovinu A

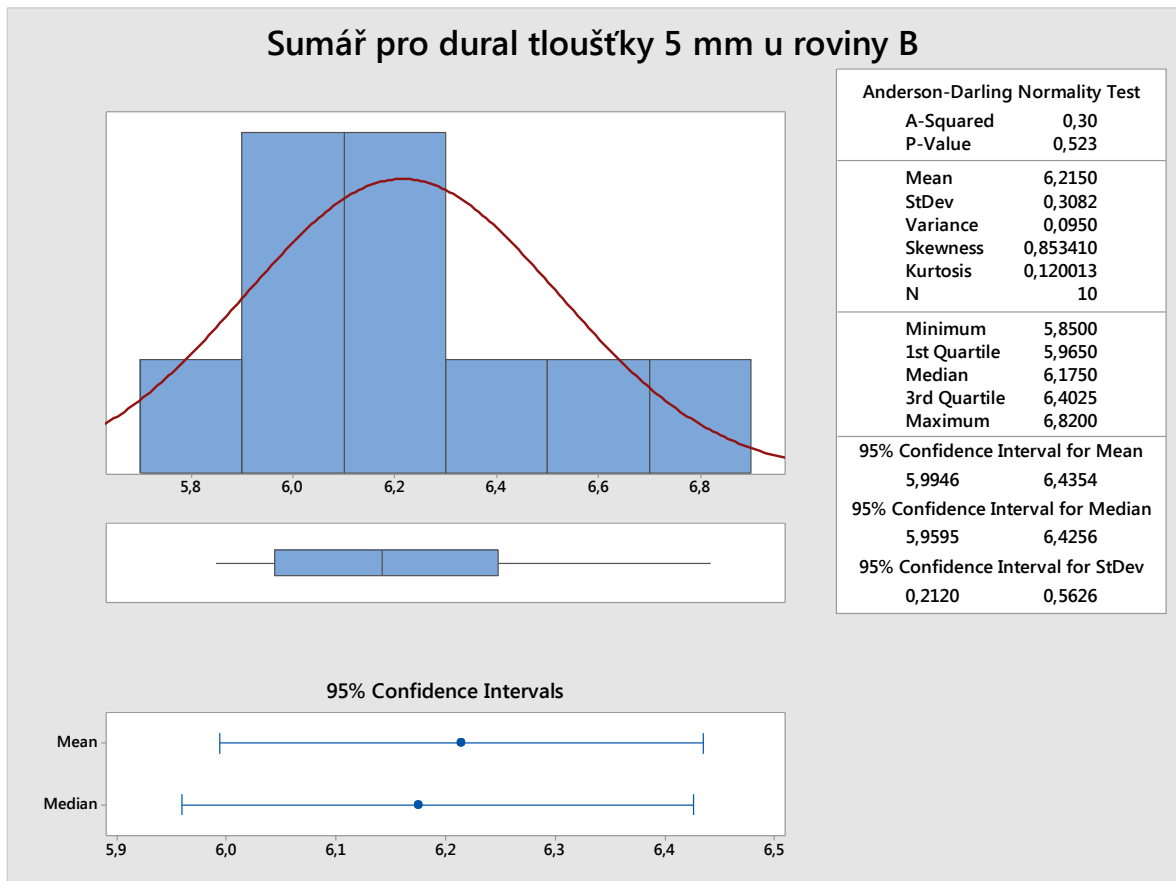
Dural ocel, tloušťka 5 mm, rovina A						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	Vx [%]
1	1,57	1,86	-0,29	0,08	0,104	0,056
2	2,38		0,52	0,27		
3	1,68		-0,18	0,03		
4	1,72		-0,14	0,02		
5	1,81		-0,05	0,00		
6	1,52		-0,34	0,11		
7	2,39		0,53	0,29		
8	1,85		-0,01	0,00		
9	1,72		-0,14	0,02		
10	1,92		0,06	0,00		



Obr. 78 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 5 mm pro rovinu A

Tab. 27 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 5 mm pro rovinu B

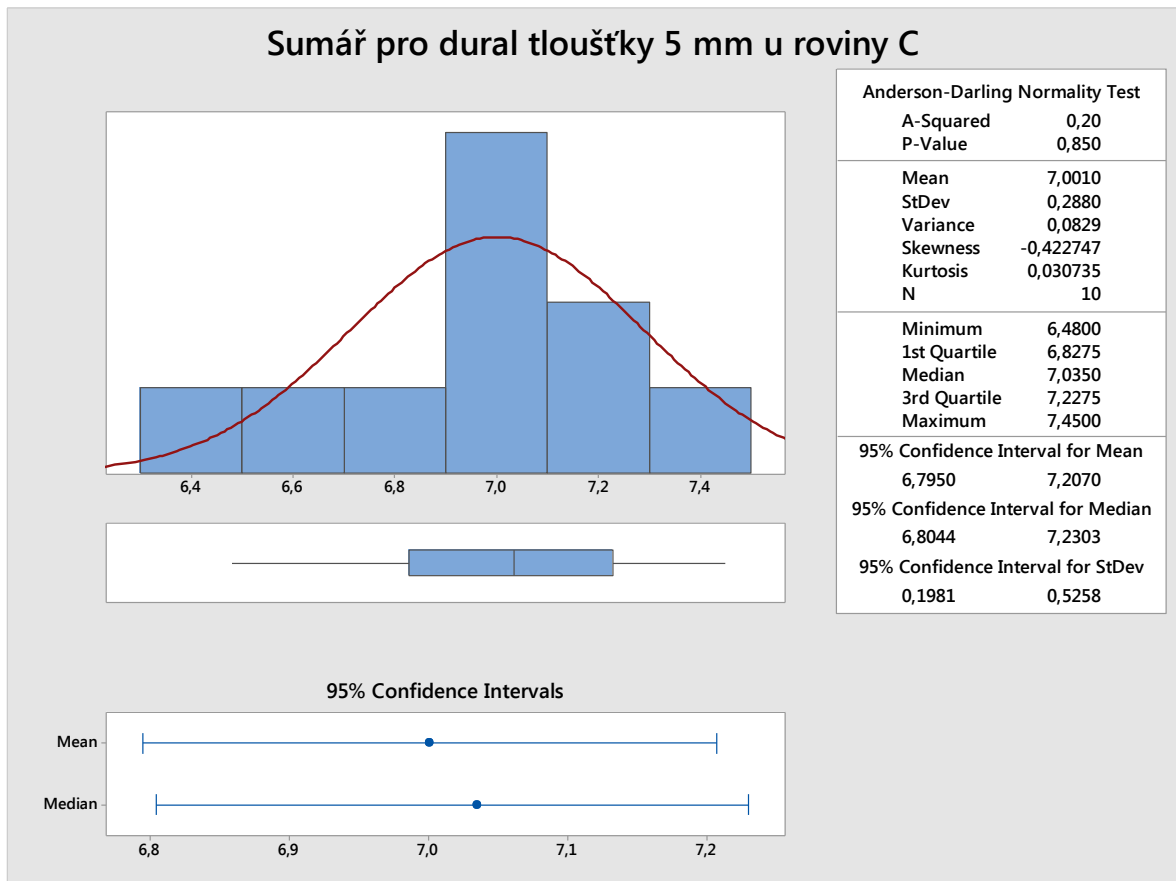
Dural ocel, tloušťka 5 mm, rovina B						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	6,23	6,22	0,02	0,01	0,105	0,017
2	5,92		-0,30	0,09		
3	6,12		-0,09	0,01		
4	6,82		0,61	0,37		
5	6,59		0,38	0,14		
6	6,01		-0,21	0,04		
7	6,34		0,13	0,02		
8	5,85		-0,37	0,13		
9	5,98		-0,23	0,06		
10	6,29		0,08	0,01		



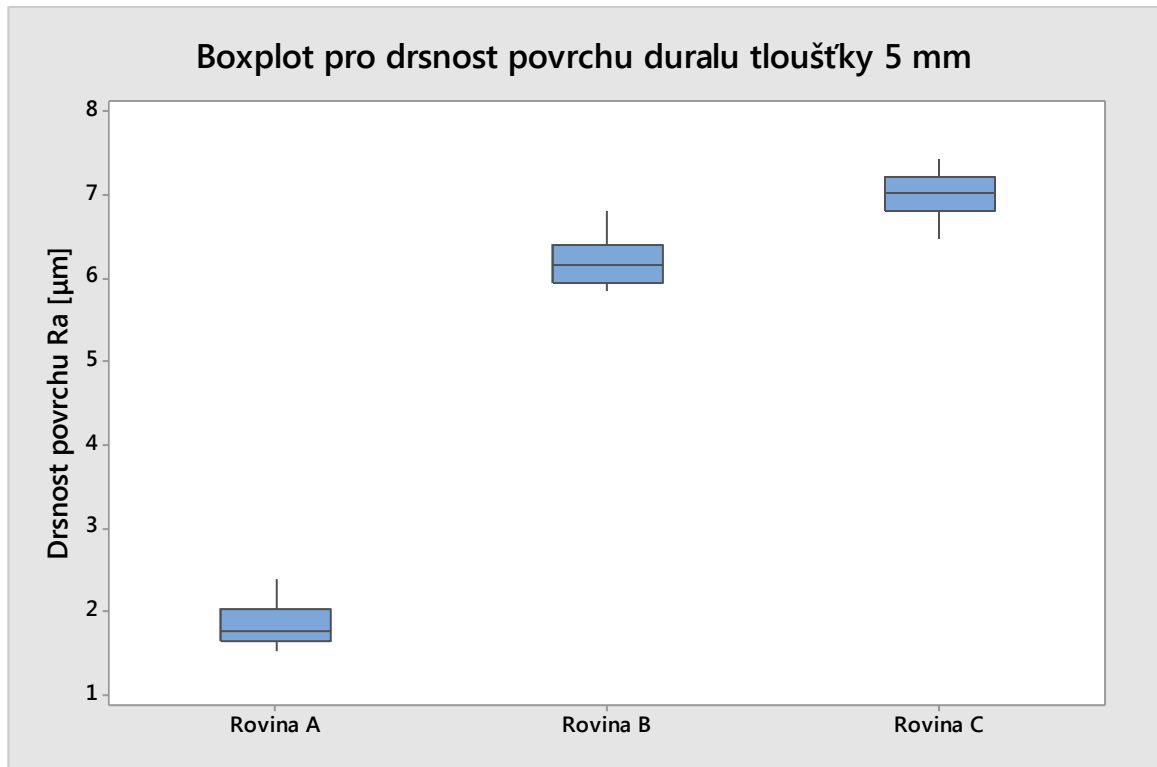
Obr. 79 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 5 mm pro rovinu B

Tab. 28 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 5 mm pro rovinu C

Dural ocel, tloušťka 5 mm, rovina C						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	7,09	7,01	0,09	0,01	0,091	0,013
2	6,64		-0,36	0,13		
3	6,89		-0,11	0,01		
4	6,48		-0,52	0,27		
5	7,25		0,25	0,06		
6	6,92		-0,08	0,01		
7	7,45		0,45	0,20		
8	6,99		-0,01	0,00		
9	7,22		0,22	0,05		
10	7,08		0,08	0,01		



Obr. 80 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 5 mm pro rovinu C

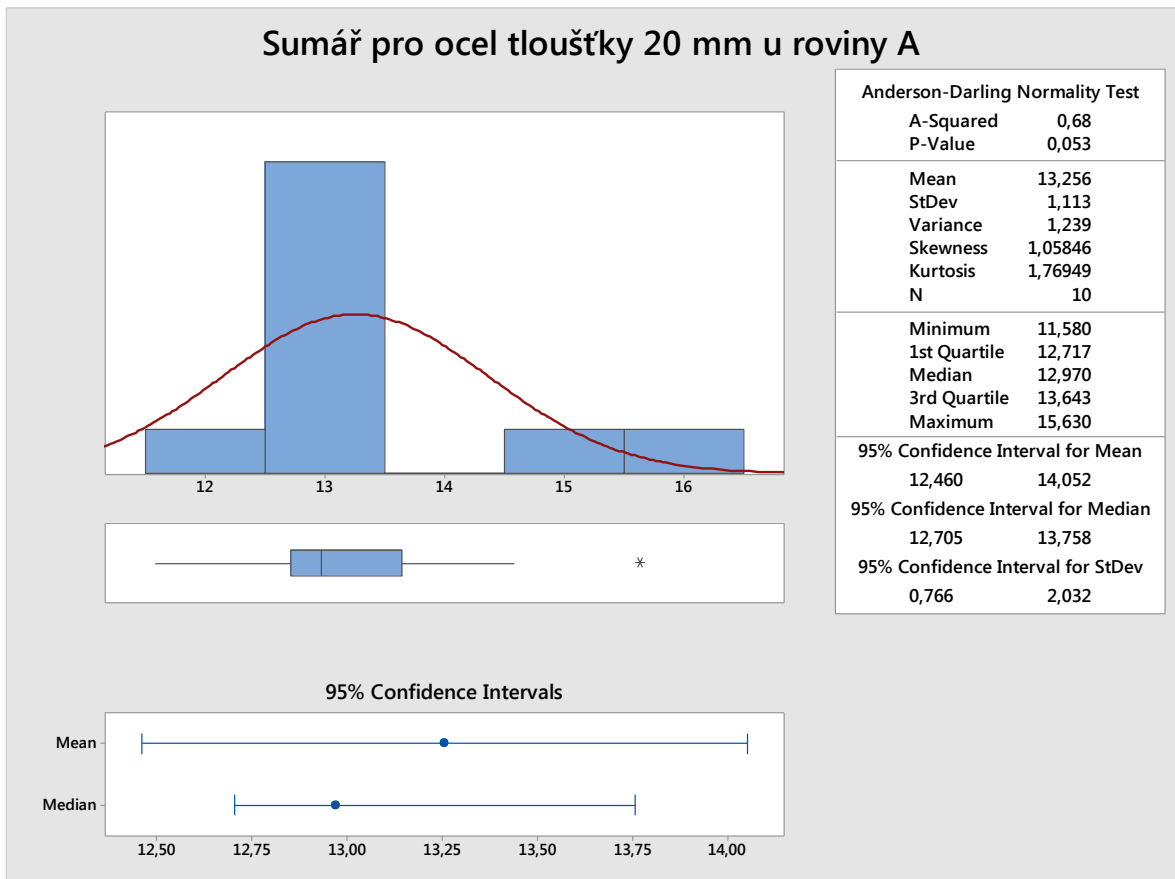


Obr. 81 – Boxplot pro drsnost povrchu duralu tloušťky 5 mm

8.7.3 Ocel tloušťky 20 mm

Tab. 29 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 20 mm pro rovinu A

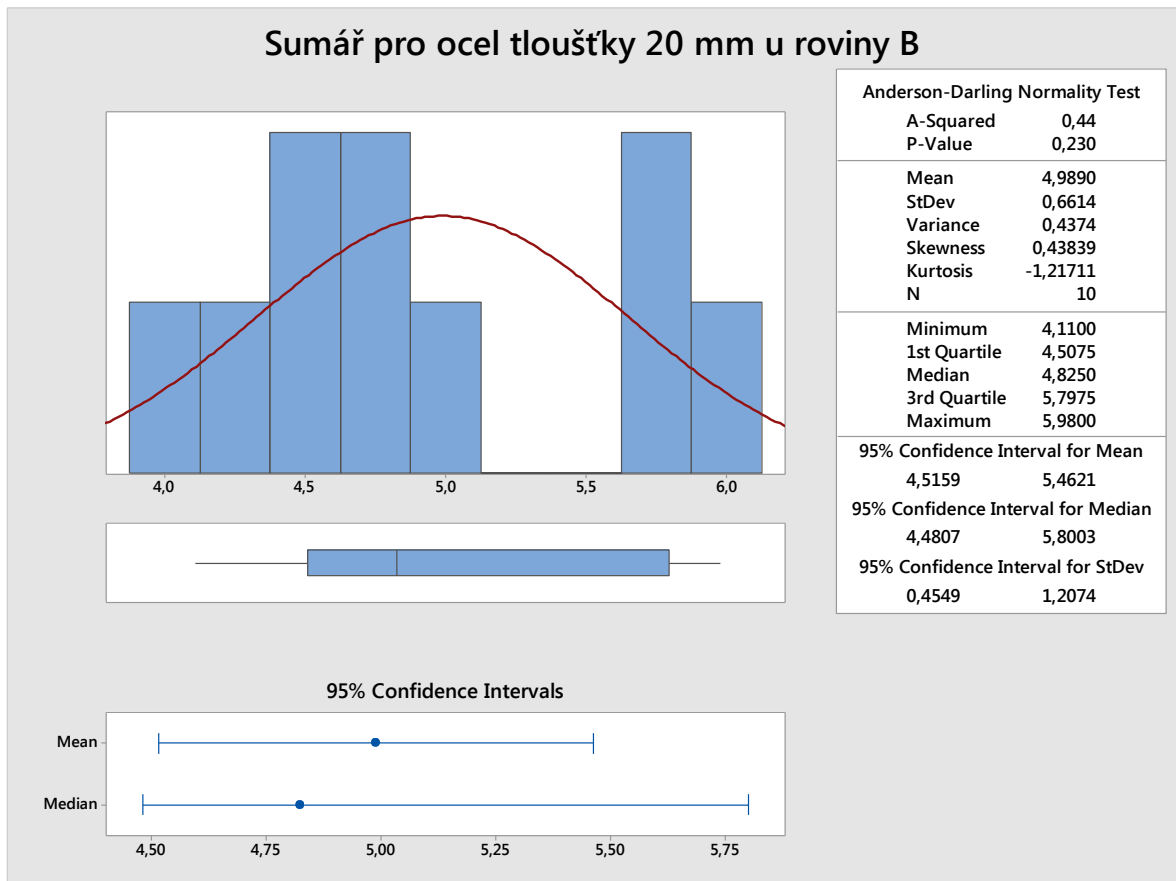
Ocel, tloušťka 20 mm, rovina A						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	Vx [%]
1	13,22	13,26	-0,04	0,01	1,748	0,132
2	14,58		1,32	1,75		
3	12,62		-0,64	0,40		
4	13,33		0,07	0,01		
5	12,92		-0,34	0,11		
6	12,91		-0,35	0,12		
7	15,63		2,37	5,64		
8	11,58		-1,68	2,81		
9	13,02		-0,24	0,06		
10	12,75		-0,51	0,26		



Obr. 82 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 20 mm pro rovinu A

Tab. 30 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 20 mm pro rovinu B

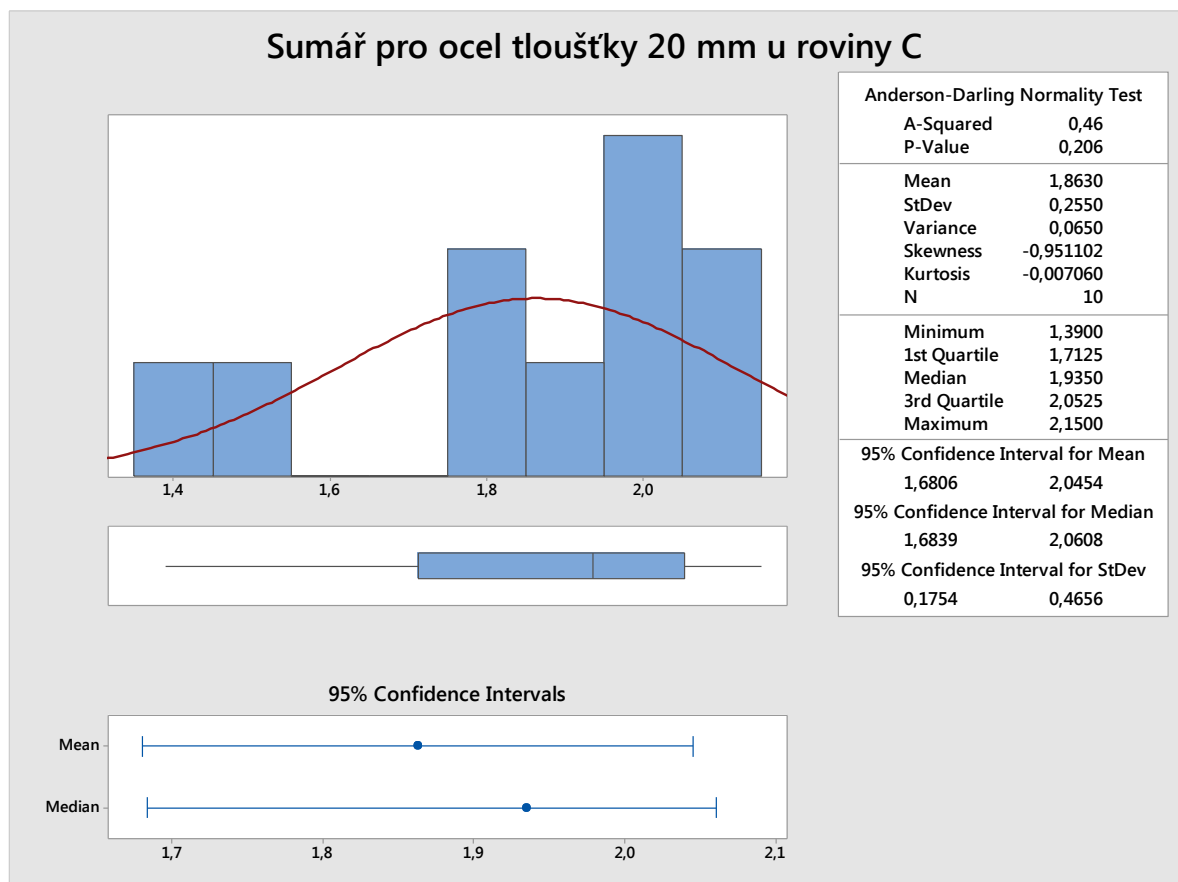
Ocel, tloušťka 20 mm, rovina B						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	4,83	4,99	-0,16	0,03	0,345	0,069
2	5,05		0,06	0,01		
3	4,58		-0,41	0,17		
4	5,82		0,83	0,69		
5	4,29		-0,70	0,49		
6	4,62		-0,37	0,14		
7	4,11		-0,88	0,77		
8	5,98		0,99	0,98		
9	5,79		0,80	0,64		
10	4,82		-0,17	0,03		



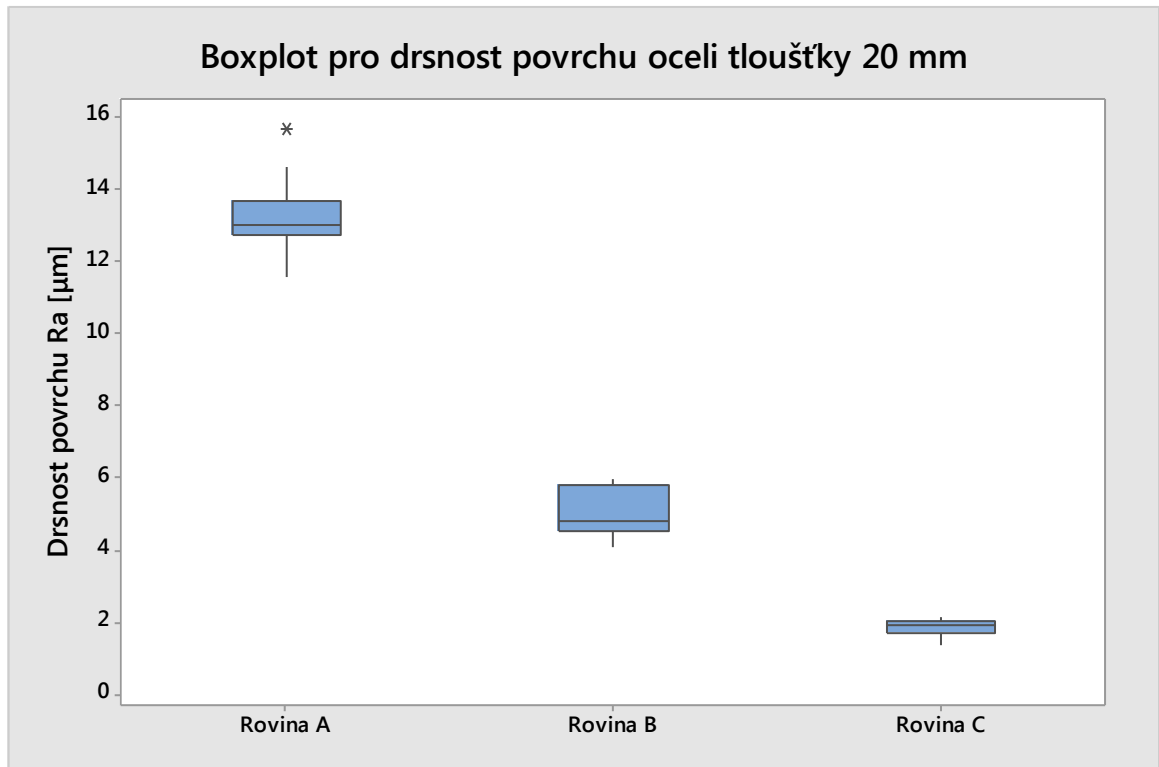
Obr. 83 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 20 mm pro rovinu B

Tab. 31 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 20 mm pro rovinu C

Ocel, tloušťka 20 mm, rovina C						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	1,99	1,86	0,13	0,02	0,071	0,038
2	2,03		0,17	0,03		
3	2,12		0,26	0,07		
4	1,79		-0,07	0,01		
5	1,48		-0,38	0,15		
6	1,39		-0,47	0,22		
7	1,98		0,12	0,01		
8	1,81		-0,05	0,01		
9	1,89		0,03	0,01		
10	2,15		0,29	0,08		



Obr. 84 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 20 mm pro rovinu C

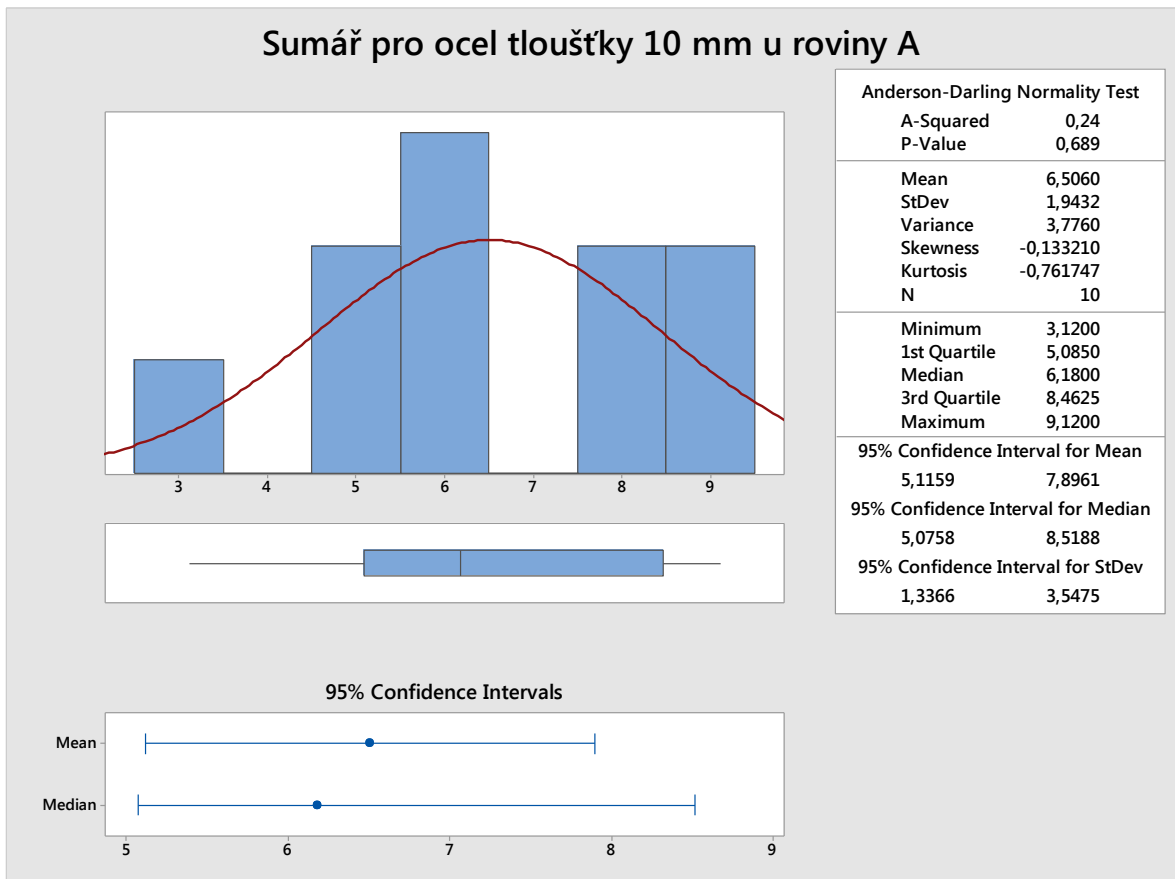


Obr. 85 – Boxplot pro drsnost povrchu oceli tloušťky 20 mm

8.7.4 Ocel tloušťky 10 mm

Tab. 32 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 10 mm pro rovinu A

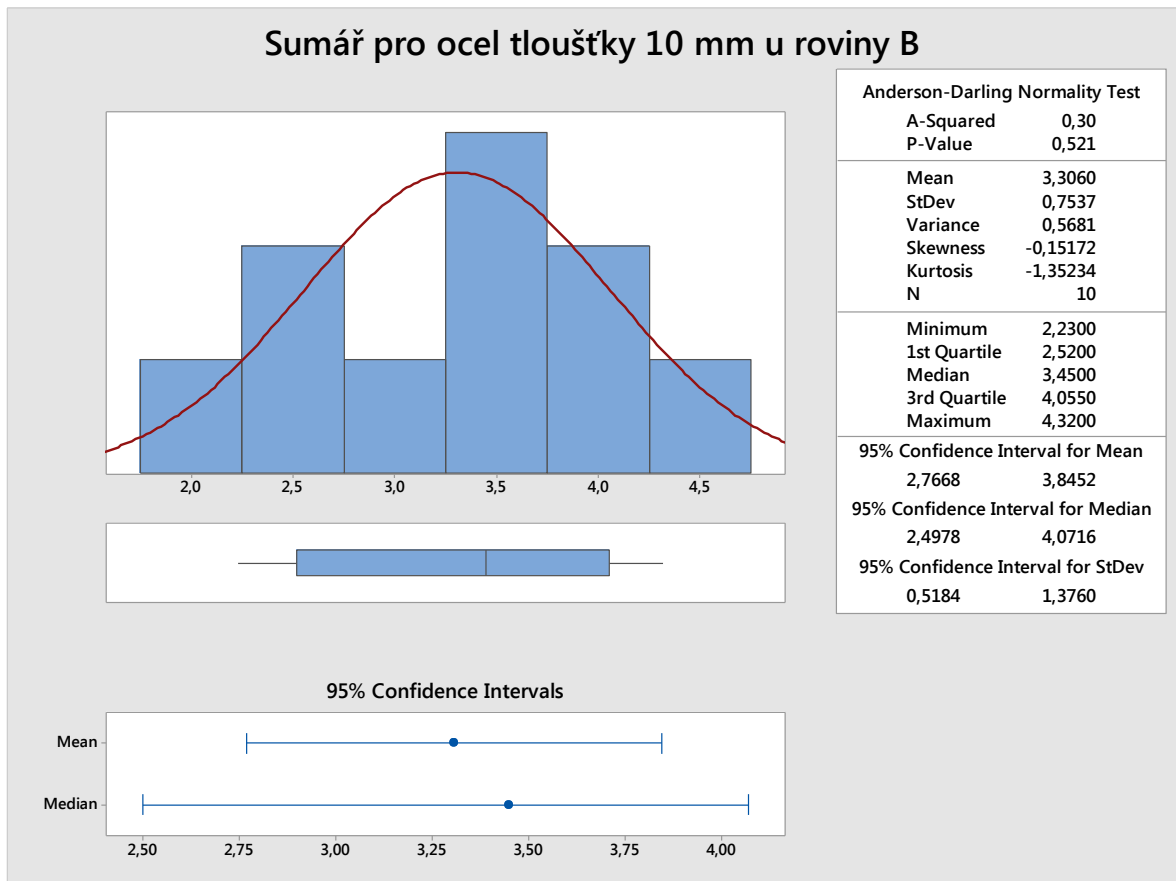
Ocel, tloušťka 10 mm, rovina A						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	5,55	6,51	-0,96	0,91	3,438	0,528
2	9,12		2,61	6,83		
3	8,92		2,41	5,83		
4	8,31		1,80	3,25		
5	5,01		-1,50	2,24		
6	5,88		-0,63	0,39		
7	5,11		-1,40	1,95		
8	3,12		-3,39	11,46		
9	7,56		1,05	1,11		
10	6,48		-0,03	0,01		



Obr. 86 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 20 mm pro rovinu A

Tab. 33 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 10 mm pro rovinu B

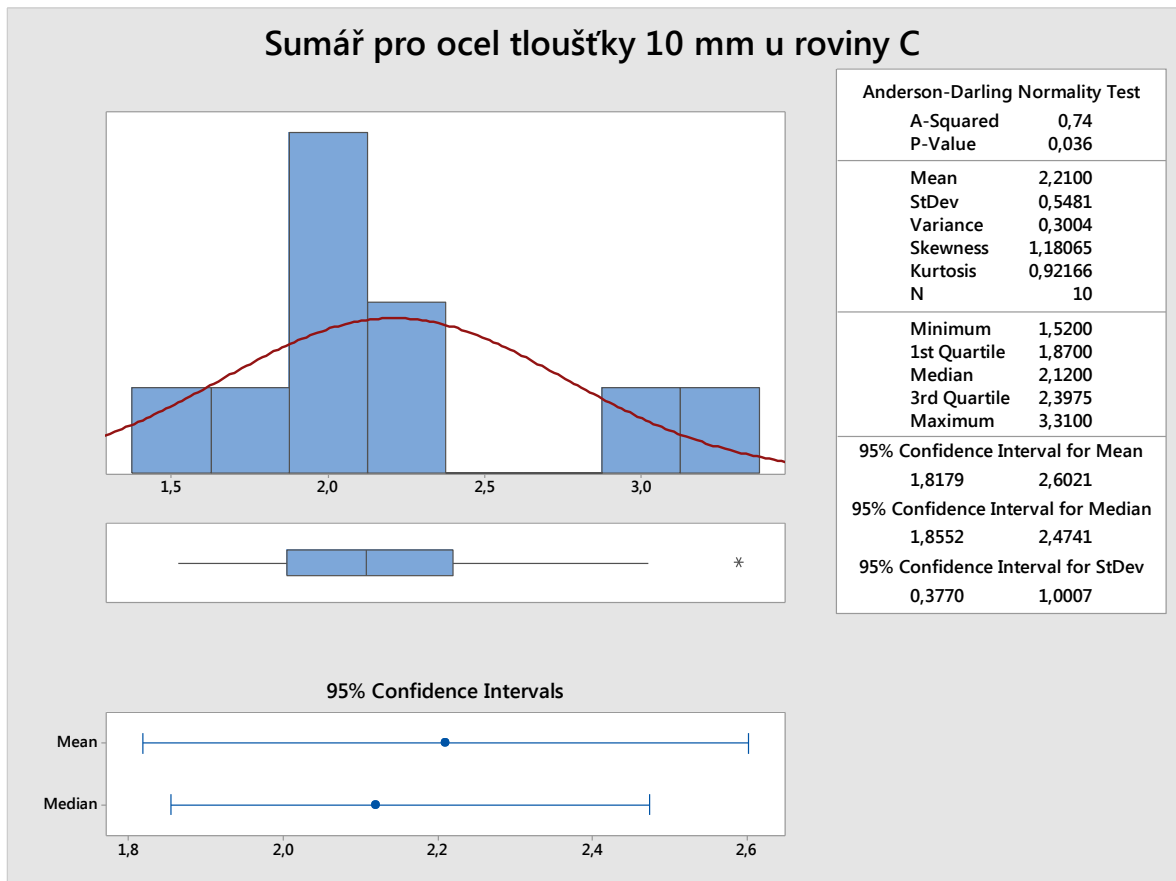
Ocel, tloušťka 10 mm, rovina B						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	2,58	3,31	-0,73	0,53	0,425	0,128
2	3,45		0,14	0,02		
3	2,23		-1,08	1,16		
4	3,51		0,20	0,04		
5	2,34		-0,97	0,93		
6	4,19		0,88	0,78		
7	4,32		1,01	1,03		
8	2,98		-0,33	0,11		
9	3,45		0,14	0,02		
10	4,01		0,70	0,50		



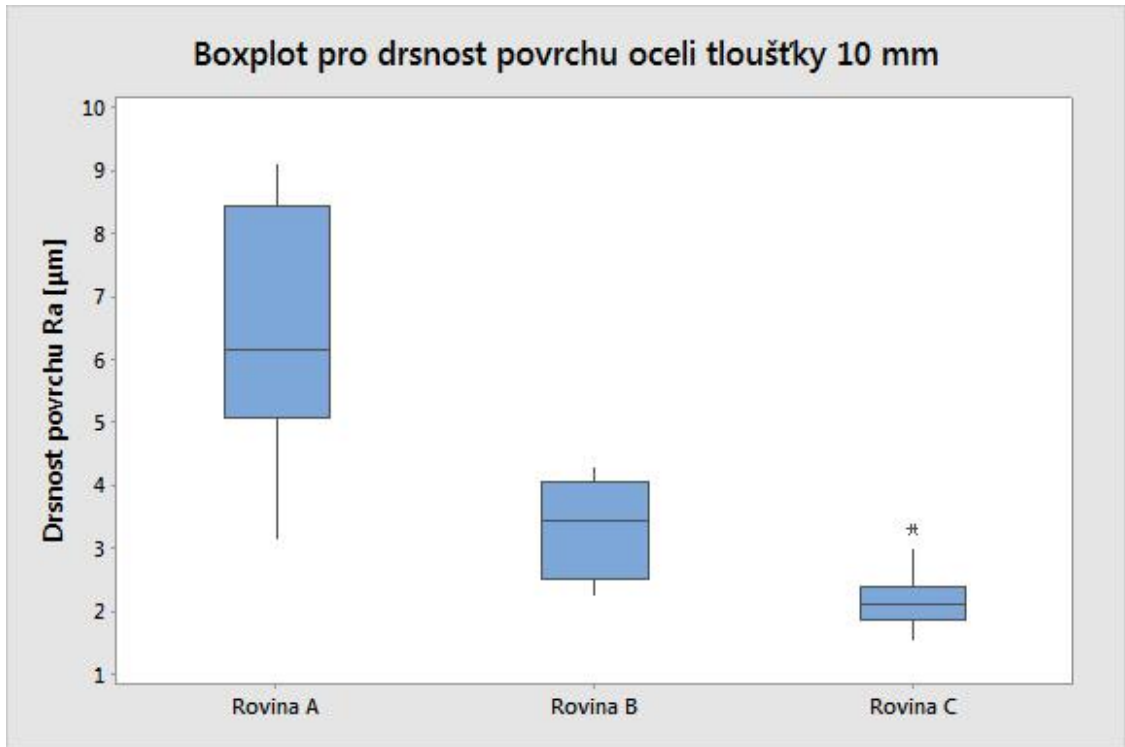
Obr. 87 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 10 mm pro rovinu B

Tab. 34 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 10 mm pro rovinu C

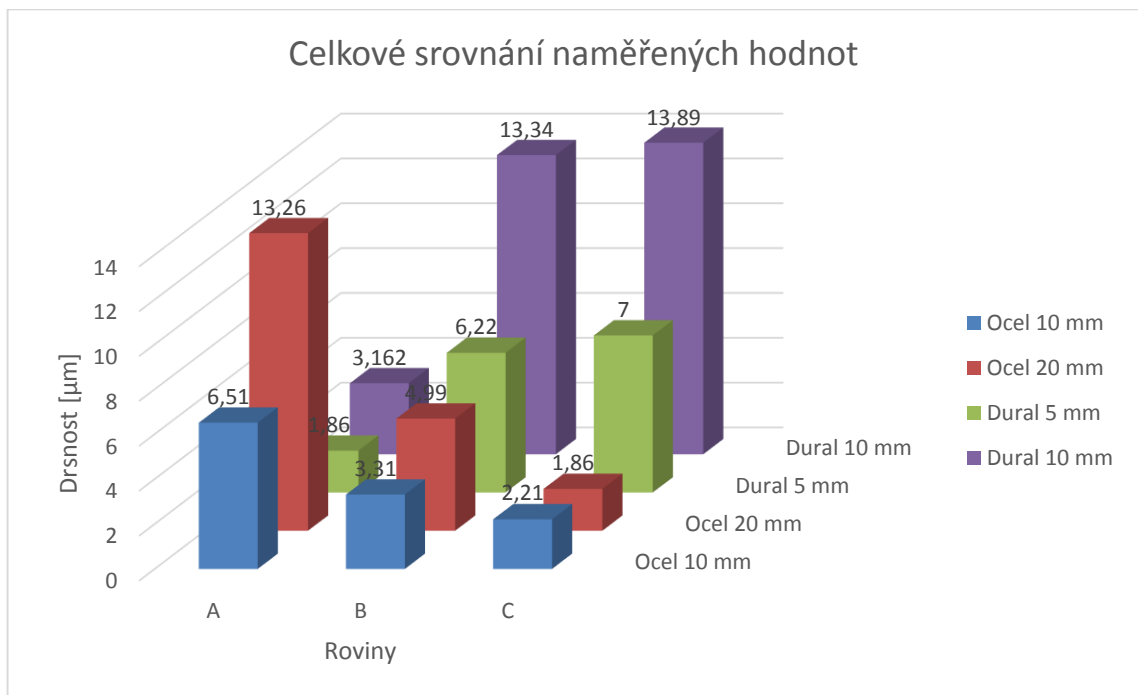
Ocel, tloušťka 10 mm, rovina C						
Počet měření	Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	1,52	2,21	-0,69	0,48	0,380	0,172
2	1,75		-0,46	0,21		
3	1,91		-0,30	0,09		
4	2,12		-0,09	0,01		
5	2,01		-0,20	0,04		
6	3,31		1,10	1,21		
7	3,02		0,81	0,66		
8	2,15		-0,06	0,01		
9	2,19		-0,02	0,01		
10	2,12		-0,09	0,02		



Obr. 88 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 10 mm pro rovinu C



Obr. 89 – Boxplot pro drsnost povrchu oceli tloušťky 10 mm



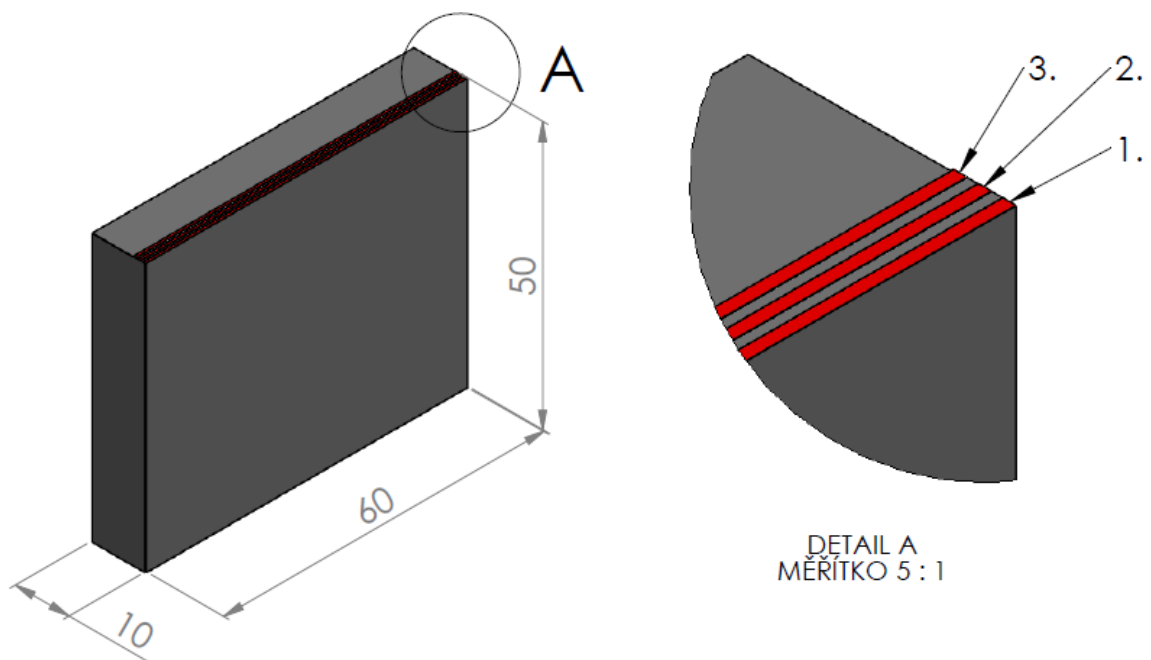
Obr. 90 – Celkové srovnání naměřených hodnot

Z diagramu (Obr. 90) je patrný rozdíl mezi hodnotami drsnosti v rovině A (tj. na vstupu svazku do materiálu) a v rovině C (tj. na výstupu) a to pro oba materiály. Zatímco u oceli obou tloušťek má pomyslná křivka drsnosti klesající charakter, u duralu je tento trend opačný, nejnižší hodnoty drsnosti jsou na vstupu laserového paprsku do materiálu a

maximální na výstupu. Tuto skutečnost lze vysvětlit rozdílným složením obou materiálů a také tím, že neželezné kovy jako např. titan, hliník a nikl jsou laserem obtížněji obrobitelné a proces řezání je méně efektivní než při dělení oceli.

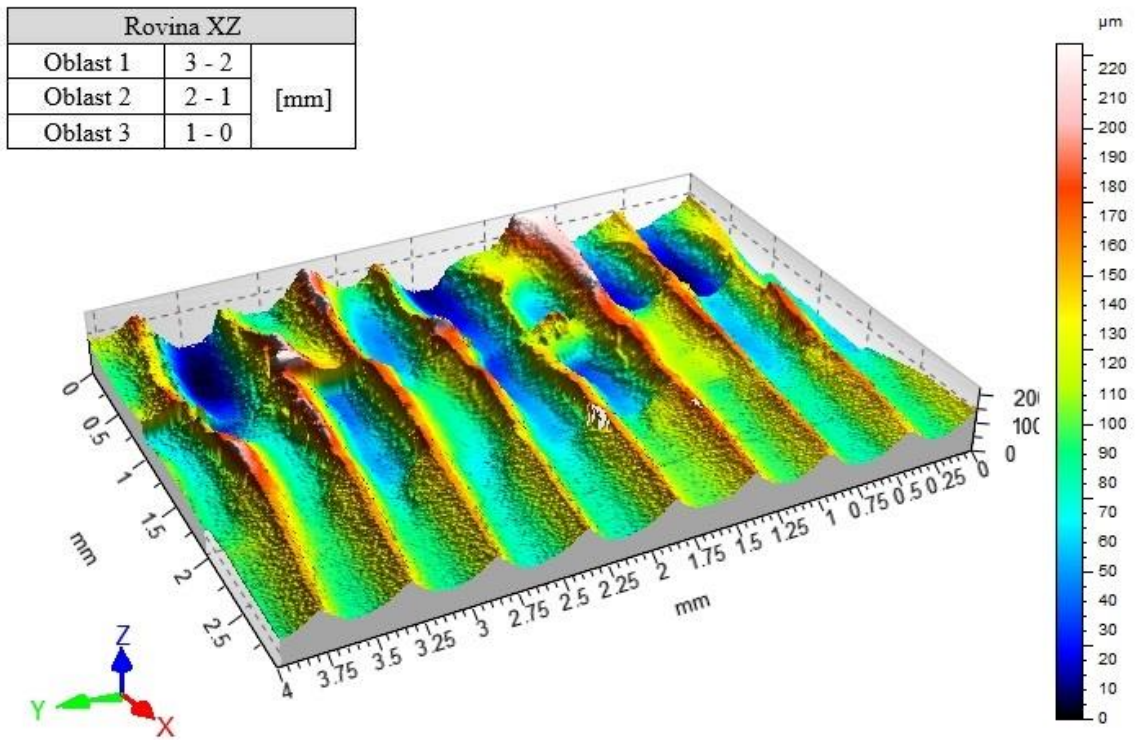
8.8 Porovnání drsnosti ve 3D

Porovnání se provádělo na speciálním přístroji Talysurf CLI 500 společnosti Taylor Hobson. Součástí experimentu byl také software TalyMap Gold, který s daným drsnoměrem komunikuje a pracuje. Program zpracovává prostorovou charakteristiku povrchu z dat získaných bezdotykovým systémem profilometru a dále zajistí jejich podrobnou analýzu. Principem zkoušky bylo získat skenovaný povrch v oblasti u vstupní části na čelních plochách vzorků (ocel tloušťky 20 i 10 mm a dural tloušťky 10 mm). Měřená plocha je na následujícím obrázku vyznačena červenou barvou a jednotlivé oblasti jsou očíslovány podle pořadí. Do porovnání drsností nebyl obsažen dural tloušťky 5 mm, protože oblasti měření se nacházely příliš blízko u sebe.

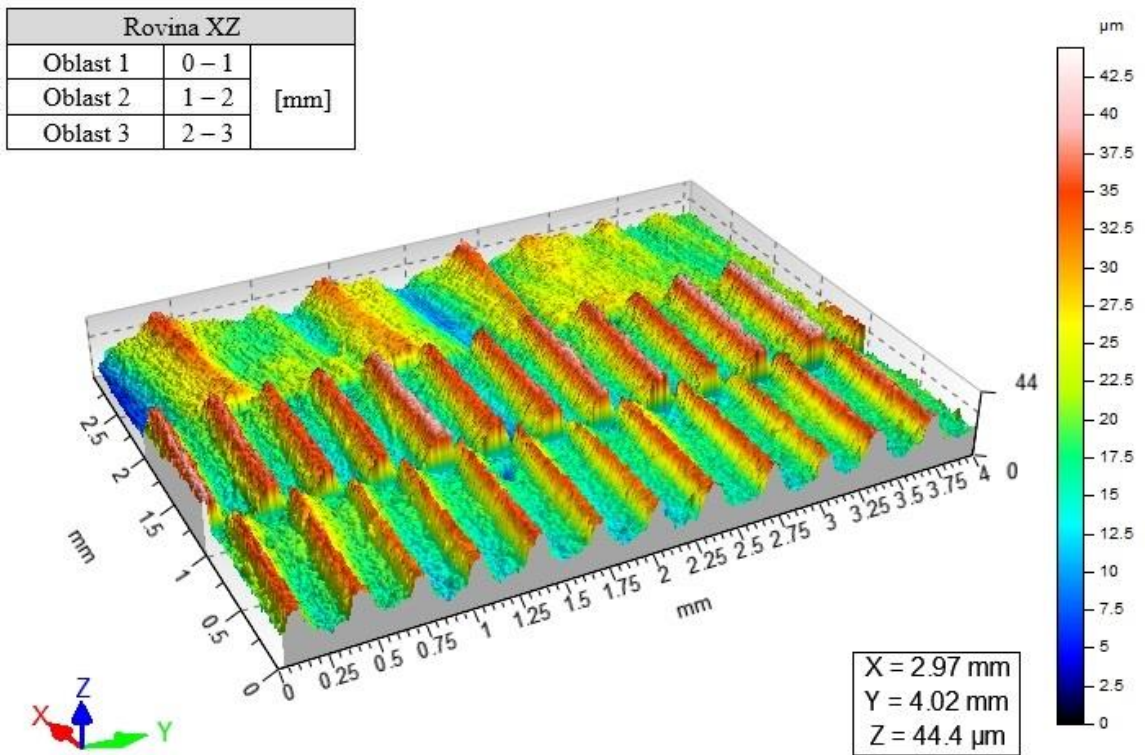


Obr. 91 – Oblast měření drsnosti duralu tloušťky 10 mm

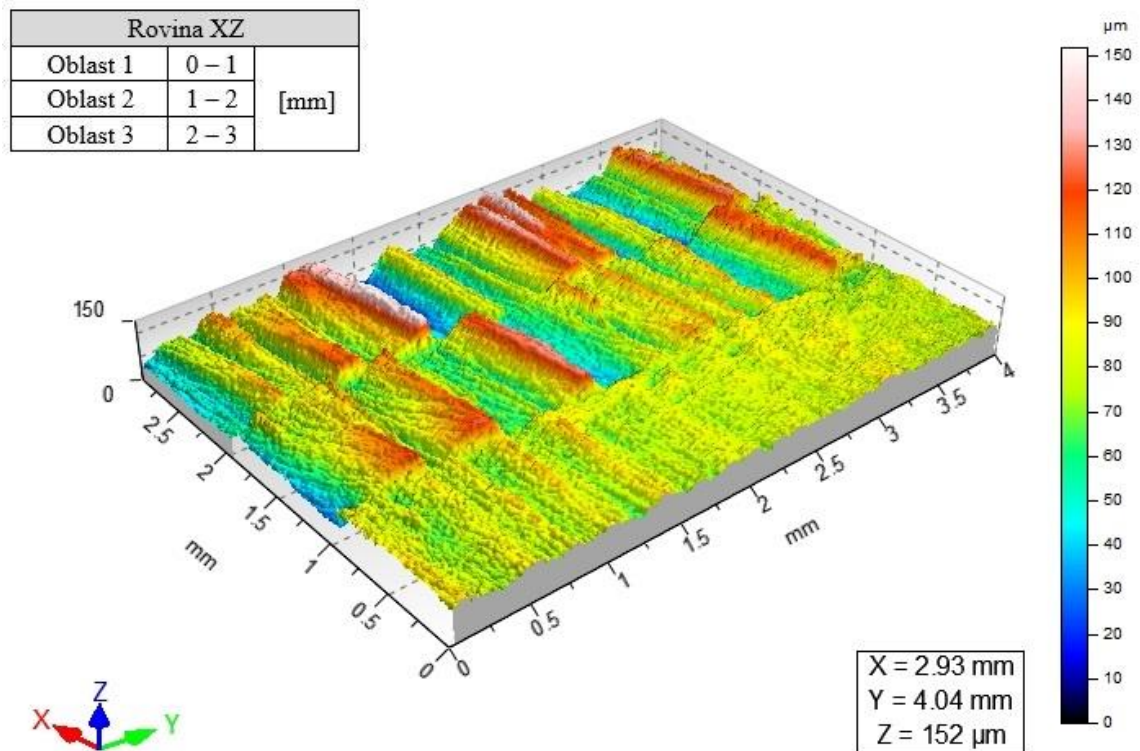
(1. – Oblast 1; 2. – Oblast 2; 3. – Oblast 3)



Obr. 92 – Porovnání oblastí u ocele tloušťky 20 mm



Obr. 93 – Porovnání oblastí u ocele tloušťky 10 mm



Obr. 94 – Porovnání oblastí u duralu tloušťky 10 mm

Ze zobrazených prostorových obrázků je zřetelné, jak měřený profil daných oblastí vypadá. Obsahují nejen souřadnicový systém, ale i barevné rozlišení hloubky drsnosti povrchu s příslušnou stupnicí v μm . Zkoumané oblasti (Obr. 91) byly po skončení měření normovány a následně spojeny v jeden 3D model (Obr. 92, 93 a 94). Z obrázků vyplývá, že dochází k postupnému rozpadu laserového paprsku a že největší drsnost se ukázala u ocele tloušťky 20 mm.

8.9 Kuželovitost

S rostoucí vzdáleností od místa vstupu paprsku se do materiálu obrobku jakost povrchu obrobené plochy obecně zhoršuje. Paprsek při styku s řezaným materiálem odštěpuje jednotlivé částice materiálu. Zároveň vzniká tření mezi povrchem paprsku a obrobku. Paprsek začíná postupně ztrácet část své energie a je vychylován z původního směru. Poloměr průřezu odchýleného paprsku se mění v závislosti na jeho délce a řezané tloušťce. Z tohoto důvodu má povrch po řezání laserem specifické vlastnosti, což je stupňující se odchylka kolmosti (kuželovitost) a jako u všech paprskových metod viditelné rýhování. [53]

8.10 Měření kuželovitosti a statistické vyhodnocení získaných dat

Vzorky byly měřeny mikrometrem Mitutoyo ve vstupní (A) a výstupní (C) rovině u duralu a oceli tloušťky 10 mm. Hodnoty byly poté statisticky vyhodnoceny a z nich byla spočítána kuželovitost.

8.10.1 Dural ocel tloušťky 10 mm

Tab. 35 – Hodnoty kuželovitosti pro dural tloušťky 10 mm pro rovinu A

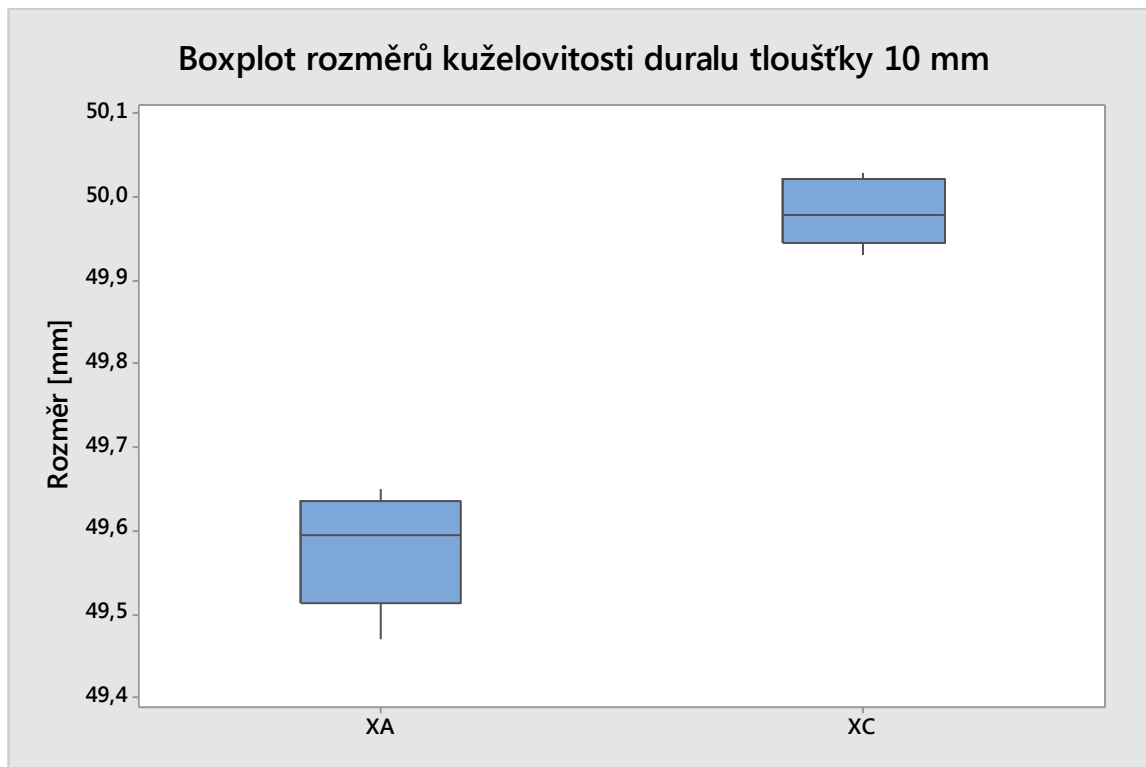
Dural ocel, tloušťka 10 mm, rovina A						
Počet měření	X_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,47	49,58	-0,106	0,011	0,0034	0,0001
2	49,55		-0,026	0,001		
3	49,61		0,034	0,001		
4	49,58		0,004	0,000		
5	49,65		0,074	0,005		
6	49,61		0,034	0,001		
7	49,63		0,054	0,003		
8	49,65		0,074	0,005		
9	49,49		-0,086	0,007		
10	49,52		-0,056	0,003		

Tab. 36 – Hodnoty kuželovitosti pro dural tloušťky 10 mm pro rovinu C

Dural ocel, tloušťka 10 mm, rovina C						
Počet měření	X_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	50,01	49,98	0,026	0,001	0,0011	0,0000
2	50,03		0,046	0,002		
3	49,98		-0,004	0,000		
4	49,95		-0,034	0,001		
5	50,02		0,036	0,001		
6	49,93		-0,054	0,003		
7	49,98		-0,004	0,000		
8	50,03		0,046	0,002		
9	49,93		-0,054	0,003		
10	49,98		-0,004	0,000		

➤ Kuželovitost duralu tloušťky 10 mm:

$$\bar{x}_C - \bar{x}_A = 0,408 \text{ mm}$$



Obr. 95 – Boxplot rozměrů kuželovitosti duralu tloušťky 10 mm

8.10.2 Ocel tloušťky 10 mm

Tab. 37 – Hodnoty kuželovitosti pro ocel tloušťky 10 mm pro rovinu A

Ocel, tloušťka 10 mm, rovina A						
Počet měření	X_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,86	49,85	0,007	0,000	0,0006	0,0000
2	49,85		-0,003	0,000		
3	49,89		0,037	0,001		
4	49,83		-0,023	0,001		
5	49,81		-0,043	0,002		
6	49,87		0,017	0,000		
7	49,87		0,017	0,000		
8	49,84		-0,013	0,000		
9	49,86		0,007	0,000		
10	49,85		-0,003	0,000		

Tab. 38 – Hodnoty kuželovitosti pro ocel tloušťky 10 mm pro rovinu C

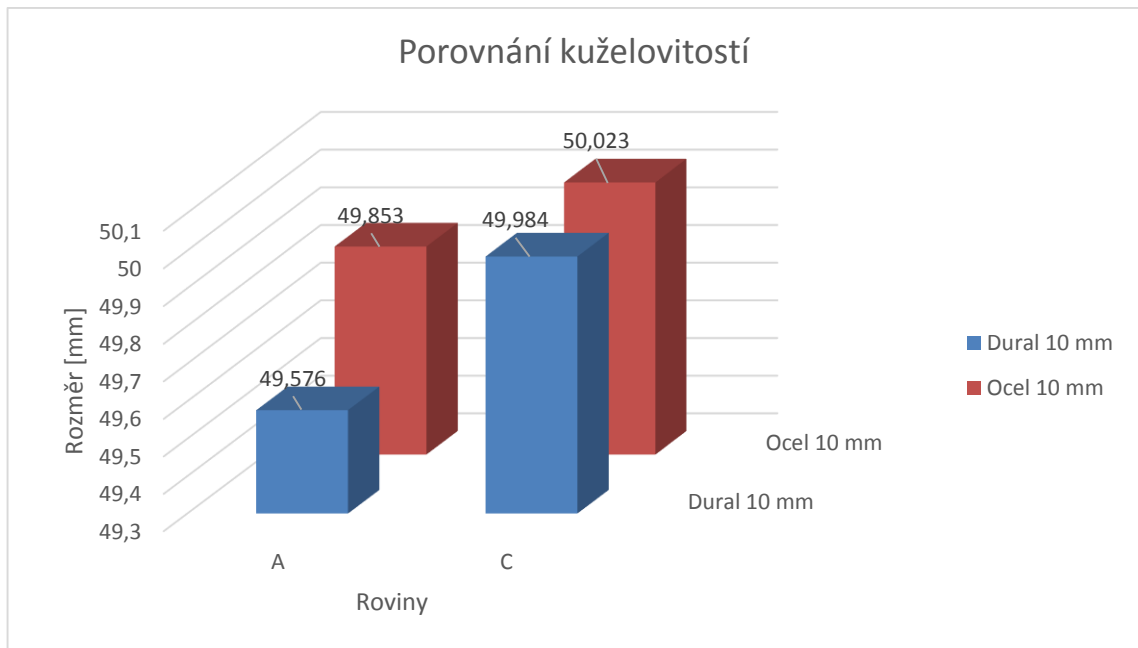
Ocel, tloušťka 10 mm, rovina C						
Počet měření	\bar{X}_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V _x [%]
1	50,01	50,02	-0,013	0,000	0,0005	0,0000
2	50,03		0,007	0,000		
3	50,05		0,027	0,001		
4	50,04		0,017	0,000		
5	50,02		-0,003	0,000		
6	50,03		0,007	0,000		
7	50,01		-0,013	0,000		
8	50,06		0,037	0,001		
9	49,99		-0,033	0,001		
10	49,99		-0,033	0,001		

➤ Kuželovitost ocele tloušťky 10 mm:

$$\bar{x}_C - \bar{x}_A = 0,17 \text{ mm}$$



Obr. 96 – Boxplot rozměrů kuželovitosti ocele tloušťky 10 mm



Obr. 97 – Porovnání kuželovitostí u ocele a duralu tloušťky 10 mm

Z výsledného sloupcového grafu vyplývá, že u obou materiálů dochází ke značné kuželovitosti. U duralu je 0,408 mm a u ocele 0,17 mm, čili se potvrdila teorie z kapitoly „Kuželovitost“. Skutečnost, že se kuželovitost po dané operaci objeví, nám může ovlivnit celý výrobek a je třeba s tím počítat již při návrhu.

ZÁVĚR

Nekonvenční metody si od svého počátku našly místo v průmyslu a dnes jsou stále častějšími nástroji pro obrábění různých materiálů. Původně byly netradiční metody vyvinuty jako alternativní způsob obrábění. V současné době představují téměř běžný způsob obrábění. V porovnání s konvenčními metodami se jedná o nákladnější provoz, který je za určitých podmínek částečně kompenzován rychlostí obrábění. Laserová technologie je v podnicích již tolik zaběhnutá, že pojem nekonvenční se s ní přestává spojovat.

Teoretická část diplomové práce se věnuje fyzikální podstatě laserového záření, jeho vlastnostem, konstrukci a rozdělení laserů dle různých hledisek, dále je zde podán přehled kovových materiálů použitých v praktické části a závěr literární rešerše je nastíněn bezpečnosti práce s lasery.

Cílem experimentální části práce bylo studium vlivu laserového paprsku na kovové materiály (ocel 1.0060, 1.1219, 1.3505 a 1.3355). Za tímto účelem bylo provedeno experimentální obrábění neprůchozích drážek u vybraných vzorků na CO₂ laseru Trumpf L3030 s následným vyhodnocením. Potvrdilo se, že nezáleží na mechanických vlastnostech (tvrdost, pevnost a houževnatost), ale na tepelné vodivosti, elektrické vodivosti a teplotě tavení. Nejvhůře laserově obrobitelným materiálem se stala konstrukční nelegovaná ocel s označením 1.0060 (11 600), která vykazuje nejlepší známky pro obrábění na konvenčních strojích. Zatímco rychlořezná legovaná ocel 1.3355 (19 824) je nejlépe vhodný materiál pro obrábění laserovým paprskem. Všeobecně tedy platí, že není vyhovující nahrazovat laserovou technikou všechna konvenční zařízení a ponechat laser tam, kde je jeho použití efektivnější.

Další náplní experimentální části bylo studium vlivu laserového paprsku na kovový materiál a slitinu hliníku (ocel 1.0038 a dural 3.1355). Záměrem bylo řezání zmíněných materiálů na laseru Sincrono CP 4000 při změně technologických parametrů. U vzorků byla následně změřena drsnost povrchu ve třech rovinách (A, B a C) na každém obrobku. Z výsledných grafů a tabulek pro oba materiály platí, že s rostoucí tloušťkou materiálů se přesnost řezání zhoršuje. Dvojnásobná hodnota drsnosti na vstupu u oceli tloušťky 20 mm oproti oceli tloušťky 10 mm je způsobena rozdílnými technologickými podmínkami, kdy s ohledem na tloušťku materiálu musela být při konstantním výkonu volena o polovinu nižší rychlost, tudíž doba vzájemné interakce laser – materiál zde byla dvojnásobná, což způsobuje i rozdíly v kvalitě řezných hran.

Součástí vyhodnocení byla měřena kuželovitost u oceli a duralu stejné tloušťky (10 mm) ve dvou rovinách (A a C). Kuželovitost je způsobena vychýlením paprsku od své osy a objevila se u obou materiálů, u těžko obrobitelného duralu byla až 2,5x vyšší. Na závěr práce byla zkoumána drsnost struktury povrchu u vstupní části vzorků s následnými 3D zobrazeními. U zkoušky nebyly důležité technologické parametry, ale šlo pouze o zobrazení detailní struktury materiálu. Oblast řezání je charakterizovaná tvorbou rýhované stopy řezu, která vzniká při laserovém tavném řezání, jako výsledek cyklické povahy energetického paprsku při interakci s materiálem. Z obrázků vyplývá, že dochází k postupnému rozpadu laserového paprsku a že největší drsnost se ukázala u ocele tloušťky 20 mm.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SOCHOR, Václav. *Lasery a koherentní svazky*. 1. vyd. Praha: Academia, 1990, 195 s. ISBN 80-200-354-1.
- [2] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- [3] Co je laserová technologie?. *Lintech* [online]. 2011 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie>
- [4] *Technik: měsíčník Hospodářských novin*. Economica, a. s.: Praha, 2014, XXII, č. 9. ISSN 1210-616x.
- [5] Milestones - 50 years laser. *Milestones* [online]. 2014 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: [view-source:http://www.50-years-laser.com/en/50-years/milestones.html](http://www.50-years-laser.com/en/50-years/milestones.html)
- [6] Wiggle.com | Avid G3 Clean Sweep 160mm Rotor | Disc Brake Rotors. *Best selling* [online]. 2014 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: <http://www.wigglestatic.com/images/avid-g3-rotor-zoom.jpg>
- [7] LAPŠANSKÁ, Hana. *Lasery v praxi*. 1. vyd. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-808-7240-656.
- [8] NOVÁK, Miroslav. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. *LAO - lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [9] Rozdělení laserů | Centrum laserových a automatizačních technologií. *Úvod | Termomechanika technologických procesů* [online]. 2010 [cit. 2015-01-21]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>
- [10] KOŘÁN, Pavel. Mikroobrábění. NOVÁK, Miroslav. *LAO - lasery a optika* [online]. Praha, 19.02.2013 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [11] MINAŘÍK, Václav. Technologické lasery. *CWS ANB - česká svářečská společnost* [online]. Praha, 29.12.2007 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=228>

- [12] KUSALA, Jaroslav. LASER A JEHO VYUŽITÍ. *Skupina ČEZ* [online]. 2004 [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>
- [13] NOVÁK, Pavel. Lasery a moderní fyzika | Katedra fyziky - Fakulta stavební ČVUT. *FSv ČVUT v Praze -- FSv ČVUT* [online]. 2009 [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/vyuka/lasery-moderni-fyzika?prezentace>
- [14] ŘASA, Jaroslav; a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění – 4. díl. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2008, číslo 3 [cit. 2015-01-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [15] Laserové řezání. *LAO - lasery a optika* [online]. Praha, 2014 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-rezani-80>
- [16] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting). *LAO - lasery a optika* [online]. Praha, 2013 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [17] Laserové svařování a navařování. *LAO - lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-svarovani-a-navarovani-86>
- [18] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové svařování I (laser welding). *LAO - lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- [19] Laserové svařování plastů. *Lintech* [online]. 2011 [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-svarovani-plastu>
- [20] Laserové svařování kovů. *Lintech* [online]. 2011 [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-svarovani-kovu>
- [21] ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Praha, 2006 [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
- [22] KOŘÁN, Pavel. Laserové vrtání. *LAO - lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-vrtani-92>

- [23] Vrtání. *Home - TRUMPF Česká Republika* [online]. 2013 [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/vrtani.html>
- [24] LASEROVÉ GRAVÍROVÁNÍ. *Úvod* [online]. Liberec, 2013 [cit. 2015-02-09]. Dostupné z: <http://www.vuts.cz/laserove-gravirovani.html>
- [25] Laserové značení a gravírování. *LAO - lasery a optika* [online]. Praha, 2013 [cit. 2015-02-09]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89>
- [26] Gravírování a úběr. *Home - TRUMPF Česká Republika* [online]. Praha, 2014 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/popisovani-laserem/gravirovani.html>
- [27] Značení a gravírování kovových materiálů. *LAO - lasery a optika* [online]. Praha, 2014 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89/znaceni-a-gravirovani-kovovych-materialu-91>
- [28] Značení a gravírování nekovových materiálů. *LAO - lasery a optika* [online]. Praha, 2014 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89/znaceni-a-gravirovani-nekovovych-materialu-90>
- [29] Gravírování plastu, plexiskla a polystyrénu. *Gravírování a rytí, laserové gravírování a CNC frézování | KAVALÍR* [online]. Praha, 2014 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.gravirovani-laserem.com/plast-plexisklo-polystyren.php>
- [30] DAHOTRE, Narendra B a Sandip P HARIMKAR. *Laser fabrication and machining of materials*. New York, N.Y.: Springer, 2007, 558 s. ISBN 978-0-387-72343-3.
- [31] Laser-assisted machining will make ceramic parts less costly. *Purdue University* [online]. 2000 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: <http://www.purdue.edu/uns/images/shin.ceramic2.jpeg>
- [32] ŘASA, Jaroslav a KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 2008 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
- [33] KOŘÁN, Pavel. Mikroobrábění. *LAO - lasery a optika* [online]. 2014 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/mikroobrabeni-95>

- [34] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-708-0600-1. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/uid_isbn-80-7080-600-1/anotace/
- [35] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [36] VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 204 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [37] MARTINÁK, Josef. Označování ocelí | Učíme v prostoru - Encyklopedie Drtič kamene. *Učíme v prostoru - vzdělávací 3D encyklopedie* [online]. 2013 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2667
- [38] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 118 s. ISBN 978-80-01-04212-0.
- [39] Kliková hřídel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Klikov%C3%A1_h%C5%99%C3%ADdel
- [40] Kuželové soukolí z mosaze, převod 1:1 - 4:1. Eshop.ameco.cz [online]. 2014 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://eshop.ameco.cz/produkty/Kuzelove-sukolesia-z-mosadze-prevod-11---41>
- [41] Kuličková ložiska. Vítejte v e-shopu vzduchotechnika-prodej.cz [online]. 2012 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.vzduchotechnika-prodej.cz/clanky/kulickova-loziska>
- [42] NOVOTNÝ, Jindřich. Frézovací nástroje STARK s HW/HS výměnnými noži. *STARK HSS a HM pilové kotouče na kov, STARK frézovací sady* [online]. 2012 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.stark.cz/drevoobrabecni-nastroje/frezovaci-nastroje-s-hw-hs-vymennymi-nozi/>
- [43] LETOVSKÁ. BOZP info - Téma týdne. *BOZP info* [online]. 26.09.2011 [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: http://www.bozpinfo.cz/win/knihovna-bozp/citarna/tema_tydne/BOZP_lasery110923.html
- [44] Bezpečnost při používání laseru se zaměřením na zdravotnictví. *BOZP Profi* [online]. 26.2.2012 [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: http://www.bozpprofi.cz/bezpecnost-pri-pouzivani-laseru-se-zamerenim-na-zdravotnictvi-uniqueidgOke4NvrWuOKaQDKuox_ZyDs6-r29kev86iZirc5-dg/

- [45] DUŠEK, Filip. Ochranné pomůcky. *LAO - lasery a optika* [online]. 2014 [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/ochrannepomucky-168k>
- [46] Vybrané oceli - vlastnosti a použití. *SVARINFO - váš zdroj informací o svařování, server ze skupiny SVARBAZAR* [online]. 2005 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=oceli_pouziti
- [47] JECH, Jaroslav a Vladimír PEŠL. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983, 391 s.
- [48] Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů. *Drsnost obrobeneho povrchu | TumliKOVO: Technologie strojního obrábění kovů* [online]. 24.3.2011 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>
- [49] HAVRAN, Lukáš. *Vliv drsnosti povrchu drážek vrtáku na jeho životnost*. Zlín, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Josef Hrdina.
- [50] Měříte správně strukturu povrchu?. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. 7.10.2002 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/merite-spravne-strukturu-povrchu.html>
- [51] Jakosti ocelí | www.feromat.cz. HUTNÍ a SPOJOVACÍ MATERIÁL [online]. 2010 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
- [52] Sortimentní katalog. Feron, a.s. - Velkoobchod hutním materiálem [online]. 2014 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php
- [53] DVOŘÁK, Jaromír. *Integrita rozhraní materiálu obráběných progresivními technologiemi*. Brno, 2009. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=58947. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E_1	Nižší energetická hladina
E_2	Vyšší energetická hladina
h	Planckova konstanta = $6,626 \cdot 10^{-34}$ [J.s]
ν	Frekvence uvolněného vlnění
LPSS	Lamp pumped solid state
DPSS	Diode pumped solid state
CD	Compact Disc
DVD	Digital Video Disc
O_2	Kyslík
CO_2	Oxid uhličitý
LAM	Laser - assisted machining
LM	Laser machining
Fe	Ocel
Cu	Měď
Al	Hliník
Au	Zlato
R	Parametr drsnosti povrchu
W	Parametr vlnitosti povrchu
P	Parametr základního povrchu

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – Pružinka u hodinek (1961) a laserové diody (1962) [5]</i>	12
<i>Obr. 2 – Rezonátor CO₂ laseru (1964) a značení potravin (1965) [5]</i>	13
<i>Obr. 3 – Brzdový kotouč (1967) [5] a solární článek (1971) [6]</i>	13
<i>Obr. 4 – Lopatka turbíny (1971) a dveře auta (1982) [5]</i>	14
<i>Obr. 5 – Stent řezání [5]</i>	15
<i>Obr. 6 – Obecné schéma laseru [4]</i>	15
<i>Obr. 7 - Nekoherentní záření svítilny (1), Monochromatické koherentní laserové záření (2) [4]</i>	16
<i>Obr. 8 – Stimulovaná emise [8]</i>	17
<i>Obr. 9 – Schéma chlazení a buzení jednotlivých laserů [10]</i>	19
<i>Obr. 10 – Schéma Nd:YAG laseru buzeného lampami [10]</i>	20
<i>Obr. 11 – Schéma a popis CO₂ laseru [10]</i>	21
<i>Obr. 12 – Schéma a popis diskového laseru [10]</i>	22
<i>Obr. 13 – Schéma a popis vláknového laseru [10]</i>	23
<i>Obr. 14 – Laserový mikroskop, snímač čárového kódu, zařízení k měření vzdáleností [13]</i>	24
<i>Obr. 15 – Podíl jednotlivých typů operací [14]</i>	24
<i>Obr. 16 – Princip laserového řezání [16]</i>	26
<i>Obr. 17 – Řezání plexiskla, kovů a překližky laserem [15]</i>	27
<i>Obr. 18 – Princip laserového svařování</i>	28
<i>Obr. 19 - Princip transmisivního svařování [19]</i>	29
<i>Obr. 20 – Příklad svařování kovů [20]</i>	30
<i>Obr. 21 – Ukázka vrtání laserem [22]</i>	32
<i>Obr. 22 – Ukázka vrtání laserem</i>	33
<i>Obr. 23 – Ukázka gravírování laserem</i>	34
<i>Obr. 24 – Příklad gravírování kovů [27]</i>	35
<i>Obr. 25 – Příklad gravírování a popisování plastových dílů [29]</i>	35
<i>Obr. 26 – Ukázka laserem podporovaného soustružení [31]</i>	36
<i>Obr. 27 – Princip šroubovicového (vlevo) a prstencového úběru materiálu [32]</i>	37
<i>Obr. 28 – Princip odřezávání materiálu – malý (vlevo) a velký úhel dopadu [32]</i>	38
<i>Obr. 29 – Ukázka laserového mikroobrábění [33]</i>	39
<i>Obr. 30 – Hmotnostní využití odlišných materiálů [34]</i>	40

<i>Obr. 31 – Rozdělení kovových materiálů [34]</i>	41
<i>Obr. 32 – Schéma číselného označení oceli dle ČSN [37]</i>	43
<i>Obr. 33 – Příklady použití oceli třídy 11 – Kliková hřídel, ozubené kolo a svorník [39]</i>	45
<i>Obr. 34 – Příklady použití oceli třídy 12 – Ozubené soukolí, hřeben a věnec [40]</i> ...	45
<i>Obr. 35 – Příklady použití oceli třídy 14 – Kulíčkové a válečkové ložiska, ojnice</i> <i>[41]</i>	46
<i>Obr. 36 – Příklady použití oceli třídy 19 – Frézovací nástroj s výměnnými noži,</i> <i>ráčnový klíč a tesařské kladívko [42]</i>	47
<i>Obr. 37 – Schéma číselného označení oceli dle EN [36]</i>	48
<i>Obr. 38 – Rozdělení neželezných kovů [35]</i>	50
<i>Obr. 39 – Číselné značení slitin hliníku k tváření [35]</i>	50
<i>Obr. 40 – Číselné značení slitin hliníku na odlitky [35]</i>	51
<i>Obr. 41 – Příklady použití slitin hliníku – Blok motoru, disk kola a plechovka [36]</i> .	51
<i>Obr. 42 – Ochranné laserové brýle a zástěna [45]</i>	53
<i>Obr. 43 – Rozměry vzorku</i>	59
<i>Obr. 44 – Rozmístění drážek na vzorku</i>	59
<i>Obr. 45 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.0060)</i>	65
<i>Obr. 46 – Boxplot pro výkon 250 W (ocel 1.0060)</i>	65
<i>Obr. 47 – Boxplot pro výkon 290 W (ocel 1.0060)</i>	66
<i>Obr. 48 – Boxplot pro výkon 335 W (ocel 1.0060)</i>	66
<i>Obr. 49 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.1219)</i>	68
<i>Obr. 50 – Boxplot pro výkon 250 W (ocel 1.1219)</i>	68
<i>Obr. 51 – Boxplot pro výkon 290 W (ocel 1.1219)</i>	69
<i>Obr. 52 – Boxplot pro výkon 335 W (ocel 1.1219)</i>	69
<i>Obr. 53 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.3505)</i>	71
<i>Obr. 54 – Boxplot pro výkon 250 W (ocel 1.3505)</i>	71
<i>Obr. 55 – Boxplot pro výkon 290 W (ocel 1.3505)</i>	72
<i>Obr. 56 – Boxplot pro výkon 335 W (ocel 1.3505)</i>	72
<i>Obr. 57 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.3355)</i>	74
<i>Obr. 58 – Boxplot pro výkon 250 W (ocel 1.3355)</i>	74
<i>Obr. 59 – Boxplot pro výkon 290 W (ocel 1.3355)</i>	75
<i>Obr. 60 – Boxplot pro výkon 335 W (ocel 1.3355)</i>	75

<i>Obr. 61 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 250\text{ W}$)</i>	76
<i>Obr. 62 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 290\text{ W}$)</i>	77
<i>Obr. 63 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 335\text{ W}$)</i>	78
<i>Obr. 64 – Celkové srovnání naměřených hodnot ($P = 335\text{ W}$)</i>	79
<i>Obr. 65 – Celkové srovnání naměřených hodnot ($P = 290\text{ W}$)</i>	79
<i>Obr. 66 – Celkové srovnání naměřených hodnot ($P = 250\text{ W}$)</i>	80
<i>Obr. 67 – Celkové srovnání naměřených hodnot</i>	81
<i>Obr. 68 – Rozměry všech vzorků</i>	82
<i>Obr. 69 – Základní pojmy (1. Skutečný profil povrchu, 2. Drsnost povrchu, 3. Vlnitost povrchu, 4. Obecný tvar povrchu) [48]</i>	83
<i>Obr. 70 – Průměrná aritmetická hodnota R_a [49]</i>	83
<i>Obr. 71 – Nejvyšší výška profilu R_z [49]</i>	84
<i>Obr. 72 – Celková výška profilu R_t [49]</i>	84
<i>Obr. 73 – Roviny měření drsnosti povrchu</i>	86
<i>Obr. 74 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 10 mm pro rovinu A</i>	87
<i>Obr. 75 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 10 mm pro rovinu B</i>	88
<i>Obr. 76 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 10 mm pro rovinu C</i>	89
<i>Obr. 77 – Boxplot pro drsnost povrchu duralu tloušťky 10 mm</i>	90
<i>Obr. 78 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 5 mm pro rovinu A</i>	91
<i>Obr. 79 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 5 mm pro rovinu B</i>	92
<i>Obr. 80 – Sumář výsledků drsnosti duralu tloušťky 5 mm pro rovinu C</i>	93
<i>Obr. 81 – Boxplot pro drsnost povrchu duralu tloušťky 5 mm</i>	94
<i>Obr. 82 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 20 mm pro rovinu A</i>	95
<i>Obr. 83 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 20 mm pro rovinu B</i>	96
<i>Obr. 84 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 20 mm pro rovinu C</i>	97
<i>Obr. 85 – Boxplot pro drsnost povrchu oceli tloušťky 20 mm</i>	98
<i>Obr. 86 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 20 mm pro rovinu A</i>	99
<i>Obr. 87 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 10 mm pro rovinu B</i>	100
<i>Obr. 88 – Sumář výsledků drsnosti ocele tloušťky 10 mm pro rovinu C</i>	101
<i>Obr. 89 – Boxplot pro drsnost povrchu oceli tloušťky 10 mm</i>	102
<i>Obr. 90 – Celkové srovnání naměřených hodnot</i>	102
<i>Obr. 91 – Oblast měření drsnosti duralu tloušťky 10 mm</i>	103
<i>Obr. 92 – Porovnání oblastí u ocele tloušťky 20 mm</i>	104

<i>Obr. 93 – Porovnání oblastí u ocele tloušťky 10 mm</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 94 – Porovnání oblastí u duralu tloušťky 10 mm</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 95 – Boxplot rozměrů kuželovitosti duralu tloušťky 10 mm</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 96 – Boxplot rozměrů kuželovitosti ocele tloušťky 10 mm</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 97 – Porovnání kuželovitostí u ocele a duralu tloušťky 10 mm</i>	<i>109</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Základní přehled průmyslových laserů [10]</i>	19
<i>Tab. 2 – Vlastnosti železa [34]</i>	42
<i>Tab. 3 – Rozdělení ocelí do tříd [35]</i>	43
<i>Tab. 4 – Číselné značení tepelného zpracování ocelí [36]</i>	44
<i>Tab. 5 – Číselné značení stupně tváření za studena [38]</i>	44
<i>Tab. 6 – Číselné značení ocele třídy 19 [37]</i>	47
<i>Tab. 7 – Základní symboly v označování ocelí podle ČSN EN 10027 – 1 [36]</i>	48
<i>Tab. 8 – Parametry zkoušky</i>	60
<i>Tab. 9 – Přiřazení značek ocelí ČSN ke značkám EN</i>	60
<i>Tab. 10 – Obsah prvků u oceli 11 600 [47]</i>	61
<i>Tab. 11 – Obsah prvků u oceli 12 060 [47]</i>	62
<i>Tab. 12 – Obsah prvků u oceli 14 109 [47]</i>	62
<i>Tab. 13 – Obsah prvků u oceli 19 824 [47]</i>	63
<i>Tab. 14 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.0060)</i>	64
<i>Tab. 15 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.1219)</i>	67
<i>Tab. 16 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.3505)</i>	70
<i>Tab. 17 – Závislost hloubky řezu na rychlosti a výkonu (ocel 1.3355)</i>	73
<i>Tab. 18 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 250 W$)</i>	76
<i>Tab. 19 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 290 W$)</i>	77
<i>Tab. 20 – Závislost hloubky řezu na rychlosti řezání ($P = 335 W$)</i>	78
<i>Tab. 21 – Přiřazení značek oceli a hliníku ČSN ke značkám EN</i>	85
<i>Tab. 22 – Řezné podmínky</i>	85
<i>Tab. 23 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 10 mm pro rovinu A</i>	87
<i>Tab. 24 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 10 mm pro rovinu B</i>	88
<i>Tab. 25 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 10 mm pro rovinu C</i>	89
<i>Tab. 26 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 5 mm pro rovinu A</i>	91
<i>Tab. 27 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 5 mm pro rovinu B</i>	92
<i>Tab. 28 – Hodnoty drsnosti pro dural tloušťky 5 mm pro rovinu C</i>	93
<i>Tab. 29 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 20 mm pro rovinu A</i>	95
<i>Tab. 30 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 20 mm pro rovinu B</i>	96
<i>Tab. 31 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 20 mm pro rovinu C</i>	97
<i>Tab. 32 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 10 mm pro rovinu A</i>	99

<i>Tab. 33 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 10 mm pro rovinu B</i>	<i>100</i>
<i>Tab. 34 – Hodnoty drsnosti pro ocel tloušťky 10 mm pro rovinu C</i>	<i>101</i>
<i>Tab. 35 – Hodnoty kuželovitosti pro dural tloušťky 10 mm pro rovinu A</i>	<i>106</i>
<i>Tab. 36 – Hodnoty kuželovitosti pro dural tloušťky 10 mm pro rovinu C</i>	<i>106</i>
<i>Tab. 37 – Hodnoty kuželovitosti pro ocel tloušťky 10 mm pro rovinu A</i>	<i>107</i>
<i>Tab. 38 – Hodnoty kuželovitosti pro ocel tloušťky 10 mm pro rovinu C</i>	<i>108</i>