

Analýza nekonvenčních technologií se zaměřením na řezání vodním paprskem a laserem

Bc. Ondřej Struška

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej STRUŠKA**

Osobní číslo: **T11171**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Analýza nekonvenčních technologií se zaměřením na řezání vodním paprskem a laserem**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma
2. Provedte experimentální obrábění laserem a vodním paprskem při změně technologických parametrů pro vybrané materiály
3. Vyhodnoťte kvalitu a rozměrovou přesnost obráběných ploch

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucí práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

10. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: Struška Ondřej

Obor: Procesní inženýrství

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 užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 10.5.2013



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 nevydávalečně 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 nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

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

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

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

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

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jim 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 přihlídáne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je srovnání výrobků vyrobených technologií řezání laserovým paprskem a vodním paprskem. Porovnává rozměrovou přesnost výrobků obroběných jednotlivými technologiemi a dále především jakost obroběného povrchu. V práci jsou probrány různé nekonvenční technologie obrábění a na závěr podrobněji popsány technologie vodního paprsku a laseru.

Klíčová slova: vodní paprsek, laser, nekonvenční technologie obrábění, řezná rychlost

ABSTRACT

The aim of this thesis is to compare the products produced by laser cutting technology and water jet. Compares the dimensional accuracy of machined products different technologies, and especially the quality of the machined surface. The paper discusses various unconventional machining technology and finally described in detail technology of water jet and laser.

Keywords: water jet, laser, unconventional technologies soft machining, machining speed

Děkuji doc. Ing. Sýkorové, PhD. za vedení diplomové práce a její cenné rady a pomoc při její vypracování a firmě MRB Sazovice za možnost uskutečnění svého experimentu, zejména Karlovi Klimkovi za pomoc a informace k práci.

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

.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	13
1.1 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ	13
2 PŘEHLED NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ	15
2.1 MECHANICKÉ METODY ÚBĚRU MATERIÁLU	15
2.1.1 Obrábění ultrazvukem	15
2.1.2 Obrábění vodním paprskem	16
2.1.3 Obrábění abrazivním paprskem	16
2.1.4 Obrábění proudem brusiva	17
2.2 CHEMICKÉ METODY ÚBĚRU MATERIÁLU	18
2.2.1 Chemické obrábění.....	18
2.2.2 Fotochemické obrábění	18
2.3 ELEKTRICKÉ NEBO ELEKTROCHEMICKÉ METODY ÚBĚRU MATERIÁLU	18
2.3.1 Elektrochemické obrábění.....	19
2.3.2 Elektrochemické broušení	19
2.4 TEPelnÉ NEBO ELEKTROTEPELNÉ METODY ÚBĚRU MATERIÁLU	20
2.4.1 Obrábění laserem	20
2.4.2 Obrábění paprskem elektronů	20
2.4.3 Obrábění paprskem iontů	21
2.4.4 Elektroerozivní obrábění	21
2.4.5 Řezání plazmovým paprskem	22
3 OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPSREM	24
3.1 PRINCIP ZAŘÍZENÍ	25
3.1.1 Typy paprsku.....	26
3.2 VYUŽITÍ VODNÍHO PAPSREM	26
3.3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ VODNÍHO PAPSREM.....	27
3.3.1 Soustružení	27
3.3.2 Frézování	27
3.3.3 Vrtání.....	28
3.4 VÝHODY POUŽITÍ VODNÍHO PAPSREM	29
3.5 NEVÝHODY POUŽITÍ VODNÍHO PAPSREM.....	29
4 OBRÁBĚNÍ LASEREM	30
4.1 HISTORIE LASERU	30
4.2 DEFINICE LASERU A JEHO VLASTNOSTI	31
4.3 DRUHY LASERŮ A JEJICH DĚLENÍ	34
4.3.1 Lasery v pevné fázi	34
4.3.2 Plynové lasery	36
4.3.3 Kapalinové lasery	37
4.3.4 Polovodičové lasery	37

4.4	PŮSOBENÍ LASERU NA MATERIÁL	38
4.5	APLIKACE LASEROVÉHO PAPRSKU PRO OPRACOVÁNÍ MATERIÁLŮ	39
4.5.1	Řezání laserovým paprskem	39
4.5.2	Vrtání laserem	40
4.5.3	Soustružení laserem	41
4.5.4	Mikroobrábění laserem	42
4.5.5	Dokončování povrchů laserem.....	42
4.5.6	Další aplikace laseru ve strojírenství.....	42
5	CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	44
II	PRAKTICKÁ ČÁST	45
6	VZORKY POUŽITÉ K EXPERIMENTU A VYHODNOCOVACÍ ZARÍZENÍ	46
6.1	MATERIÁL VZORKŮ.....	46
6.1.1	Ocel 11 375	46
6.1.2	Dural ČSN 42 4203 (AlCu4Mg1).....	47
6.2	ZARÍZENÍ PRO VÝROBU VZORKŮ.....	47
6.2.1	Laser.....	47
6.2.2	Vodní paprsek	48
6.3	MĚŘICÍ A VYHODNOCOVACÍ ZARÍZENÍ.....	49
6.3.1	Měření drsnosti povrchu	49
6.3.2	Měření kuželovitosti řezu.....	50
6.3.3	Měření rozměrů	51
6.3.4	Hodnocení kvality povrchu	51
7	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	52
7.1	VYHODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU U VZORKŮ VYROBENÝCH LASEREM	53
7.1.1	Dural tloušťky 10 mm	53
7.1.2	Dural tloušťky 5 mm	56
7.1.3	Ocel tloušťky 20 mm.....	59
7.1.4	Ocel tloušťky 10 mm.....	62
7.1.5	Ocel tloušťky 1,5 mm.....	65
7.1.6	Přehled výsledků měření drsnosti při obrábění laserem.....	66
7.1.7	Zhodnocení.....	70
7.2	VYHODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU U VZORKŮ VYROBENÝCH VODNÍM PAPRSKEM	72
7.2.1	Dural tloušťky 10 mm	72
7.2.2	Dural tloušťky 5 mm	75
7.2.3	Ocel tloušťky 20 mm.....	78
7.2.4	Ocel tloušťky 10 mm.....	81
7.2.5	Ocel tloušťky 1,5 mm.....	84
7.2.6	Přehled výsledků měření drsnosti při obrábění vodním paprskem	85
7.2.7	Zhodnocení.....	88
7.3	VYHODNOCENÍ KUŽELOVITOSTI VZORKŮ PŘI ŘEZÁNÍ LASEREM	89
7.3.1	Dural tloušťky 10 mm	90
7.3.2	Dural tloušťky 5 mm	92
7.3.3	Ocel tloušťky 20 mm.....	94
7.3.4	Ocel tloušťky 10 mm.....	96

7.3.5	Ocel tloušťky 1,5 mm.....	98
7.3.6	Přehled výsledků měření kuželovitosti při obrábění laserem	100
7.3.7	Zhodnocení.....	101
7.4	VYHODNOCENÍ KUŽELOVITOSTI VZORKŮ PŘI ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPERSEM.....	102
7.4.1	Dural tloušťky 10 mm	102
	KUŽELOVITOST OBROBKU JE 0,03 MM.....	102
7.4.2	Dural tloušťky 5 mm	104
7.4.3	Ocel tloušťky 20 mm.....	106
7.4.4	Ocel tloušťky 10 mm.....	108
7.4.5	Ocel tloušťky 1,5 mm.....	110
7.4.6	Přehled výsledků měření kuželovitosti při obrábění vodním paprskem	112
7.4.7	Zhodnocení.....	114
7.5	HODNOCENÍ ROZMĚROVÉ PŘESNOSTI	114
7.5.1	Laserové obrábění	114
7.5.2	Obrábění vodním paprskem	117
7.5.3	Zhodnocení.....	120
7.6	HODNOCENÍ KVALITY OPRACOVANÉHO POVRCHU	120
7.7	HODNOCENÍ TVRDOSTI	122
	ZÁVĚR	123
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	125
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	127
	SEZNAM OBRÁZKŮ	128
	SEZNAM TABULEK.....	132

ÚVOD

Nekonvenční technologie jsou relativně nový způsob obrábění kovových i nekovových materiálů. Jsou to způsoby obrábění, které využívají k úběru materiálu působení chemické reakce, tepla, elektrochemicky nebo mechanicky. S výhodou se používají pro obrábění těžce obrobitelných materiálů, které jsou klasickými metodami neobrobitelné nebo obrobitelné těžce. Další použití těchto způsobů je při obrábění velmi složitých tvarů, které jsou taktéž klasickými metodami neobrobitelné. V dnešní době jsou nekonvenční technologie rozšířené v celé oblasti strojírenství a některé z nich jsou využívány i v jiných oblastech, např.: v lékařství, potravinářství apod.

V této diplomové práci jsou popsány nejrozšířenější metody nekonvenčních technologií, které se používají v praxi a dále je fokusována na řezání vodním paprskem a řezání laserem. V praktické části se nachází srovnání měření a zkoumání jednotlivých vzorků z obou technologií.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVEČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Pod konvenční metody řadíme klasické a dlouhá léta používané způsoby obrábění materiálů, jako jsou soustružení, frézování, protahování, protlačování, broušení apod. V dnešní době v některých případech není vhodné použití těchto metod, nebo dokonce nejsou tyto metody použitelné pro daný výrobek, ať už z pohledu složitosti tvaru nebo z pohledu materiálu. Další výhodou metod nekonvenčních je ze strany ekologie.

Hlavním znakem nekonvenčních metod je, že u velké většiny z nich není k úběru materiálu potřebná mechanická práce. K úběru dochází vlivem tepla, elektřiny, chemické reakce, ultrazvuku, abraze nebo jejich vzájemné kombinace. Za výhodu to má, že obrobek není namáhán silovým působením, nevznikají kmity, tudíž není nutné upnutí obrobku atd.

Obrobitelnost materiálů pomocí nekonvenčních technologií není dána jeho mechanickými vlastnostmi, jako jsou např.: tvrdost a pevnost, ale spíše na fyzikálních vlastnostech jako tepelná vodivost, elektrická vodivost, teplota tání a vypařování, chemická odolnost apod.

Při obrábění nekonvenčními metodami se využívá možnosti cíleně ovlivňovat opracovávaný povrch, např.: zvyšování tvrdosti, zvyšování odolnosti proti korozi.

1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Rozdělení provedu pomocí energetického zdroje:

Mechanické procesy:

Obrábění ultrazvukem (USM)

Obrábění vodním paprskem (AWM/AJM)

Obrábění proudem brusiva (WJM/AWJM)

Chemické procesy:

Chemické obrábění (CM)

Fotochemické obrábění (PCM)

Elektrické nebo elektrochemické procesy:

Elektrochemické obrábění (ECM)

Elektrochemické broušení (ECG)

Tepelné nebo elektrotepelné procesy:

Obrábění laserem (LBM)

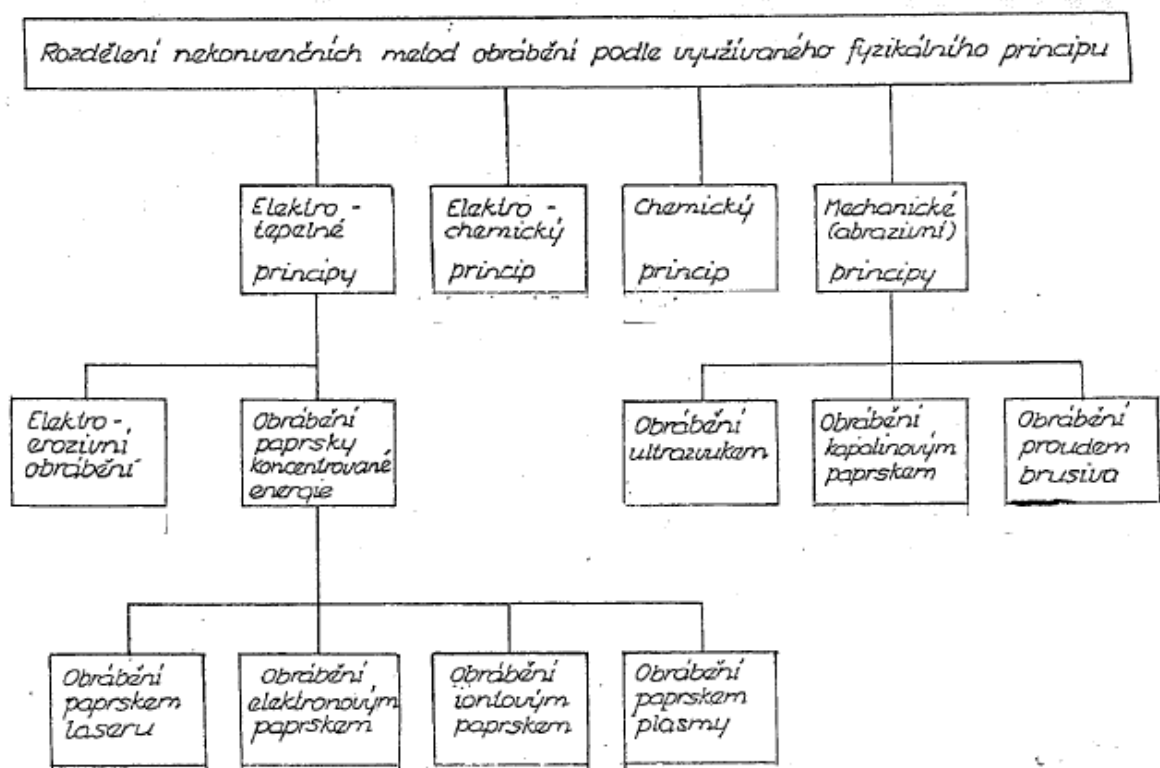
Obrábění paprskem plazmy (PAM)

Obrábění paprskem iontů (IBM)

Obrábění paprskem elektronů (EBM)

Elektroerosivní obrábění (EDM)

Pro přehlednost je rozdělení provedeno i v následujícím schématu.



Obr. 1: Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [2]

2 PŘEHLED NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ

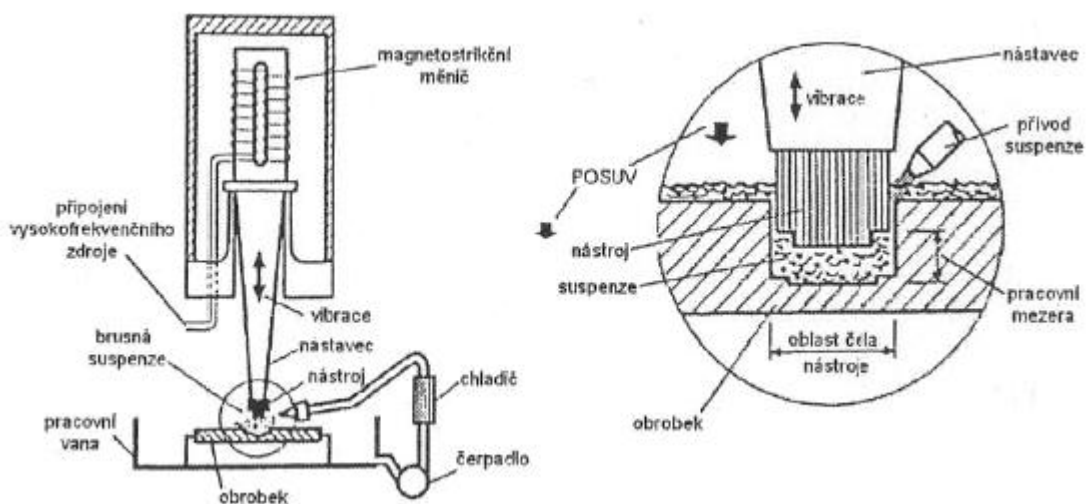
V následující kapitole se zaměřím na vybrané metody nekonvenčního obrábění a přibližíme si, na jakém principu jednotlivé úběry materiálu fungují.

2.1 Mechanické metody úběru materiálu

Mechanické metody úběru materiálu jsou založeny na mikrovylamování a mikrovyšťepování drobných částic materiálu vlivem dopadu částic brusiva na povrch obráběné součásti. [14]

2.1.1 Obrábění ultrazvukem

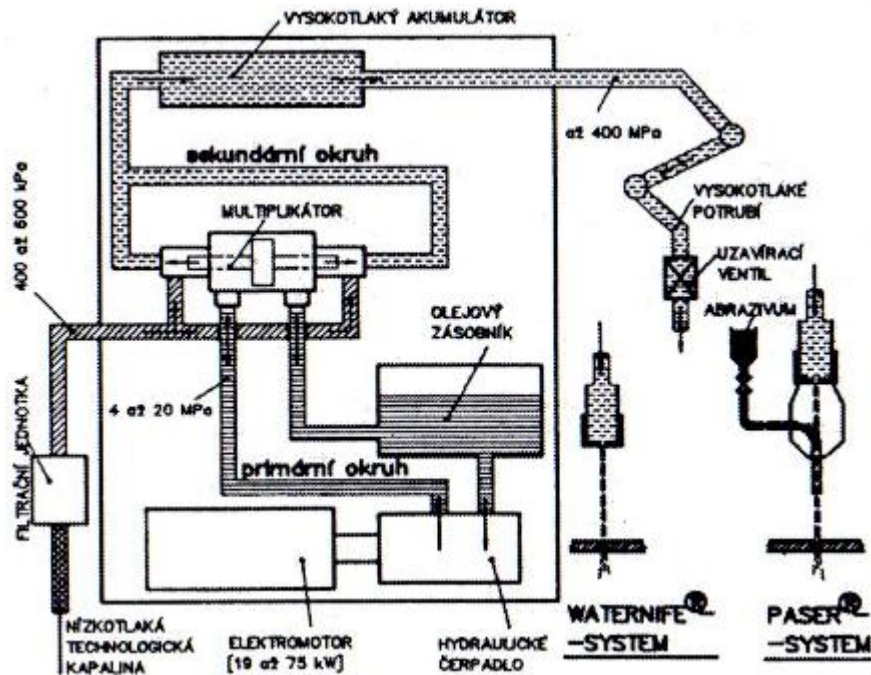
Ultrazvuk by se dal popsat jako akustické vlnění nad s frekvencí nad hladinou slyšitelnosti lidského sluchu. Nástroj kmitá vlivem ultrazvukových vln frekvencí okolo 20 – 30 kHz. Mezi nástroj a obrobek jsou přiváděna brusná zrna, která vylamují mikročástice obráběného materiálu, ale také nástroje. Brusná zrna jsou rozptýlena ve vodě, která je odplavuje z obráběné oblasti a zároveň odplavuje odebraný materiál. Navíc proudící voda spolu s kmitáním nástroje způsobuje kavitaci, což ještě zvyšuje účinnost obrábění. Vytvořený otvor má tvar čela nástroje. Na čele nástroje je úběr minimální, i proto je rozměr otvoru zpravidla větší než nástroj o střední velikost zrn brusiva. [1, 2]



Obr. 2. Princip obrábění ultrazvukem [14]

2.1.2 Obrábění vodním paprskem

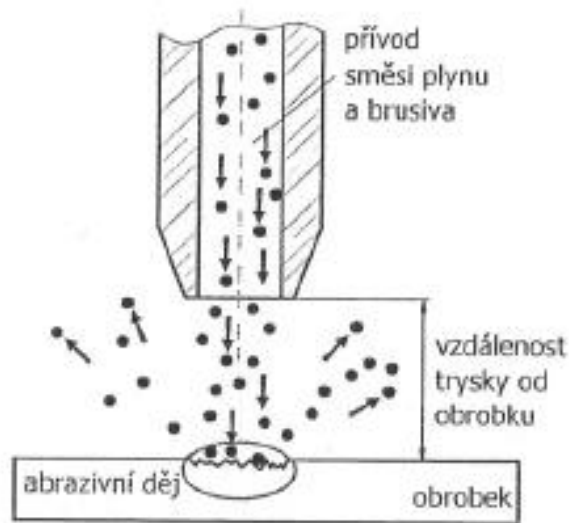
Tato metoda pracuje na principu abraze, kterou vyvolává v obráběném materiálu vysokoe-nergetický vodní paprsek vystupující z úzké trysky (do 0,3 mm) pod vysokým tlakem (60 – 400 MPa) rychlostí převyšující rychlost zvuku. Pro větší účinnost abraze lze do kapaliny přidávat různé brusivo. Touto metodou se budeme zabývat dále podrobněji. [2, 14]



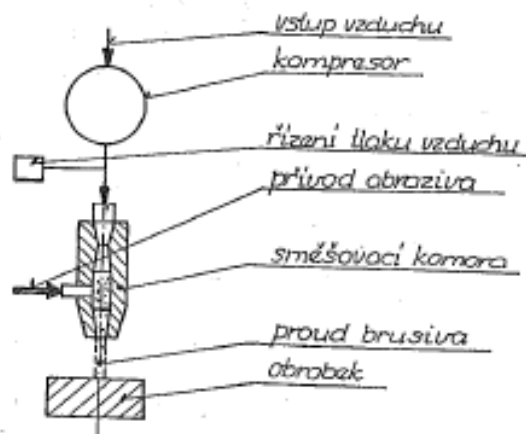
Obr. 3: Zařízení pro řezání vodním paprskem [14]

2.1.3 Obrábění abrazivním paprskem

Technologie je založena na abrazivních účincích brusiva, které je unášeno vysokou rychlostí pomocí proudu vzduchu. Při dopadu částic na povrch součásti dochází k vylamování materiálu. Jako brusiva se využívá oxid hlinitý nebo karbid křemíku. Vzhledem k velmi malému úběru materiálu a k dobré jakosti povrchu je využívána spíše jako dokončovací metoda. [2, 14]



Obr. 4: Obrábění abrazivním paprskem[14]



Obr. 5: Zařízení pro obrábění abrazivním paprskem [2]

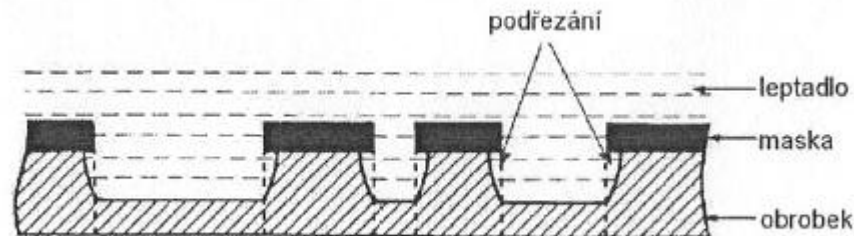
2.1.4 Obrábění proudem brusiva

Metoda sloužící k dokončování povrchu. Principiálně se jedná o protlačování polotuhého abrazivního média mezi obrobkem a přípravkem. Odstraňuje pouze velmi malé množství materiálu a princip funguje pouze v zúženém místě, kde je omezený průchod polotuhého média. [2]

2.2 Chemické metody úběru materiálu

2.2.1 Chemické obrábění

Je založeno na chemické reakci mezi obráběným materiálem a „nástrojem“, který tvoří nejčastěji kyselina nebo hydroxid. K úběru materiálu dochází odleptáváním tenkých vrstev materiálu. Odleptaná hloubka se pohybuje v rozsahu desetin až několika milimetrů. Na místa, která nechceme obrábět, je potřeba nanést tzv. masku v podobě plastu nebo pryže. Masky má vrstvu 0,2 až 0,4 mm. Pro chemické obrábění je typickým znakem tzv. podřezání. [2,14]



Obr. 6: Podřezání při chemickém obrábění [14]

2.2.2 Fotochemické obrábění

Vhodné pro opracování tenkých plechů (0,003 až 1,27 mm). Materiál je leptaný fotografickou technikou. Maximální tloušťka materiálu je 1,6 mm. Do nanesené masky z fotorezistivního materiálu se vytvoří pomocí ultrafialového záření otvory, které jsou poté odleptány. Technologie je nenáročná, s výhodou se používá u složitých tvarových otvorů do tenkých plechů a folií. Nevýhodou je potřeba značně zkušené obsluhy. [1]

2.3 Elektrické nebo elektrochemické metody úběru materiálu

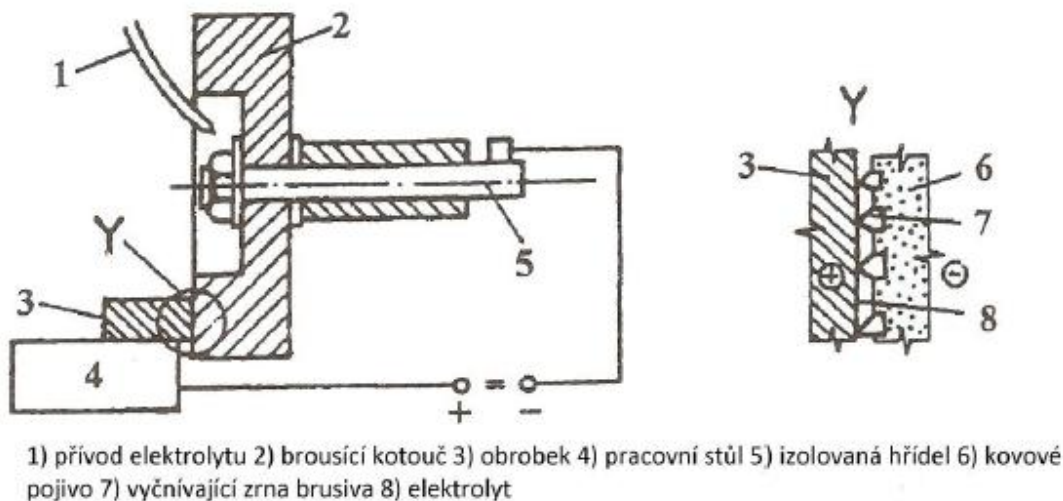
Primárním zdrojem je elektrická energie, která působí na elektrolyt a tím dochází k úběru materiálu.

2.3.1 Elektrochemické obrábění

Jedná se o proces opačný než galvanické pokovení s některými rozdíly. Jako anoda je připojen obrobek, nástroj naopak vystupuje jako katoda. V mezeře mezi oběma elektrodami protéká elektrolyt poměrně vysokou rychlostí (10 m/s). Při průchodu stejnosměrného elektrického proudu dochází k řízenému rozpouštění anody. Při rozpouštění dochází ke kopírování členitého tvaru nástroje (katody). Proud, protékající obvodem, je až 1000x vyšší, než se používá při galvanickém pokovení. [2]

2.3.2 Elektrochemické broušení

Zvláštní případ elektrolytického obrábění. K úběru materiálu dochází převážně díky elektrolyze, ale velmi malá část je ubírána také mechanicky. Obrobek je zapojen jako anoda, jako katoda je zapojen nástroj, v tomto případě brousící kotouč s kovovým (vodivým) pojivem a nevodivým brusivem. Nejčastěji se používá diamant nebo oxid hlinitý. Zrna brusiva vytvářejí stálou pracovní mezeru, kterou proudí elektrolyt (cca 0,025 mm). [1, 2, 14]



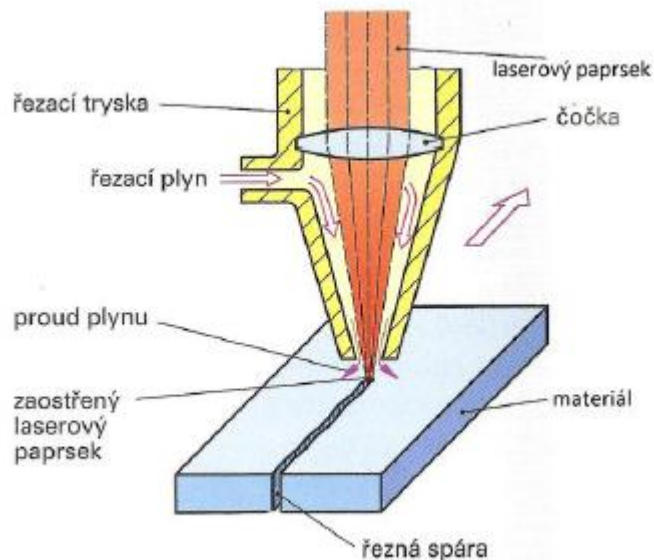
Obr. 7: Elektrochemické broušení [3]

2.4 Tepelné nebo elektrotepelné metody úběru materiálu

Tyto metody využívají k úběru materiálu primárně tepelnou energii, to znamená, že materiál je taven nebo odpařován. Pro obrábění využíváme různých zdrojů vzniku tepelné energie.

2.4.1 Obrábění laserem

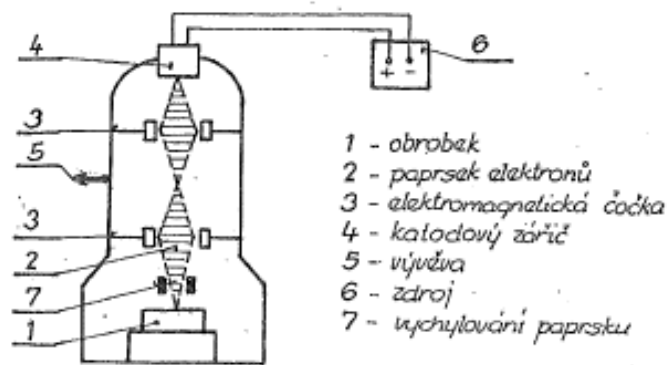
Vysokoenergetický stimulovaný světelný paprsek je fokusován do velmi malé plochy, která má průměr asi 0,2 až 0,25 mm. Na obráběném povrchu dochází k přeměně světelného záření na teplo, které, díky své vysoké teplotě v řádech 10^4 °C, způsobí tavení a odpařování obráběného materiálu. Tuto technologii rozebereme dále podrobněji. [2,6]



Obr. 8: Řezání laserem [4]

2.4.2 Obrábění paprskem elektronů

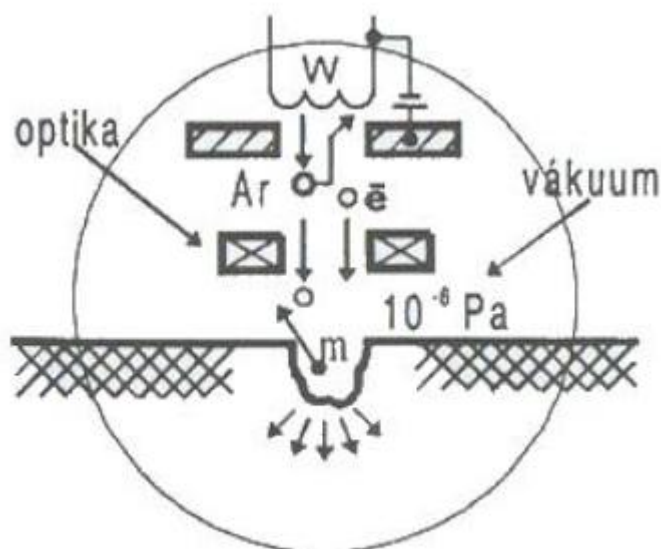
Urychlený a soustředěný paprsek elektronů dopadá na povrch součásti, kde se přeměňuje v teplo a dochází k tavení materiálu. Pro správnou účinnost technologie je potřeba pracovat ve vakuu. Lze obrábět vodivé i nevodivé materiály s malou hloubkou řezu (0,5 - 1 mm). [2]



Obr. 9: Obrábění paprskem elektronů [2]

2.4.3 Obrábění paprskem iontů

Obrábění probíhá vlivem kinetické energie iontů. Zdrojem proudu iontů bývá obvykle argon, nebo jiný vzácný plyn (krypton, xenon). Ten je ionizován elektrony, které jsou vyzařovány z katody. Ionty dopadají na povrch obrobku a vyrážejí z něj atomy. Ionty s nižší energií se odrazí zpět do prostoru a ionty s vyšší energií zůstávají v mřížce obráběného materiálu. Celý proces probíhá ve vakuu. Technologie je s výhodou využívána při výrobě matric integrovaných obvodů nebo při hlazení povrchu. [1,2]

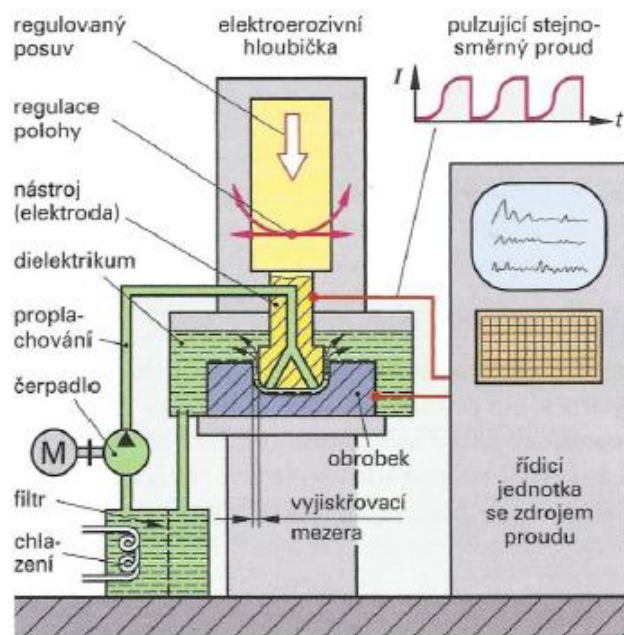


Obr. 10: Obrábění paprskem iontů [14]

2.4.4 Elektroerozivní obrábění

K vývoji tepla a tím k úběru materiálu dochází vlivem elektrického výboje vznikajícího mezi nástrojem a výrobkem. Celý děj se odehrává v prostředí kapalného dielektrika, které

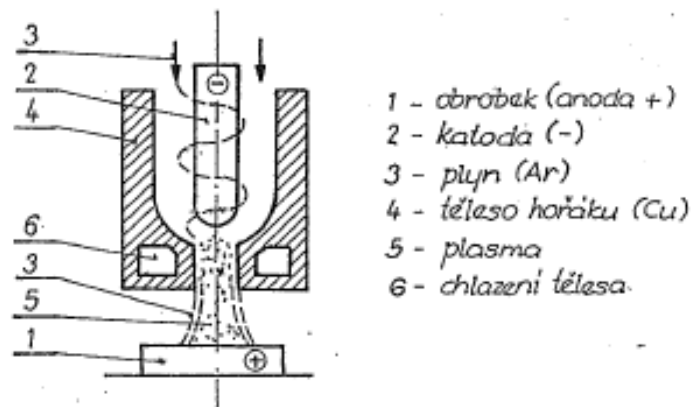
jednak vyplňuje pracovní mezeru, chladí a zároveň odplavuje odstraněný materiál. Nástroj se pohybuje kolmo k povrchu obrobku, do kterého je kopírován tvar nástroje. Technologie je využitelná pro materiály nezávisle na jejich mechanických vlastnostech, ovšem podmínkou je elektrická vodivost. Elektroda se vyrábí nejčastěji z grafitu nebo z mědi. Při procesu obrábění dochází také k opotřebení nástroje. Technologie se používá zejména pro kusovou výrobu velmi složitých tvarů. Na stejném principu pracuje také drátové řezání.



Obr. 11: Elektroerozivní obrábění [4]

2.4.5 Řezání plazmovým paprskem

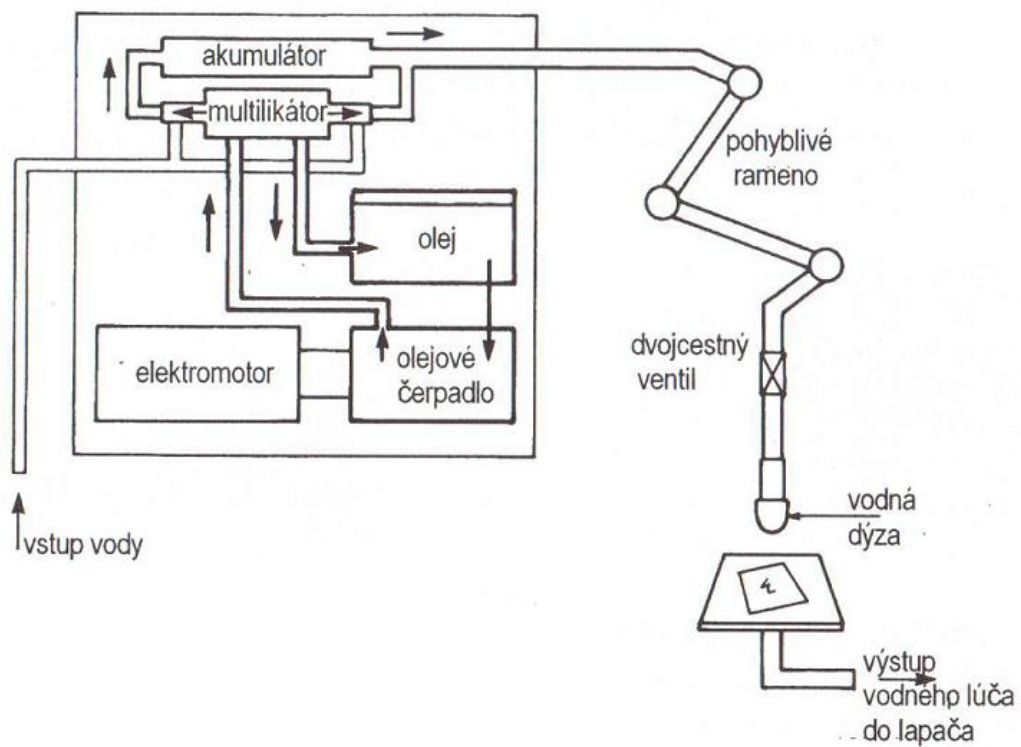
Plazma je označována jako čtvrté skupenství plynu. Označuje elektricky vodivý stav plynu, který se na Zemi téměř nevyskytuje. Vznikne buď jako výboj mezi katodou a anodou, nebo ionizací plynu při vysoké teplotě (nad 20 000 °C). Mezi nimi je vytvořen elektrický oblouk. Jakmile se plazma setká s materiálem obrobku, dojde díky vysoké teplotě k tavení a odtékání materiálu. [1, 2, 14]



Obr. 12: Řezání plazmovým paprskem [2]

3 OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPSREM

První stabilní vodní paprsek, který byl použitelný pro řezání dřeva a plastů se začal používat v roce 1970. Technologie obrábění vodním paprskem je všestranně použitelná, nejen ve strojírenství, ale také například v potravinářství, ve stavebnictví při řezání žuly, mramoru, dlažby, obkladů, při zpracování dřeva, plastů apod. Jsou používány dvě metody vodního opracování, WJM, tedy čistý vodní paprsek, který spočívá v tzv. hydrodynamickém obrábění. Používá se spíše pro méně odolné materiály. Druhou metodou je AWJM, vodní paprsek s přísadou jemného abraziva. Přísada brusiva nám rozšiřuje možnosti využití technologie vodního paprsku a je ve strojírenství rozšířenější. Zařízení pro obě metody je stejné, liší se až těsně před výstupní tryskou, kde u metody AWJM je do proudu vody přidáváno jemné brusivo.



Obr. 13: Zařízení pro řezání vodním paprskem [1]

3.1 Princip zařízení

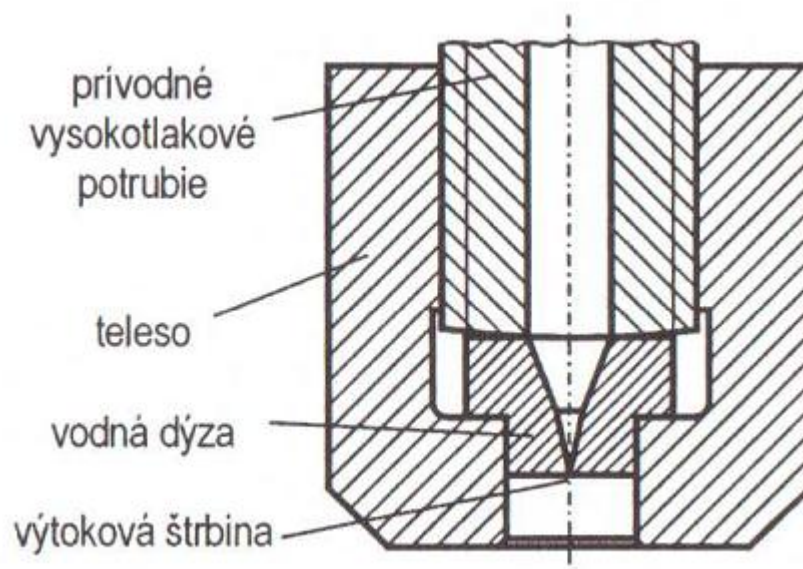
Celá sestava stroje pro řezání vodním paprskem se skládá z několika základních součástí. Čerpadlo, poháněné elektromotorem, vháší pod tlakem olej do multiplikátoru.

Multiplikátor je zařízení, které zvyšuje tlak vody v hydraulickém okruhu až na 380 MPa. Tlak, který multiplikátor vyvine, závisí na poměru plochy dvou oboustranných pístů.

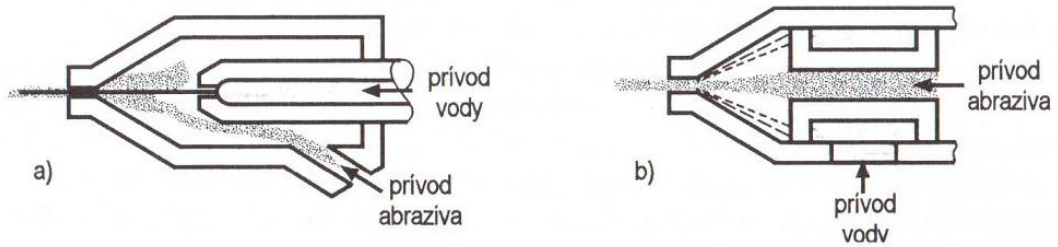
Za multiplikátorem v okruhu následuje vysokotlaký akumulátor. Ten slouží k tlumení rázů, které v okruhu vznikají, protože voda je stlačována cyklicky multiplikátorem. Vysokotlaký akumulátor udržuje v hydraulickém okruhu konstantní tlak a průtok vody.

Dále v okruhu následují filtry, které vodu zbavují nečistot, které by mohli poškodit trysku.

Následuje dýza, která ovlivňuje jak kvalitu paprsku samotného, tak i kvalitu řezu. Materiál dýzy se liší pro použití bez abraziva a s abrazivem, kde je třeba větší odolnost proti otěru. Při čistém vodním paprsku se používá rubín, safír nebo diamant. Při použití abraziva je nutné použít jako materiál dýzy karbid wolframu, kubického nitridu boru nebo keramických materiálů. Důležitým faktorem k ochraně a životnosti dýzy je kvalita a upravenost vody. Každý výrobce stroje si klade specifické požadavky, jak má být voda, používaná ve výrobě, upravena. Důležité je odstranění příměsí ve vodě, které mají tendenci se usazovat v dýze a tím zkracovat životnost jejího výrobního cyklu. [1, 2]



Obr. 14: Tryska pro čistý vodní paprsek [1]



Obr. 15: Různé typy trysky pro paprsek s abrazivem [1]

Jako poslední člen sestavy pro řezání vodním paprskem následuje po dýze lapač vody. Ten slouží v systému k zachycení energie vodního paprsku a jejího utlumení než paprsek dosáhne dna nádoby. Dále také zachytává třísky z obrábění a napomáhá tlumení hluku, který při obrábění vodním paprskem vzniká.

3.1.1 Typy paprsku

Podle toho, jakým disponujeme zařízením a jaké jsou jeho možnosti, můžeme rozlišit tři základní typy vodního paprsku:

- Pulzující paprsek, opakované krátké impulzy. Je použitelný pro vrtání, řezání, lámání hornin.
- Kontinuální paprsek, pracuje konstantní energií a tlakem, používá se pro dělení materiálu.
- Kavitační paprsek, kontinuální paprsek s obsahem kavitačních bublinek. [1]

3.2 Využití vodního paprsku

Vodní paprsek má takřka neomezené možnosti využití. Například:

- Chemický průmysl – dělení výbušných látek
- Jaderný průmysl – odstraňování vrstev a usazenin v zařízeních jaderných elektráren
- Stavebnictví – dělení plastů, betonu, kamene, dlažby, azbestu, čedičové vaty, keramiky
- Gumárenství – řezání plástů, gumy, vysoce pevných plastů jako např.: Kevlar
- Elektrotechnika – řezání feritů, keramiky, skla apod.
- Potravinářský průmysl – dělení ovoce a zeleniny, masa, sýrů apod. v syrovém i zmrzlém stavu

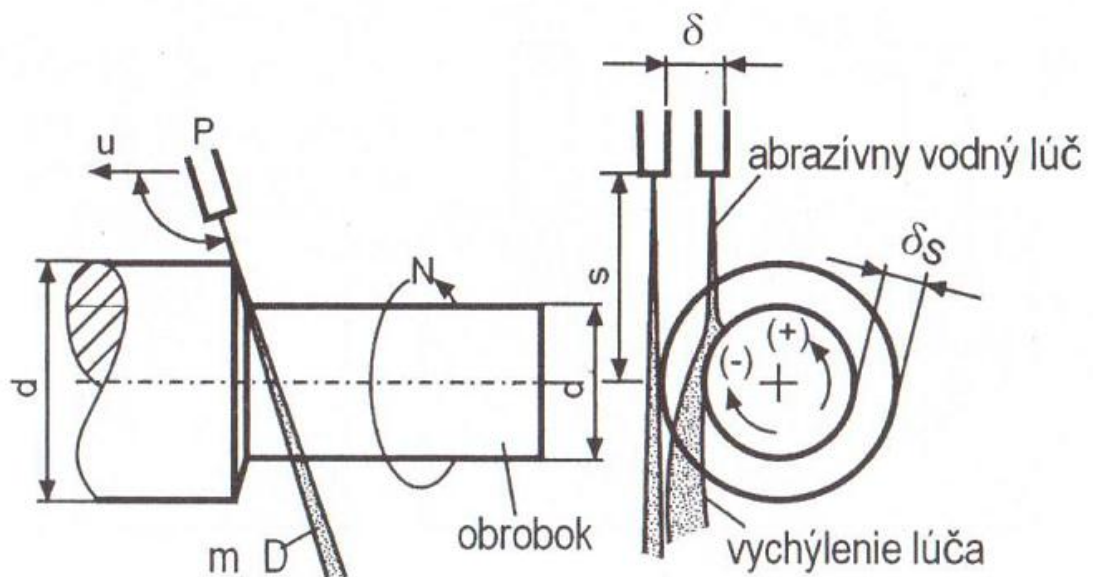
- Papírenský průmysl – folie, papír, buničina. Nevznikají elektrické výboje
- Sklářská výroba – dělení, vrtání skla, matování skla
- Obuvnický průmysl – řezání kůže (pravé i umělé), řezání plastů
- Strojírenství – dělení extrémně odolných a pevných materiálů, kompozitů, skla, výroba tvarově velmi složitých součástek [1]

3.3 Možnosti využití vodního paprsku

Kromě řezání a dělení materiálu se v poslední době začal vodní paprsek také používat k jiným aplikacím jako frézování, soustružení, vrtání, řezání závitů především pro těžkoobrobitelné materiály.

3.3.1 Soustružení

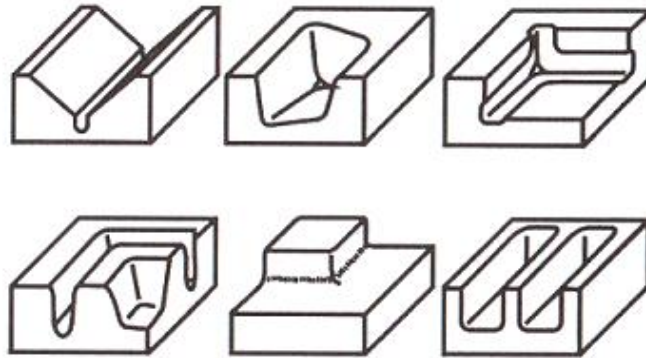
Obrobek rotuje a vodní paprsek (používá se s přidavkem abraziva) se posouvá ve směru osy obrobku. Materiál je ubírán posuvem paprsku radiálně k obrobku. [1]



Obr. 16: Soustružení vodním paprskem[1]

3.3.2 Frézování

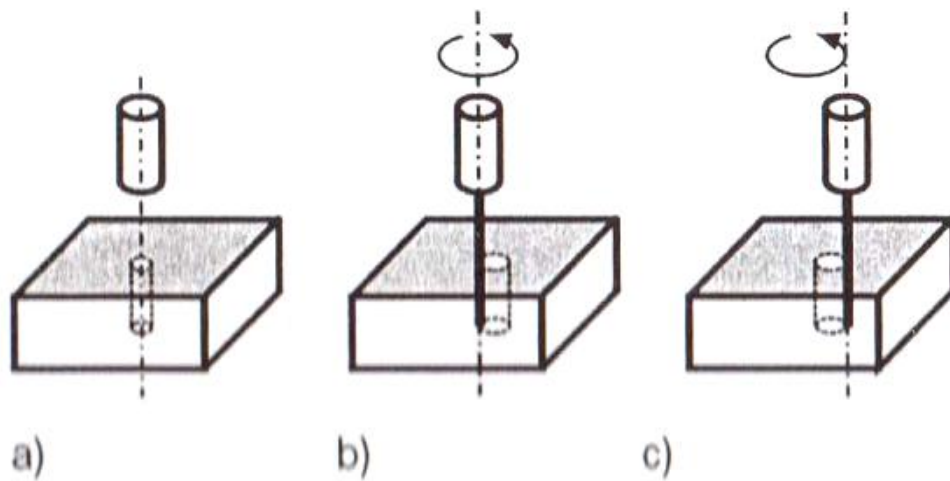
Při frézování dochází k řezání, ale nikoliv k dělení materiálu. Používá se pro tvarově složité díly. Paprsek se pohybuje po povrchu obráběné součásti několikrát za sebou a postupně vytváří tvar blízký konečnému vzhledu. S výhodou se toto frézování používá při výrobě tvářecích nástrojů. [1]



Obr. 17: Příklady frézování vodním paprskem [1]

3.3.3 Vrtání

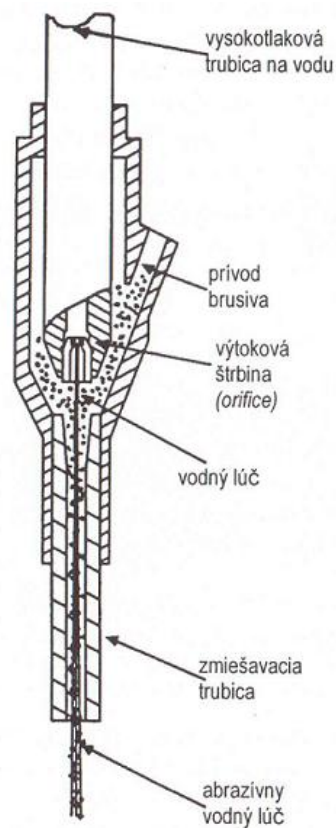
Používá se pro vrtání těžkoobrobitelných materiálů, kterými mohou být sklo, keramika, niklové slitiny apod. Je využíváno několik způsobů, vrtání se stacionárním obrobkem i paprskem, rotujícím nebo vibrujícím paprskem se stacionárním obrobkem. [1]



Obr. 18: Vrtání vodním paprskem [1]

a) Převrtávání, b) vyřezávání, c) frézování otvorů

Na obrábění vodním paprskem je používána dýza, která je schopna vyprodukovat vysokorychlostní paprsek s typickou rychlostí 300 – 600 m/s.



Obr. 19: Tryska pro obrábění vodním paprskem[1]

3.4 Výhody použití vodního paprsku

- Bezprašný proces
- Nízké ztráty materiálu přímo v řezu
- Jednoduchost obsluhy
- Ekologičnost
- Není třeba upnutí obrobku
- Flexibilita použití

3.5 Nevýhody použití vodního paprsku

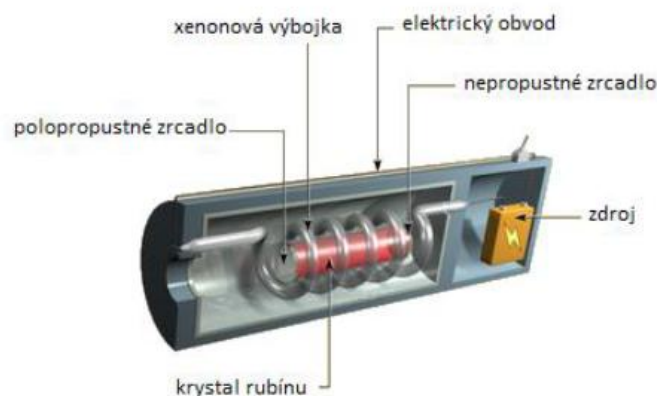
- Hlučnost
- Koroze materiálu
- Vysoké pořizovací náklady

4 OBRÁBĚNÍ LASEREM

V dnešní době patří laserové přístroje do běžného života, těžko si můžeme bez nich představit vědu a techniku. Můžeme tedy říci, že se stal nepostradatelným pomocníkem, který nám slouží téměř každý den, ať si to uvědomujeme nebo ne. Například při poslouchání hudby, práci na počítači nebo v u pokladny v podobě čtečky čárových kódů. [15, 19]

4.1 Historie laseru

Prvním tvůrcem laserového paprsku byl americký fyzik Theodore H. Maiman v americké společnosti Hughes Aircraft Company v roce 1960. Laser byl rubínový, tyčinka měla koncové plochy s vysokou přesností vybroušení a byly vyleštěny tak, aby tvořily soustavu dvou rovinných, rovnoběžných zrcadlových ploch. Obe dvě plochy byly postříbřeny, kdy na jedné straně byla silnější vrstva než na straně druhé. Laserový paprsek vyšlehl ven polopropustnou stěnou. Čerpání rubínového laseru se provádí světelným výbojem výkonné xenonové výbojky, která krystal obklopuje. Rubínový laser odpovídá červené barvě, protože vyzařuje na vlnové délce 0,6943 μm . [15, 18]



Obr. 20: Laser s rubínovým krystalem [15]

Vznikaly další výzkumy a práce různých typů laserů na popud Maimanova úspěchu, protože se prokázalo, že je možné vyvolat laserovou akci v jakémkoliv prostředí.

Po úspěchu rubínového laseru, který pracoval na tří-hladinovém principu, byly realizovány lasery s jinými krystaly, které byly založené na čtyř-hladinovém principu, protože snahou bylo zvětšovat účinnost laseru. Rubínový pracoval s velmi nízkou účinností, která nedosahovala ani 1%. Zvyšování výkonu probíhalo dvěma cestami. První cesta byla zkracování laserových pulzů. Druhá cesta vedla ke zvyšování celkové energie laseru. Charakteristic-

kým rysem vývoje laserů je různorodost typů laserů, jeho prostředí, způsobů čerpání a konstrukcí, kterými se zabývaly tisíce laboratoří na světě. [15]

Nejvýkonnější laser v České republice (Laser ELI-Extreme Light Infrastructure) má být v provozu v roce 2014. Projekt schválila Evropská komise a má stát sedm miliard korun. Laser má pomoci vědeckým oborům jako chemii, biologii, lékařství nebo také ve vývoji nových materiálů. Jeho výkon bude 20 miliard wattů. [1, 15]

4.2 Definice laseru a jeho vlastnosti

Název laseru vznikl z anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ což v českém překladu znamená „zesilování světla pomocí stimulované emise záření“. [15]

Světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Laserové světlo vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. Spontánní (samovolná) emise záření vzniká, když vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a při tom emitují kvantum světelného záření s frekvencí f , která se určí z rovnice:

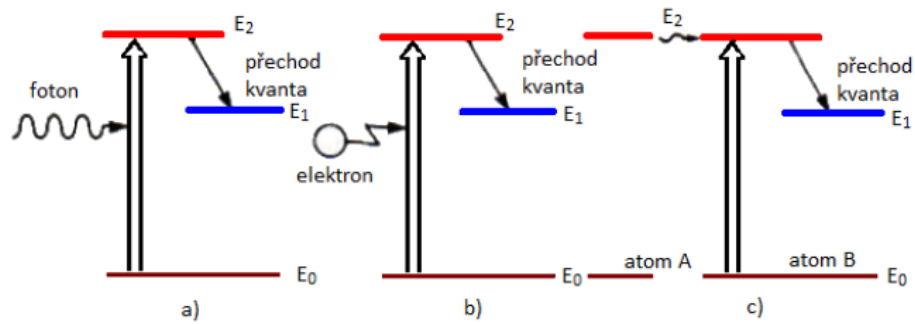
$$E_2 - E_1 = h \cdot f \quad (1)$$

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

Atom vybuzený na hladinu 2 může na této hladině setrvat určitou dobu. Energie excitovaného stavu (hladina 2) je vyzářena ve formě fotonu spontánního záření. Jestliže se však atom, který je v excitovaném stavu, dostane do interakce s fotonem záření o energii rovné energetickému rozdílu hladiny 2 a hladiny 1, může dojít ke stimulovanému vyzáření fotonu.

Stimulovaný foton má stejnou energii, směr, fázi a polarizaci s fotonem iniciačním. Spontánně vyzářený foton má náhodou fázi, polarizaci i směr šíření. To je zásadní rozdíl, kterým lze vyjádřit rozdíl mezi spontánním a stimulovaným zářením. [15]

Atom se nachází v základním stavu tehdy, pokud je při běžných podmínkách. Přechod elektronů ze základní hladiny na hladinu s vyšší energetickou hodnotou provází absorpce, naopak přechod z vyšší na nižší energetickou hladinu se nazývá emise, u které vzniká energie ve formě záření. Vybuzením lze atom přinutit k emisi záření. Při procesu čerpání jde o dodání příslušné energie na dosažení vybuzeného stavu. [14, 15]

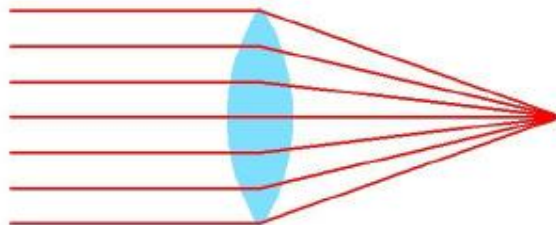


Obr. 21: Zdroje vybuzení atomů [1]

a) čerpání pomocí fotonů (rubínový laser) b) přímá excitace elektronů (argonový laser) c) vzájemná kolize atomů A a B (helium-neonový laser)

Vlastnosti laseru:

- je vysoce monochromatický tzn., že je jednobarevný (má jednu vlnovou délku). Díky monochromatickosti lze laserový paprsek soustředit do intenzivního úzkého bodového svazku.



Obr. 22: Zaostření laserového paprsku [1]

- má vysoký stupeň prostorové a časové koherence-tzn. že v prostorově koherentním prostředí kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku a v časově koherentním paprsku kmitají se stejnou fází všechny částice světelné vlny ve směru šíření paprsku.
- Laser má malou divergenci-kdy hodnota divergence je charakterizována poloviční hodnotou vrcholového úhlu kužele, který vystupuje z rovinného okýnka laseru s průměrem $2r_0$, vlnová délka laserového paprsku je λ_w . Divergence laserového paprsku je pak dána vztahem:

$$\Theta = \frac{\lambda_w}{\pi \cdot r_0}$$

(2)

- Má vysokou výstupní intenzitu I [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$], která není omezena zákony záření absolutně černého tělesa. Pro intenzitu záření laserového paprsku platí:

$$I = I_0 \cdot \exp(-2r^2 / r_0^2)$$

(3)

Kde I_0 je intenzita záření ve středu paprsku a r_0 je poloměr, ve kterém je intenzita redukována ze střední hodnoty faktorem e^2 . [15]

- Laser má módovou strukturu TEM – transverse electromagnetic mode – paprsek vytváří buď jednoduchou stopu – základní mód, anebo složitější obrazce. Tyto obrazce jsou buď pravoúhlé, nebo kruhově symetrické. Je to dané tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci – mód. Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití (řezání, svařování...).

Tento soubor vlastností je velmi důležitý pro fokusaci laserového paprsku. To znamená možnost soustředit do velmi malého bodu vysokou hustotu energie. Při dopadu této energie na materiál pak může dojít k natavení až odpaření materiálu. Tímto způsobem se pak dosahuje požadovaného efektu při zpracování. [15]. Srovnání různých energetických zdrojů je v tabulce 1.

Tab. 1: Hustota energie z různých zdrojů [1]

Zdroj energie	Hustota výkonu [$\text{W}\cdot\text{cm}^2$]
Slunce	$5\cdot 10^2$
Elektrický oblouk	$1\cdot 10^5$
Acetylen-kyslíkový plamen	$1\cdot 10^4$
Plasmový paprsek	$1\cdot 10^5$
Elektronový paprsek	$4\cdot 10^8$
CO ₂ laser cw	$1\cdot 10^9$
Nd laser pw	$1\cdot 10^{14}$

4.3 Druhy laserů a jejich dělení

Laserů je mnoho, a proto je nutné je členit. Základní rozdělení je podle skupenství materiálu, které se používá na generování záření. Jsou to:

1. Lasery v pevné fázi
2. Plynové lasery
3. Kapalinové lasery
4. Polovodičové lasery

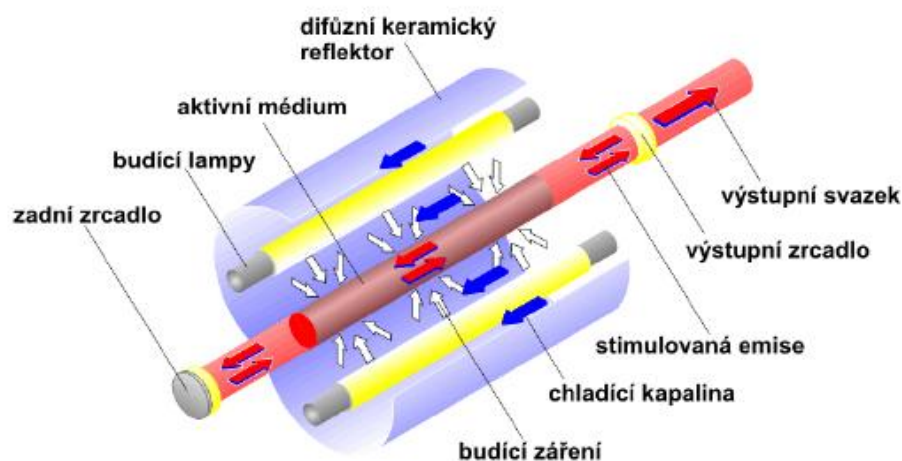
4.3.1 Lasery v pevné fázi

Prvním kvantovým generátorem světla byl rubínový laser. Později se objevilo mnoho dalších laserových materiálů. Rubín je však díky svým fyzikálním a mechanickým vlastnostem stále jedním z nejlepších materiálů pro lasery. [15]

Lasery v pevné fázi mají atomy pracovního prvku rozmístěny v krystalové mřížce pevné látky. K buzení využívají obvykle optické čerpání. Atom přechází na horní laserovou hladinu v důsledku pohlcení světla budících výbojek.

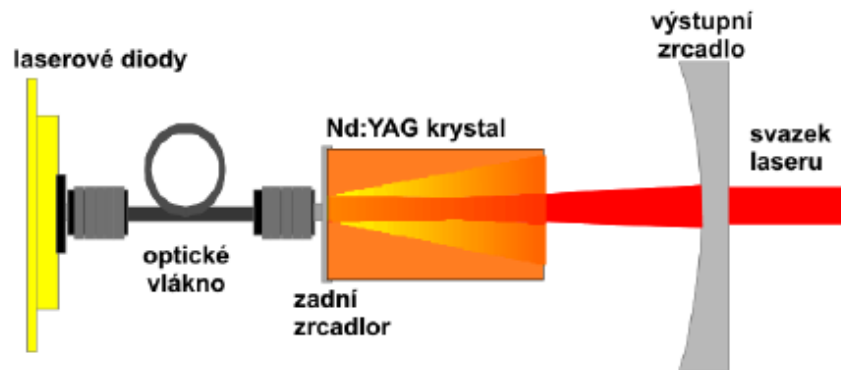
Nejrozšířenější a nejvyužívanější laser v pevné fázi je Nd-YAG laser, který se skládá z pevného Y₃Al₅O₁₂ (ytrium/hliník/kyslík) izometrického krystalu, který obsahuje asi 1%

iontů neodymu (Nd^{3+}). Tohoto typu laseru je na trhu nepřehledné množství, z nichž mnohé jsou použitelné pro průmyslové aplikace. Používají se Nd-YAG lasery buzené buď výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state) nebo laserovými diodami (DPSS – diode pumped solid state). Konstrukce LPSS Nd-YAG laseru je na obrázku 17. LPSS Nd:YAG lasery mají nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, neboť velká část energie výbojky se nevyužije a přemění se na teplo. Z toho důvodu je nutné chlazení. [15]



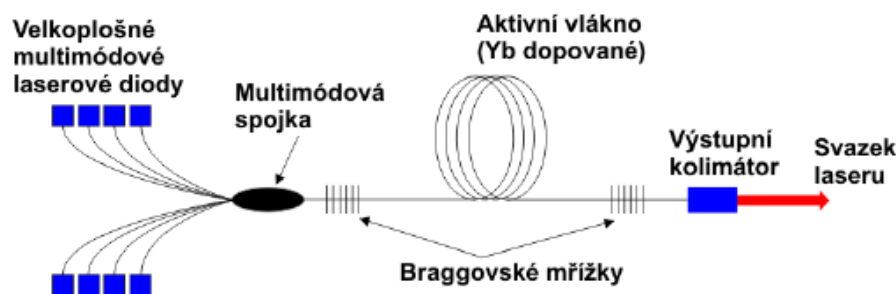
Obr. 23: LPSS Nd-YAG – laser buzený výbojkami [11]

LPSS Nd:YAG lasery používají zejména v pulzním režimu pro laserové svařování (aplikace s požadavkem hlubokého průvaru a malé teplotně ovlivněné zóny) a vrtání (např. v leteckém průmyslu pro vrtání ušlechtilých ocelí a slitin). Výhodou těchto laserů je vysoká energie v pulsu, kterou tyto aplikace vyžadují. Nevýhodou je nízká účinnost, velké nároky na chlazení, vysoké provozní náklady a krátká životnost výbojek. Oproti laserům buzených výbojkami je účinnější laser buzený diodami - DPSS Nd:YAG. Tyto lasery mají také lepší kvalitu svazku. DPSS Nd:YAG laser se používají hlavně v tzv. Q-spínaném pulzním režimu, kdy laser generuje velmi krátké pulsy v řádech ns a průměrný výkon se pohybuje do 100 W. Hlavní použití je pro značení a gravírování kovů, plastů a dalších materiálů. V porovnání s LPSS lasery je zde vyšší účinnost, delší životnost a menší nároky na chlazení. [15]



Obr. 24: DPSS Nd-YAG - laser buzený diodami [11]

Dalším rozšířeným laserem v pevné fázi je vláknový (fibre či fiber) laser. Je technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru. Aktivní prostředí je dlouhé optické vlákno dopované yterbiem. Buzení z laserových diod je vedeno přes optickou spojku do aktivního vlákna a namísto zrcadel jsou zde Braggovské mřížky, což jsou struktury vytvořené přímo na optickém vlákně. Záření je pak z vlákna „vyvázáno“ pomocí optického kolimátoru. [15]

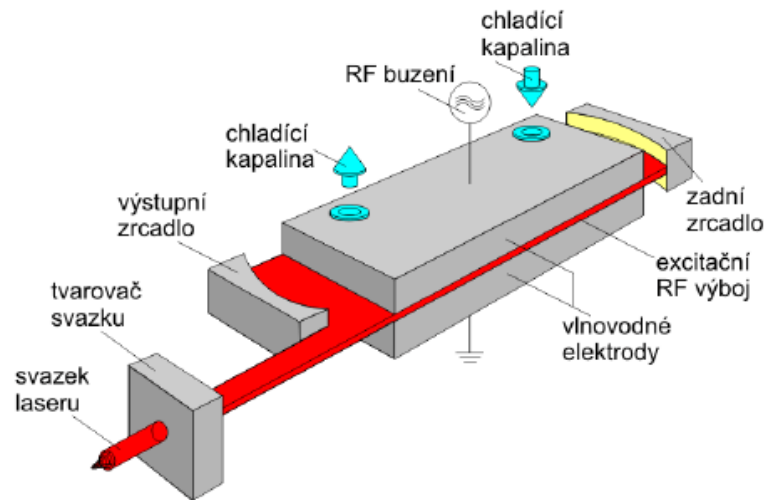


Obr. 25: Vláknový laser [11]

4.3.2 Plynové lasery

Z plynových laserů je nejpoužívanější laser na bázi molekuly CO_2 . Ostatní plynové lasery nemají dostatečný výkon kromě argonového laseru a excimetrových laserů. Argonový laser se používá ve fototechnice jako zdroj záření. Excimetrové lasery pracují v oblasti UV vlnových délek na bázi molekul. CO_2 lasery dosahují absolutně největších výkonů. [15]

Využití CO_2 laserů je pro značení, gravírování a řezání nekovů (plasty, kůže, papír, skla, apod.) Zde se používají výkony do 1,5 kW. Další průmyslovou aplikací je řezání a svařování kovů (výkony až do 20 kW), kde jsou CO_2 lasery zavedeny ve velkém množství.

Obr. 26: CO₂ laser [11]

4.3.3 Kapalinové lasery

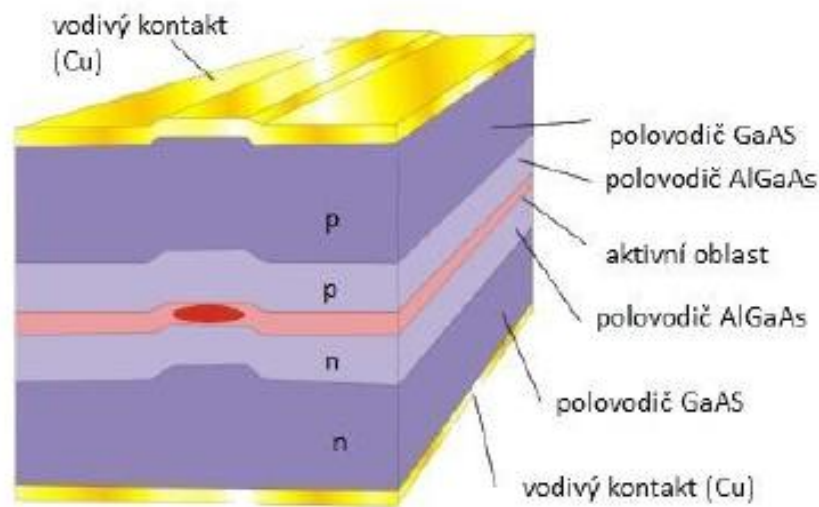
Kapalinové lasery mají řadu výhod, které vylepšují charakteristiky laserů. Jejich hlavní výhodou je velká optická homogenita při velké koncentraci aktivační příměsi. To umožňuje získat velkou hustotu indukovaného záření a značně zmenšit vnitřní ztráty v aktivní látce.

Kapalinové lasery lze rozdělit do dvou skupin. První tvoří lasery s anorganickými aktivními látkami a druhou lasery s organickými aktivními látkami. Hlavní nevýhodou, která brání rozšíření používání kapalinových laserů je jejich divergence. Je totiž o dva řády vyšší než u tuho fázových laserů. [15]

4.3.4 Polovodičové lasery

Pro použití polovodičů je typická miniaturizace a snížení energetické náročnosti. Výhodou je, že pro generaci koherentního záření stačí rezonátor o rozměrech několika desetin milimetrů. U polovodičových laserů je možnost plynulého přeladění frekvence záření v poměrně široké spektrální oblasti.

Aktivní prostředí polovodičových laserů se budí převodem elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Vlastnosti těchto pásů se upravují dopováním polovodičů vhodnými příměsemi. K buzení se nejčastěji využívá injektování proudu přes přechod PN polovodiče. Může se však použít i optické buzení. [15]



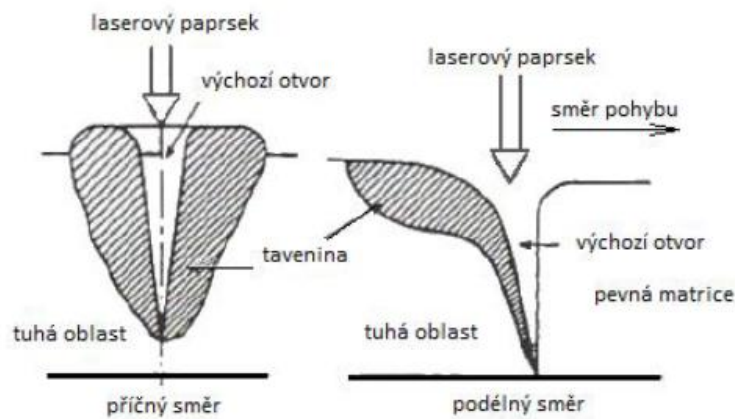
Obr. 27: Polovodičový laser [15]

4.4 Působení laseru na materiál

Při styku laserového paprsku s materiálem dochází k jejich vzájemné interakci a efektům, které jsou závislé na vlastnostech materiálů a jejich schopnostech pohlcovat a odrážet laserové záření.

Po dopadu paprsku na materiál se část intenzivního fokusovaného paprsku odrazí, část se absorbuje do materiálu a část projde skrz materiál. Absorbovaná část paprsku způsobuje ohřev materiálu, který se nataví a následně odpaří v dané oblasti působení laserového paprsku. V natavené zóně při odpařování částic materiálu vznikají poměrně vysoké tlaky a tavenina je vytlačována ze vznikajícího otvoru tlakem páry. V místě dopadu paprsku se následkem toho vytváří malý otvor a laserový paprsek může pronikat hlouběji do materiálu. [15]

Odrazivost paprsku je tak nežádoucí. Dá se snížit například zdrsněním povrchu, vytvořením krycí nekovové vrstvy nebo ohřevem materiálu. Se zvyšováním teploty povrchu materiálu tedy odrazivost klesá a minimální hodnoty dosahuje při dosažení teploty tavení materiálu. [15]



Obr. 28: Působení laseru na materiál [1]

V závislosti na použité technologii obrábění (vrtání, řezání, hloubení...), tepelně ovlivněná zóna může být dvojrozměrná nebo trojrozměrná.

Řezání laserem se charakterizuje jako ustálený proces, při kterém se tepelně ovlivněná zóna tvoří pouze na stěnách řezu. Vrtání pomocí laseru se charakterizuje jako proces nestacionární, protože čelo eroze se pohybuje s ohledem na pevný laserový paprsek a tepelně ovlivněná zóna se tvoří na stěně otvoru. [15]

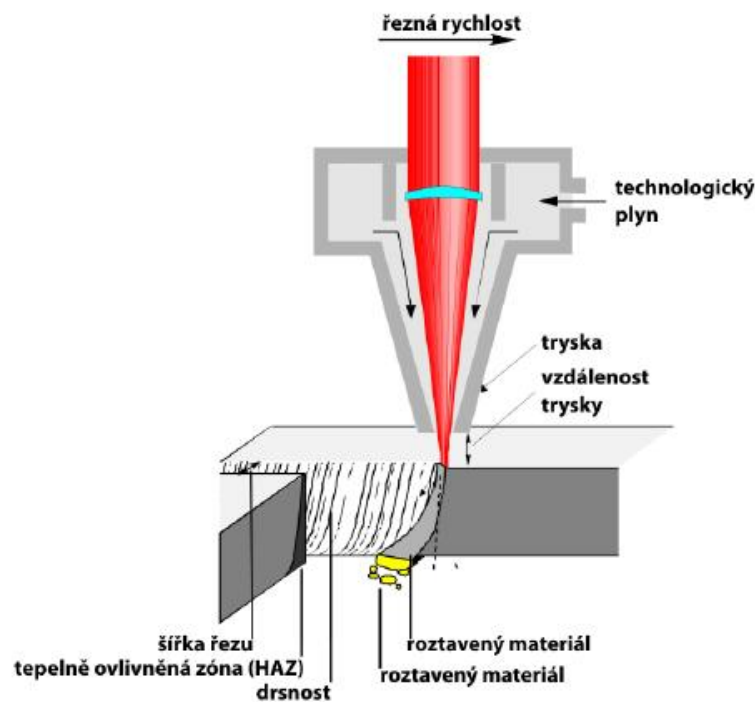
4.5 Aplikace laserového paprsku pro opracování materiálů

Díky možnosti zaměřit laserový paprsek do velmi malé plošky, umožňuje laser kvalitním způsobem opracovávat materiál. Využívá se toho v řadě nejen strojírenských aplikací. Nejdůležitější oblasti použití laserového paprsku ve strojírenství jsou shrnuty v následujících odstavcích. [15]

4.5.1 Řezání laserovým paprskem

Podle způsobu řezání se rozlišuje tavné řezání a spalovací řezání. Při tavném laserovém řezání je laserovým paprskem roztavená látka odfukována z místa řezu inertním plynem. Nejčastěji používaným inertním plynem je argon nebo dusík. Tento postup se hodí především pro řezání kovů, které mají teplotu tání nižší než teplotu, při které hoří. To znamená pro vysoce legované oceli, hliníkové slitiny, polovodičové materiály, plasty, keramické materiály... [15]

Při spalovacím laserovém řezání zahřívá laserový paprsek materiál na zápalnou teplotu. Materiál se spaluje v proudu přiváděného kyslíku, který zároveň odfukuje vznikající oxidy. Pomocí laserových zařízení s vodním chlazením lze obrábět například součástky, které jsou citlivé na poškození teplem. Řezací hlavice může být umístěna ve větší vzdálenosti nad řezaným materiálem, což umožňuje trojrozměrné řezání. [15]



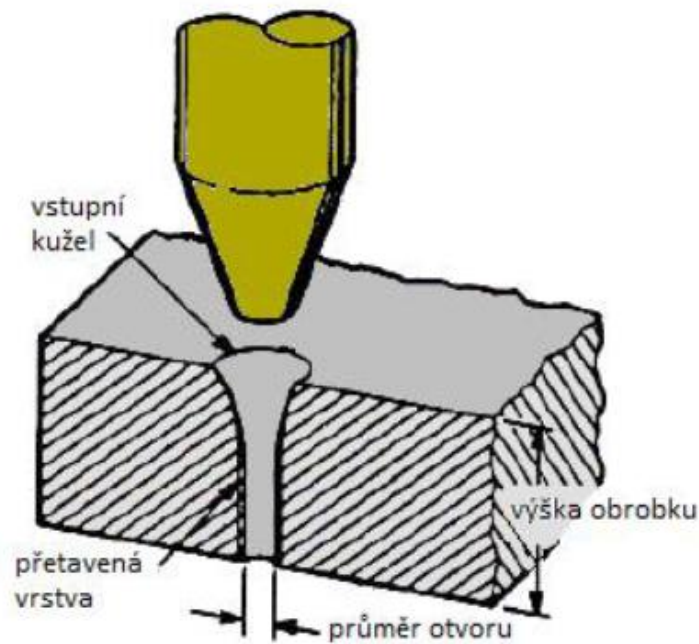
Obr. 29: Řezání materiálu laserem [15]

Při řezání laserem se dosahuje velké rozměrové i tvarové přesnosti a dobré jakosti řezných ploch. [15]

4.5.2 Vrtání laserem

Při vrtání zahřívá paprsek laseru materiál rychlostí 10^{10} °C/s. Materiál se odpaří a umožňuje tak průnik paprsku hlouběji. V průběhu vrtání se natavovaný materiál akumuluje v otvoru, vlivem eroze částic se rozstříkuje po stěnách otvoru. Tlak v otvoru dosahuje hodnot kolem $103 \div 104$ MPa a způsobí, že proud natavovaného kovu proudí ven z otvoru rychlostí ultrazvuku.

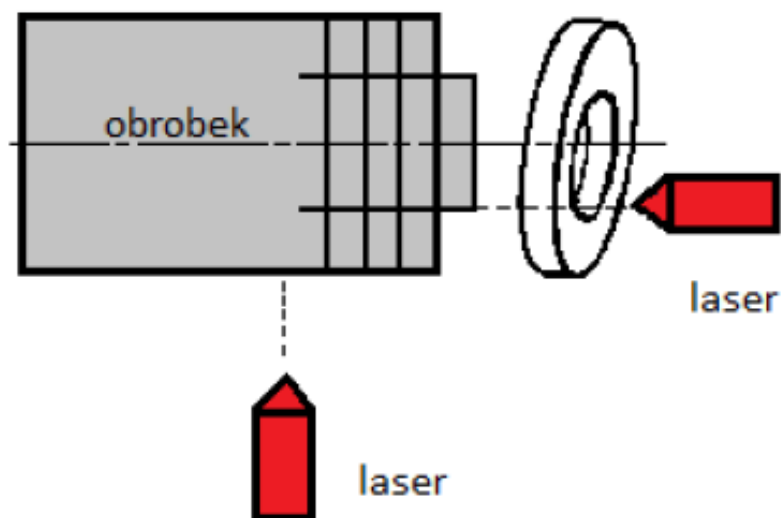
Při vrtání se používá postup „ablation“. To znamená postupné rychlé odstraňování materiálu z řezu bez jeho ohřátí nad odpařovací teplotu. Pouze malá část materiálu, která se nachází uprostřed laserového paprsku je odpařena. Materiál se tedy při vrtání odstraňuje především ve formě kapaliny a pouze malá část také odpařováním. [15]



Obr. 30: Typický tvar laserem vrtaného otvoru [1]

4.5.3 Soustružení laserem

Výhodou laserové soustružení je absence mechanického namáhání obrobku. Na obráběný materiál působí pouze laserový paprsek. Díky tomu nedochází ke chvění obrobku vlivem nástroje. Další výhodou oproti konvenčnímu soustružení je možnost obrábět těžkoobrobitelné materiály. Nevýhodou je však menší úběr materiálu. Laserem lze také soustružit trojrozměrně. Používají se k tomu dva paprsky laseru, které obrábí současně. Jeden paprsek je kolmý na osu rotace obrobku a druhý je s ní rovnoběžný. Takto se dá soustružit mezikruží. [15]



Obr. 31: Soustružení laserem[1]

4.5.4 Mikroobrábění laserem

Na mikroobrábění se používají excimerové lasery a Nd-YAG lasery. S pulzním režimem paprsku s ultrakrátkým trváním jednoho impulsu. Využívá se obvykle na opracování elektronických součástek či označování výrobků. [15]

4.5.5 Dokončování povrchů laserem

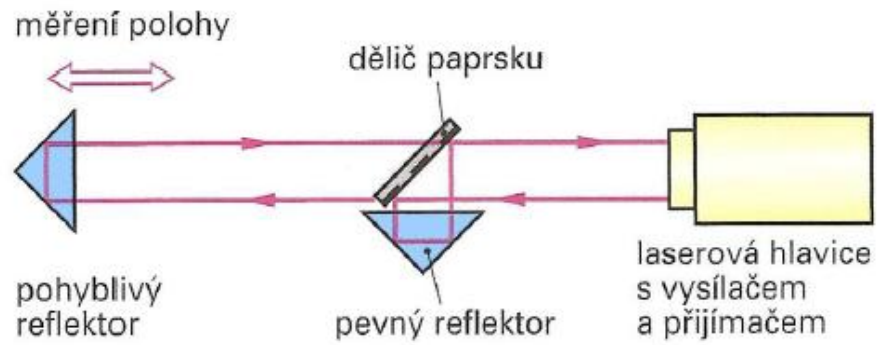
Dokončování povrchu pomocí laseru funguje na principu tangenciálního směřování paprsku na rotačně pohybující se materiál. Dochází tak k zahlazování mikronerovností po předcházející operaci. K úběru materiálu dochází buď odpařením, nebo natavením a následným odstraněním taveniny pomocí proudícího plynu. [15]

4.5.6 Další aplikace laseru ve strojírenství

Další oblastí, kde se laser hojně využívá je svařování materiálů. Hloubka svaru závisí na svařovaném materiálu, výkonu laseru, průměru jeho paprsku a na rychlosti posuvu. Svařovat lze všechny svařitelné materiály. Výhodou jsou malé tepelné deformace svařovaných dílů, možnost automatizace, či velká pevnost svaru. Nevýhodou pak vysoké investiční i provozní náklady. [15]

Laserové přístroje se také používají v metrologii. Pro kontrolu nastavení polohy souřadnicových strojů se používají laserové interferometry. Ten dělí vysílaný laserový paprsek po-

lopropustným zrcadlem na měřící paprsek, který směřuje k reflektoru (umístěn na pohyblivé části stroje, jehož vzdálenost se měří) a na porovnávací paprsek, který se přes pevný hranolový reflektor a polopropustné zrcadlo vrací do přijímače měřící hlavičky. [15]



Obr. 32: Laserový interferometr [15]

5 CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

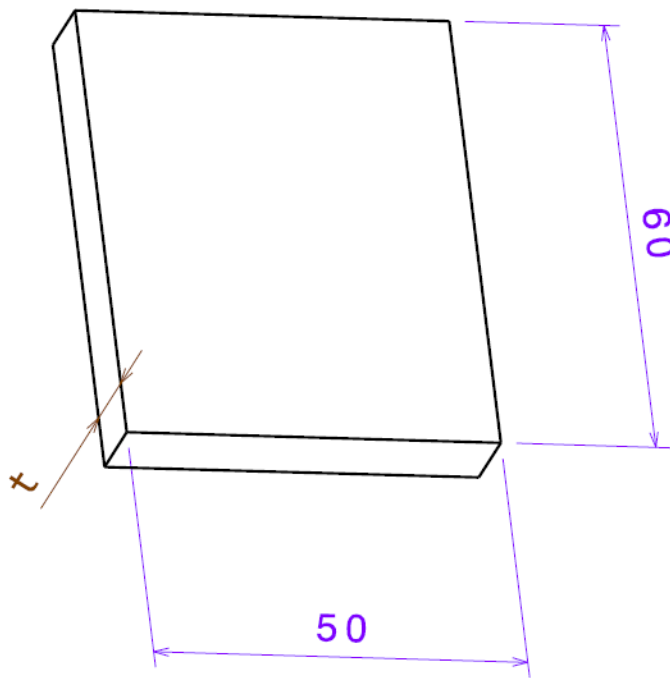
V návaznosti na literární rešerši bude provedeno:

- Výroba vzorků ve firmě MRB Sazovice
- Měření drsnosti povrchu na všech vzorcích ve třech různých rovinách
- Zkoumání povrchu plochy řezu po zvětšení
- Měření rozměrů výrobku ve dvou rovinách pro zjištění kuželovitosti
- Měření výrobku v jedné rovině pro zjištění rozměrové přesnosti
- Vyhodnocení jednotlivých veličin v závislosti na tloušťku a materiál obrobku
- Porovnání obou technologií

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 VZORKY POUŽITÉ K EXPERIMENTU A VYHODNOCOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Pro měření bylo třeba nejprve vyrobit vzorky. Vzorky z tabulí různých tloušťek a různých materiálů byly vyrobeny ve firmě MRB Sazovice. Vždy ze stejné tloušťky a materiálu bylo vyroben jeden vzorek pomocí laseru a jeden pomocí vodního paprsku. Vzorky jsou vyrobeny v rozměrech 60x50 mm v různých tloušťkách.



Obr. 33: Rozměry vzorku

6.1 Materiál vzorků

Vzorky byly vyrobeny ze dvou druhů materiálu. První z nich byla klasická konstrukční ocel 11 375, kde byly použity tabule o tloušťkách 20, 10 a 1,5 mm. Druhý materiál byl dural, ze kterého jsou vyrobeny vzorky tloušťek 5 a 10 mm.

6.1.1 Ocel 11 375

Jedná se o typ tzv. „neušlechtilé“ oceli s obsahem uhlíku do 0,19 % a dalších prvků jako mangan, dusík, fosfor, síra, která je vhodná ke svařování. Lze z ní vyrábět dílce z plechů, duté profily podélně svařované, kované součásti pro tepelná zařízení, tlakové nádoby, které pracují s malým přetlakem a teplotou do 300 °C. Dále je možno vyrábět klasické strojní

součásti namáhané dynamicky a staticky. Konkrétnější výrobky jsou například vrata plavidlových komor, kulové uzávěry, spojky a podvozky vagonů apod.

6.1.2 Dural ČSN 42 4203 (AlCu4Mg1)

Konstrukční materiál vhodný pro všeobecné použití. Dobrá mechanická pevnost, malá těžnost, dá se dobře obrábět třískovým způsobem. Nevykazuje dobrou odolnost proti korozi. Možnost tváření je velmi dobrá za tepla i za studena, rovněž svařitelnost je dobrá, ovšem pouze při odporovém bodovém svařování. Používá se pro díly letadel a automobilů, nýty a šrouby. Dodává se ve formě plechů, pásů, pruhů, kotoučů, drátů apod. [17]

6.2 Zařízení pro výrobu vzorků

Obě technologie výroby, tedy laser i vodní paprsek mi byly k dispozici ve firmě MRB Sazovice. Pro výrobu vzorků na obou zařízeních byly použity řezné podmínky, které má firma optimalizované pro dané tloušťky a druhy materiálu.

6.2.1 Laser

Vzorky, vyrobené laserem, byly vyráběny na stroji značky TRUMPF. Stroj je schopen vyprodukovat výkon až 5 kW. Tento stroj se používá k „vypalování“ výrobků různých, i velmi složitých, tvarů z rovinných plechových tabulí. Lze na něm řezat výrobky z tabulí o rozměrech 3000x1500 mm. Zdrojem laserového záření třídy 4 je integrovaný CO₂ laser. Chladicím médiem celého zařízení je voda a jako řezné plyny jsou využívány kyslík a dusík. Frekvence impulsu laseru je 100 Hz – 100 kHz. Maximální tloušťka plechu se pohybuje u oceli do 25 mm, u nerezavějící oceli do 20 mm a u duralu do 12 mm. Zařízení pracuje s přesností až 0,1 mm. Řezným plynem byl kyslík. Při řezání velmi tenkých materiálů je možno použít též vzduch. Řezné rychlosti a použité výkony jsou uvedeny v tabulce.

Tab. 2: Řezné podmínky pro řezání laserem

Vzorek	řezná rychlost [m/min]	Řezný výkon [W]
Ocel 20 mm	0,65	3000
Ocel 10 mm	1,8	3000
Ocel 1,5 mm	6,4	1100
Dural 10 mm	0,4	3000
Dural 5 mm	2,3	3000



Obr. 34: Laserový řezací stroj TRUMPF



Obr. 35: Řezná tryska laseru

6.2.2 Vodní paprsek

Vzorky byly vyrobeny na stroji od firmy PTV. Stroj může pracovat s tlaky kapaliny v rozmezí 500 – 4100 bar, záleží na druhu zpracovávaného materiálu. Na stroji je možné zpracovávat formát materiálu až 2000x3000 mm. Tloušťka materiálu se může pohybovat až do 120 mm, tato tloušťka ovšem závisí na druhu materiálu. Stroj je ve firmě využíván k řezání různých druhů materiálů. Především je využíván ke zpracování materiálů, které není možné zpracovávat laserovým paprskem. Stroj dosahuje přesnosti až 0,1 mm. Na zařízení je používána diamantová řezací hlava o průměru 0,013“ s abrazivní tryskou o průměru 1 mm. Pro každý materiál a jeho tloušťku je volena jiná řezná rychlost. Tyto rychlosti jsou uvedeny v tabulce. Tlak vody byl 4100 bar. Jako brusivo byl použit materiál gmrđ 80 ma-sh.

Tab. 3: Řezné rychlosti pro řezání vodním paprskem

Vzorek	řezná rychlost [mm/min]
Ocel 20 mm	68
Ocel 10 mm	150
Ocel 1,5 mm	1250
Dural 10 mm	250
Dural 5 mm	520



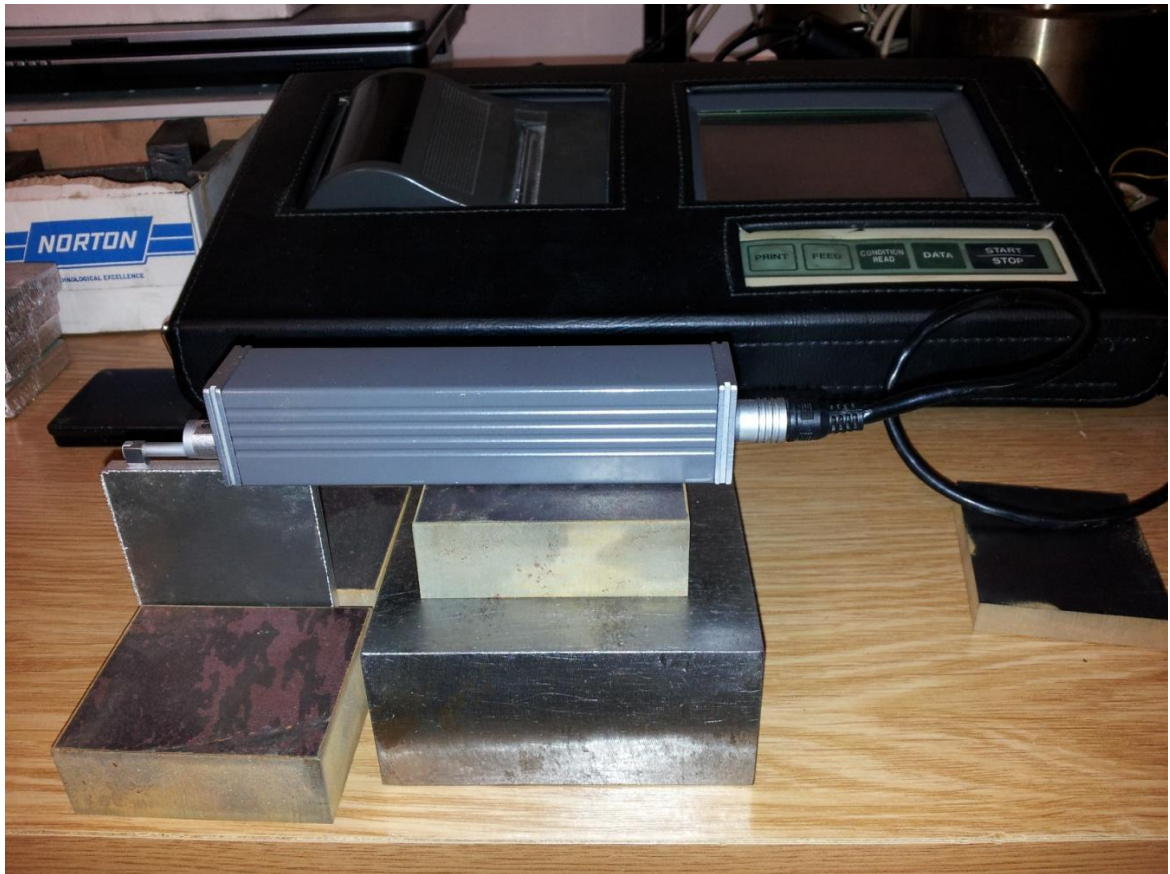
Obr. 36: Zařízení pro řezání vodním paprskem

6.3 Měřicí a vyhodnocovací zařízení

Celé měření proběhlo ve školních dílnách na školních přístrojích.

6.3.1 Měření drsnosti povrchu

Drsnost povrchu jsem měřil na dílenském drsnoměru firmy Mitutoyo – Surf-test SJ 301. Měřil jsem hodnoty drsnosti R_a . Přístroj měří s rozlišením $0,01 \mu\text{m}$. Na přístroji je možné také měřit další veličiny, týkající se drsnosti povrchu. Podle druhu měřeného povrchu lze také měnit posuv měřicího hrotu. Profil měřeného povrchu je na displeji zobrazen také graficky a je možné si jej přímo na přístroji vytisknout.



Obr. 37: Dílenský drsnoměr Mitutoyo SJ 301

6.3.2 Měření kuželovitosti řezu

Rozměry kuželovitosti byly měřeny třmenovým mikrometrem od firmy Mitutoyo. Přístroj má rozlišitelnost 0,01 mm a měřicí rozsah se pohybuje mezi 25-50 mm.



Obr. 38: Třmenový mikrometr Mitutoyo

6.3.3 Měření rozměrů

Měření rozměrů pro srovnání rozměrové přesnosti bylo provedeno digitálním posuvným měřidlem značky Mitutoyo s rozlišitelností 0,01 mm a rozsahem měřidla 0 – 150 mm. Přesnost měřidla je +/- 0,02 mm.



Obr. 39: Posuvné měřidlo Mitutoyo

6.3.4 Hodnocení kvality povrchu

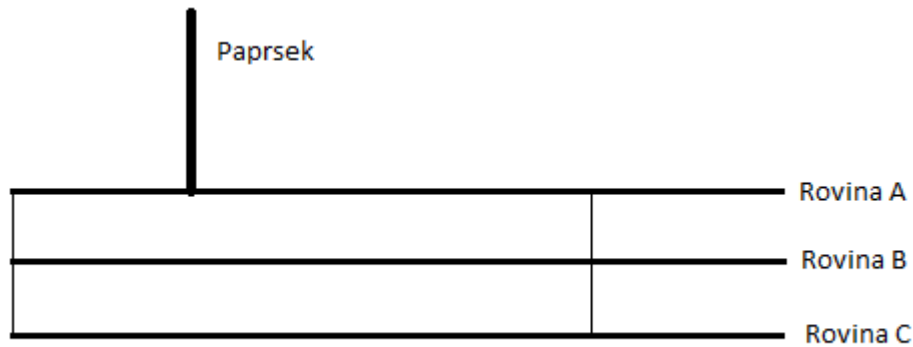
Povrch byl snímán pomocí digitální snímací USB kamery ProScope HR. Byly použity snímací hlavy zobrazující se zvětšením 30x, 100x a 400x. Jedná se o zařízení velmi pohodlné, ale přitom dostačující pro naši aplikaci. Zařízení je ruční, přiloží se na zkoumaný povrch, následuje ruční zaostření a po ustálení obrazu dojde pouze stisknutím tlačítka k uložení aktuálního obrazu do formátu JPG. Podle aktuálně vložené snímací hlavy dochází ke zvětšení zkoumaného povrchu 30x, 100x nebo 400x. Každá ze snímacích hlav má možnost diodového přisvícení povrchu.



Obr. 40: Snímací kamera ProScope HR

7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

U každého vzorku, vyjma vzorku tloušťky 1,5 mm, 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.



Obr. 41: Roviny měření drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty byly zapsány v programu Microsoft Excel a následně zpracovány v programu Minitab 16, ve kterém byly data testovány na vychýlené hodnoty box plotovým grafem, a na konec byl aplikován graf na interval spolehlivosti 95 %.

Při zpracování výsledků byly použity vzorce:

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

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

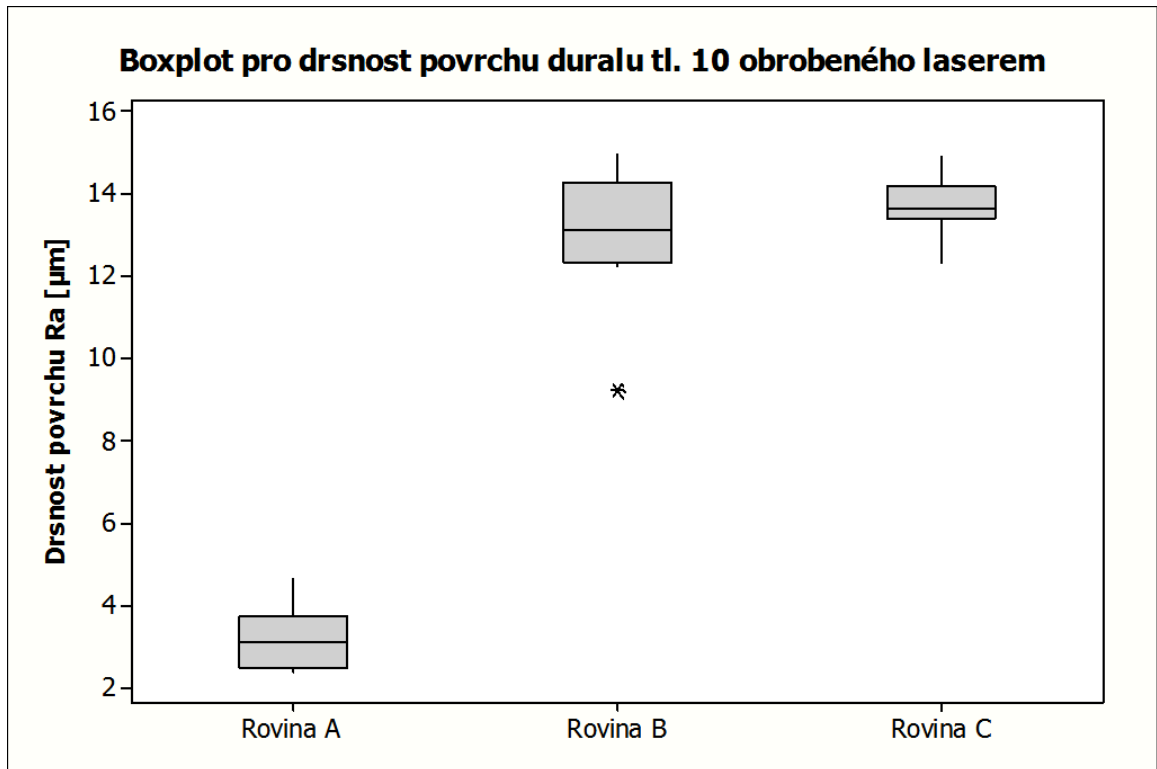
$$\text{Variační koeficient: } V_x = \frac{s}{\bar{x}}$$

7.1 Vyhodnocení drsnosti povrchu u vzorků vyrobených laserem

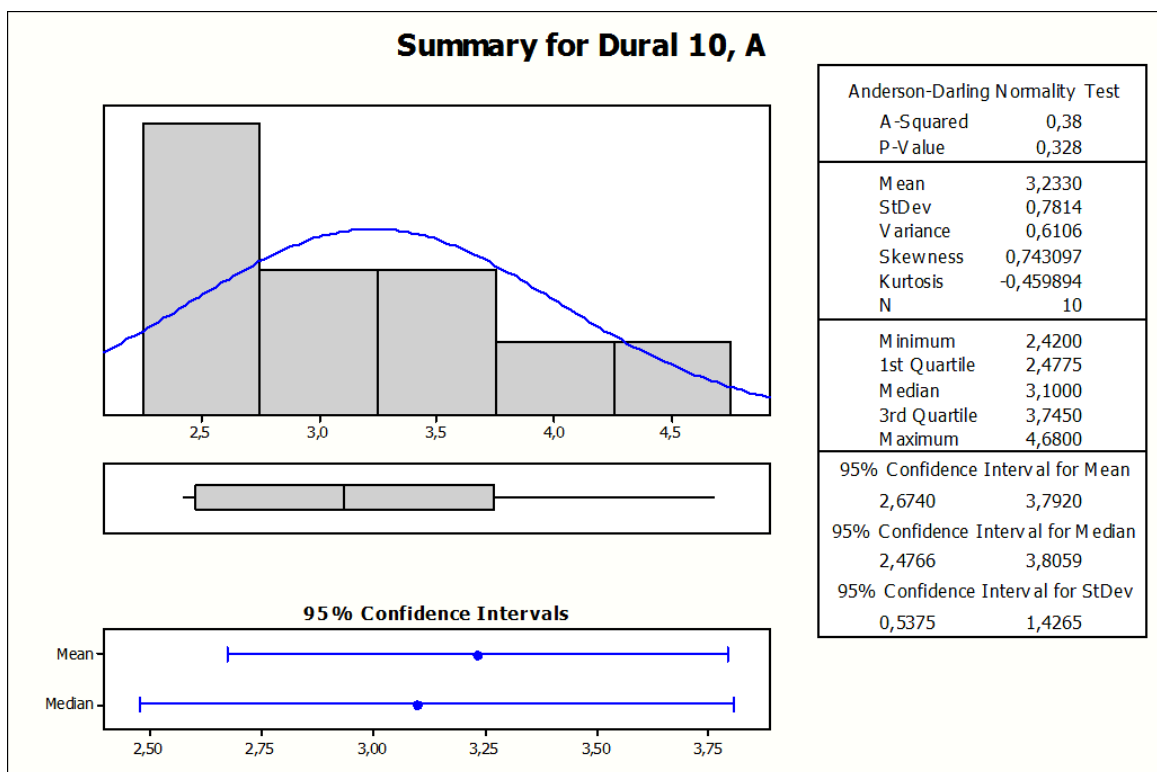
7.1.1 Dural tloušťky 10 mm

Tab. 4: Hodnoty drsnosti pro dural tl. 10 mm

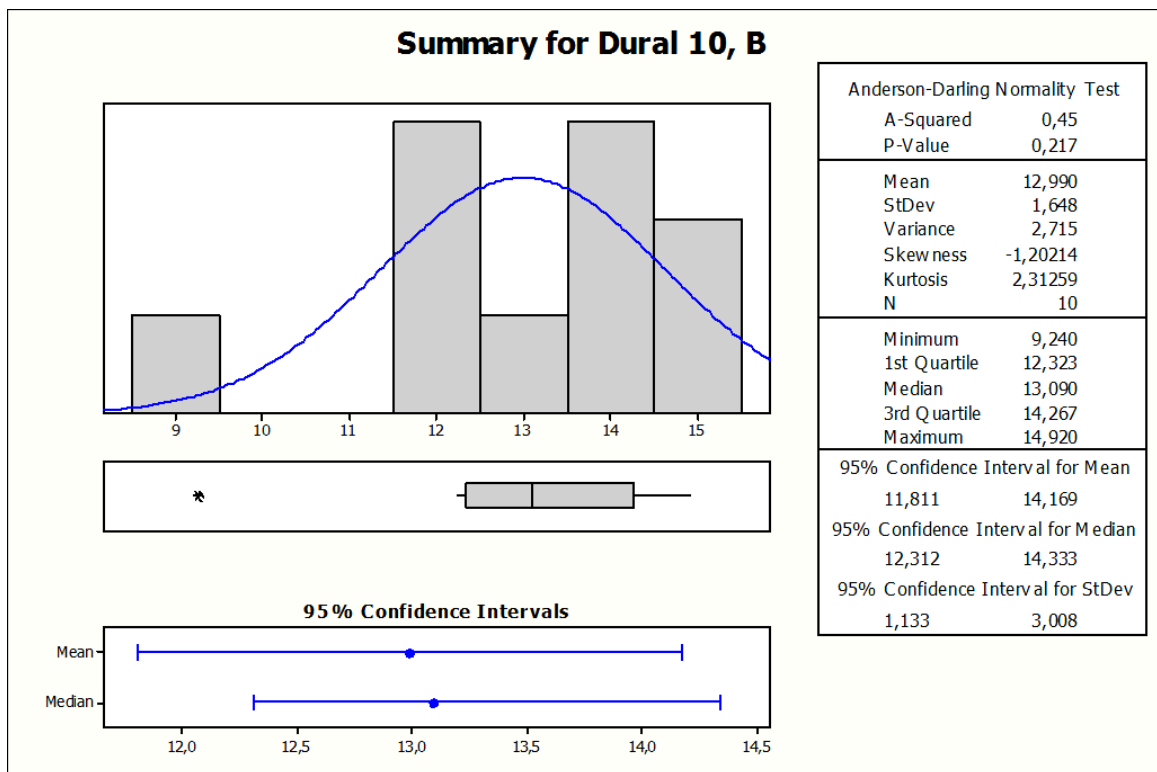
DURAL, tloušťka 10 mm, rovina A, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	3,57	3,23	0,34	0,1136	0,6106	0,1889
2	4,68		1,45	2,0938		
3	3,58		0,35	0,1204		
4	4,24		1,01	1,0140		
5	2,47		-0,76	0,5822		
6	2,42		-0,81	0,6610		
7	2,48		-0,75	0,5670		
8	3,02		-0,21	0,0454		
9	2,69		-0,54	0,2948		
10	3,18		-0,05	0,0028		
DURAL, tloušťka 10 mm, rovina B, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	12,63	12,99	-0,36	0,1296	2,7153	0,2090
2	14,92		1,93	3,7249		
3	13,65		0,66	0,4356		
4	14,80		1,81	3,2761		
5	14,09		1,10	1,2100		
6	13,55		0,56	0,3136		
7	12,35		-0,64	0,4096		
8	12,24		-0,75	0,5625		
9	9,24		-3,75	14,0625		
10	12,43		-0,56	0,3136		
DURAL, tloušťka 10 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	13,86	13,70	0,16	0,0266	0,5032	0,0367
2	13,45		-0,25	0,0610		
3	13,51		-0,19	0,0350		
4	14,54		0,84	0,7106		
5	13,17		-0,53	0,2777		
6	14,87		1,17	1,3759		
7	12,31		-1,39	1,9238		
8	13,65		-0,05	0,0022		
9	14,02		0,32	0,1043		
10	13,59		-0,11	0,0114		



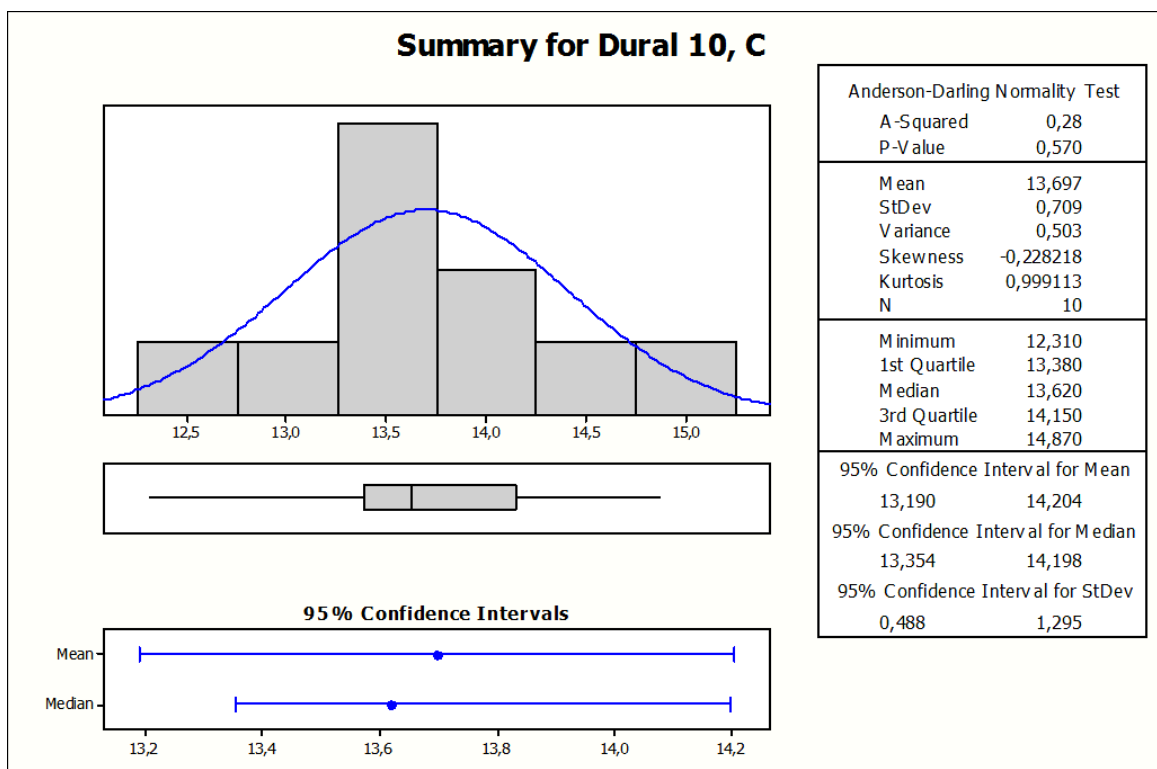
Obr. 42: Boxplot pro drsnost povrchu duralu tl. 10 mm, obrobeneho laserem



Obr. 43: Sumar vrsledku pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině A



Obr. 44: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině B

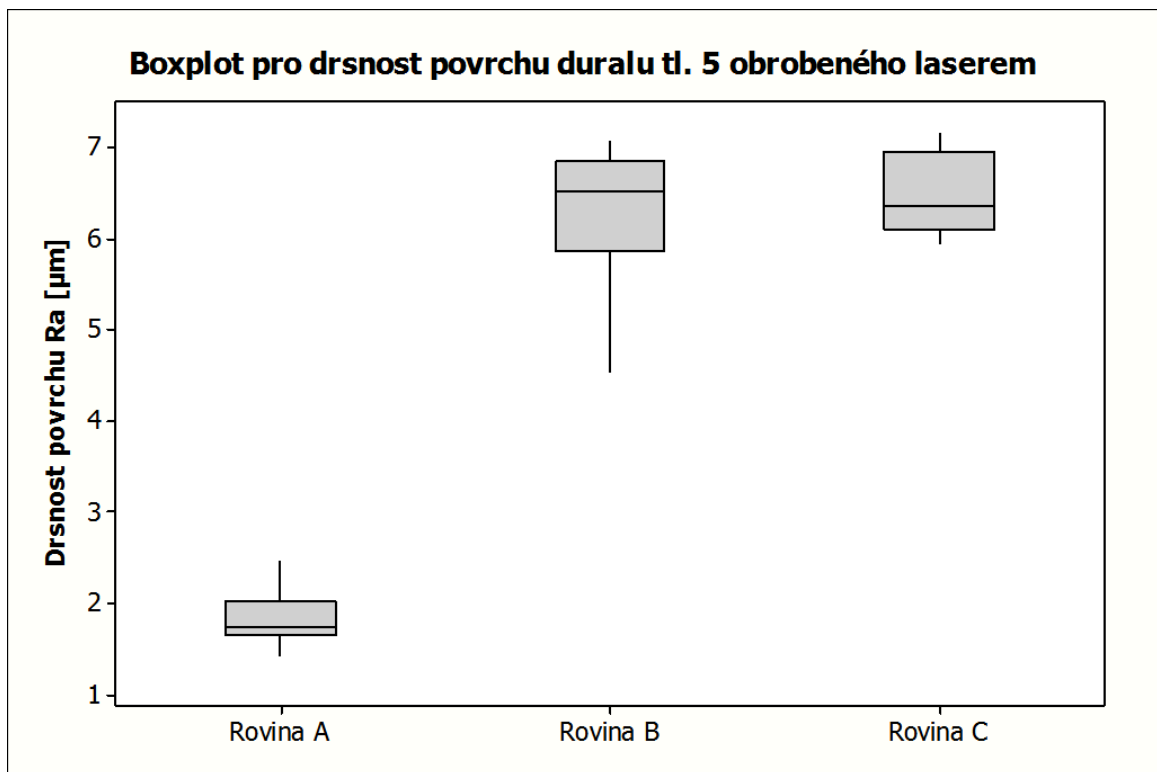


Obr. 45: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině C

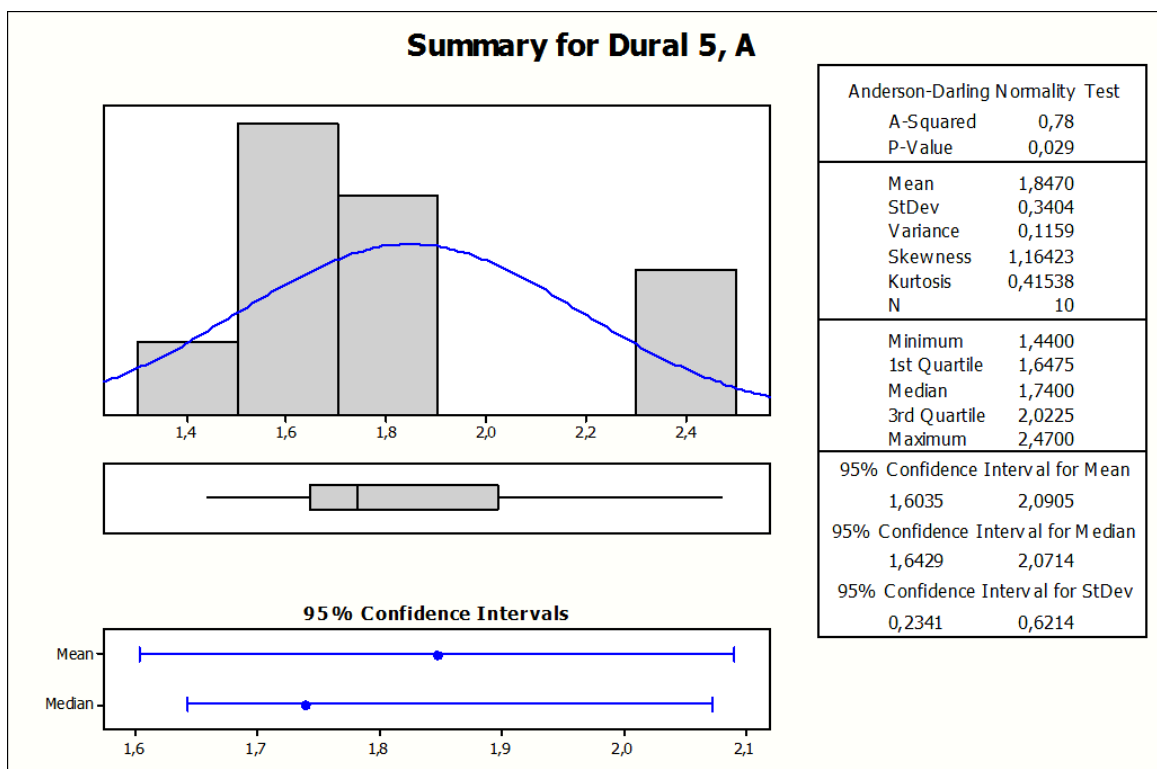
7.1.2 Dural tloušťky 5 mm

Tab. 5: Hodnoty drsnosti pro dural tl. 5 mm

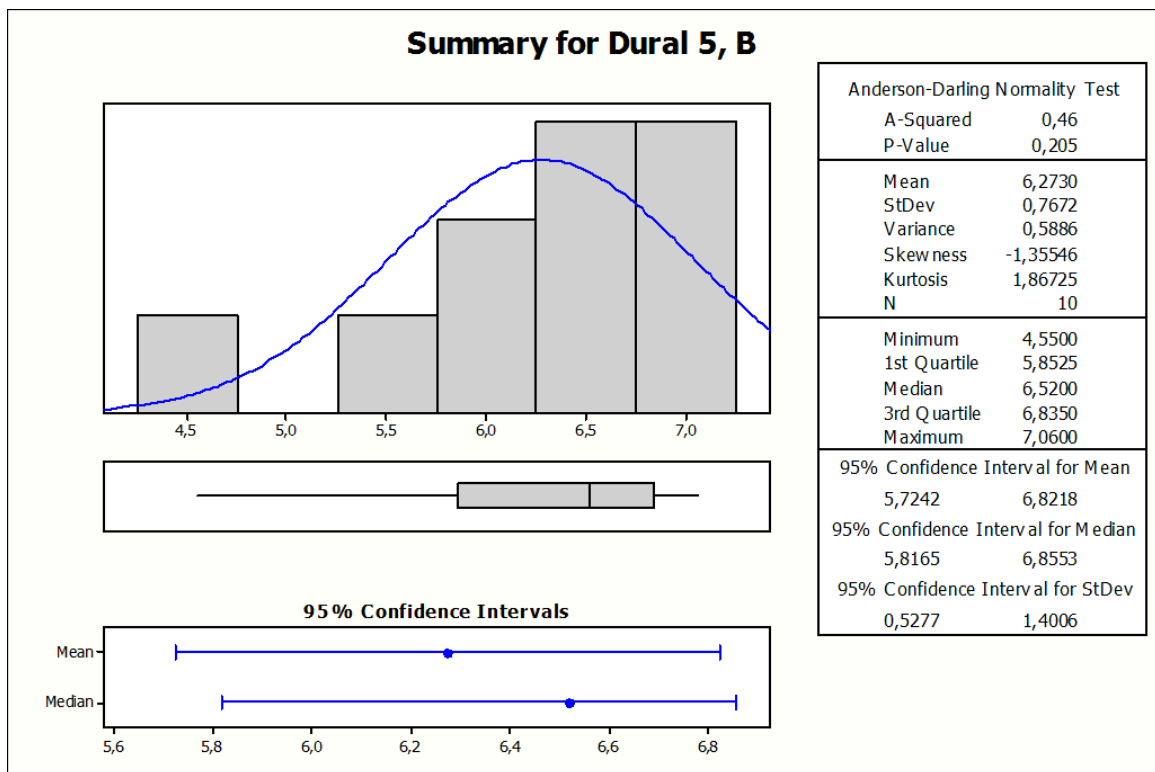
DURAL, tloušťka 5 mm, rovina A, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	1,66	1,85	-0,19	0,0350	0,1159	0,0627
2	2,42		0,57	0,3283		
3	1,44		-0,41	0,1656		
4	1,66		-0,19	0,0350		
5	1,84		-0,01	0,0000		
6	1,61		-0,24	0,0562		
7	2,47		0,62	0,3881		
8	1,81		-0,04	0,0014		
9	1,67		-0,18	0,0313		
10	1,89		0,04	0,0018		
DURAL, tloušťka 5 mm, rovina B, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	6,64	6,27	0,37	0,1347	0,5886	0,0938
2	7,00		0,73	0,5285		
3	6,40		0,13	0,0161		
4	6,78		0,51	0,2570		
5	7,06		0,79	0,6194		
6	6,14		-0,13	0,0177		
7	6,65		0,38	0,1421		
8	4,55		-1,72	2,9687		
9	5,95		-0,32	0,1043		
10	5,56		-0,71	0,5084		
DURAL, tloušťka 5 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	5,99	6,49	-0,50	0,2510	0,1959	0,0302
2	5,95		-0,54	0,2927		
3	6,13		-0,36	0,1303		
4	6,25		-0,24	0,0581		
5	7,02		0,53	0,2798		
6	6,35		-0,14	0,0199		
7	6,94		0,45	0,2016		
8	6,75		0,26	0,0671		
9	6,37		-0,12	0,0146		
10	7,16		0,67	0,4476		



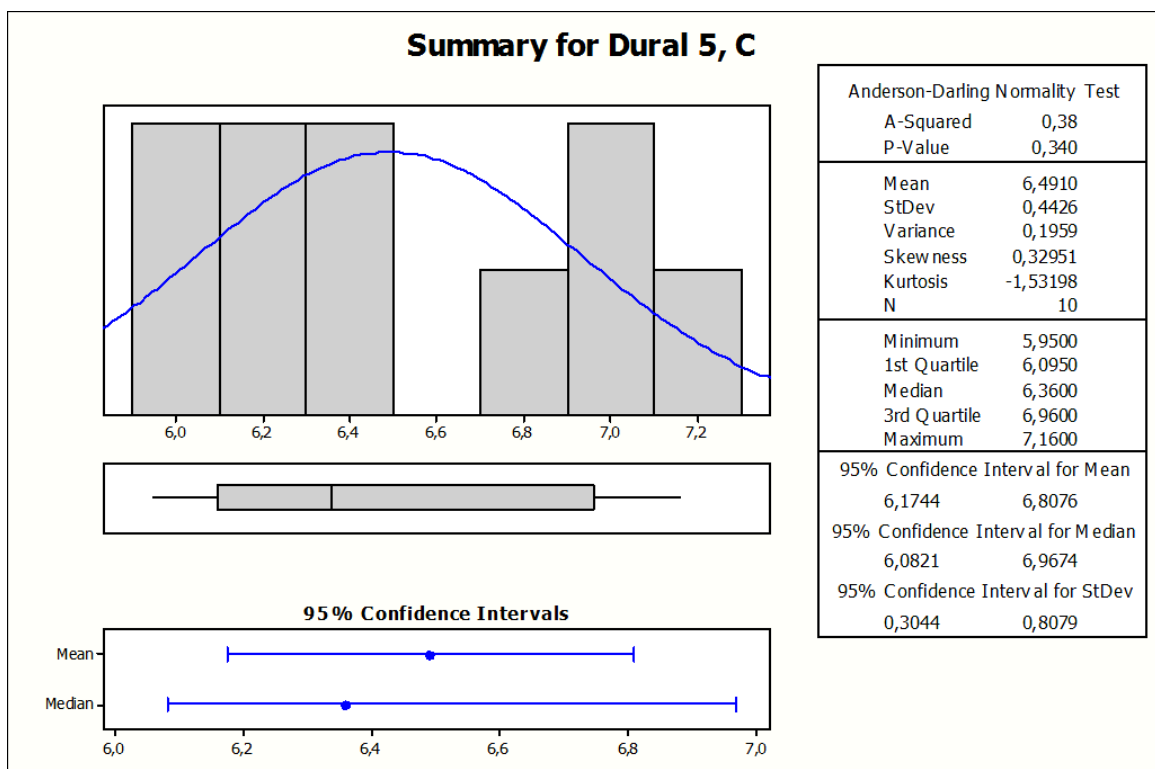
Obr. 46: Boxplot pro drsnost povrchu duralu tl. 5 mm, obrobeného laserem



Obr. 47: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině A



Obr. 48: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině B

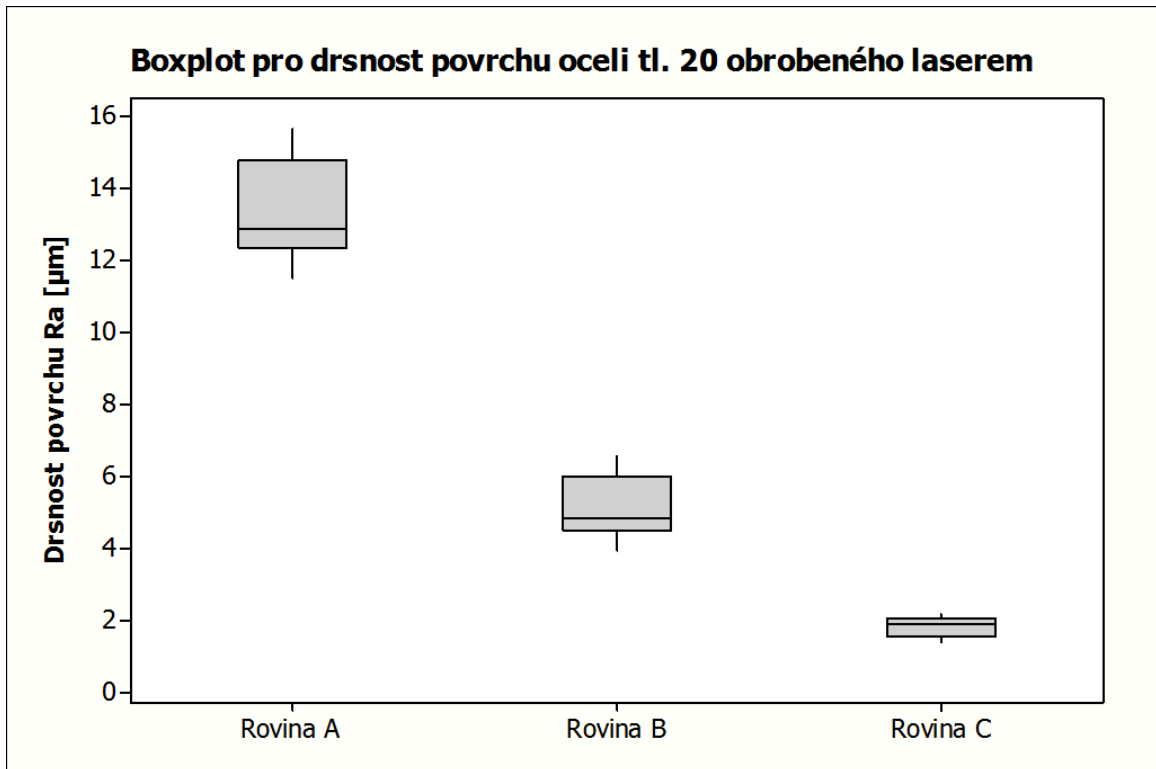


Obr. 49: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině C

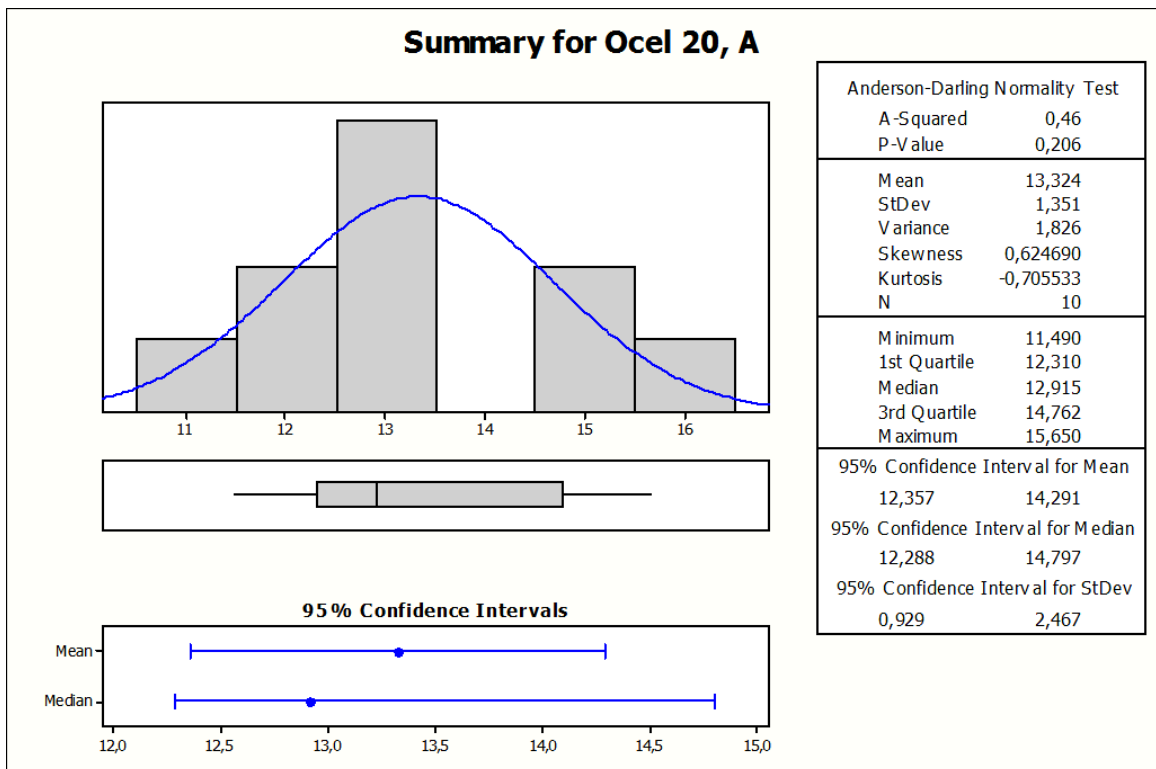
7.1.3 Ocel tloušťky 20 mm

Tab. 6: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 20 mm

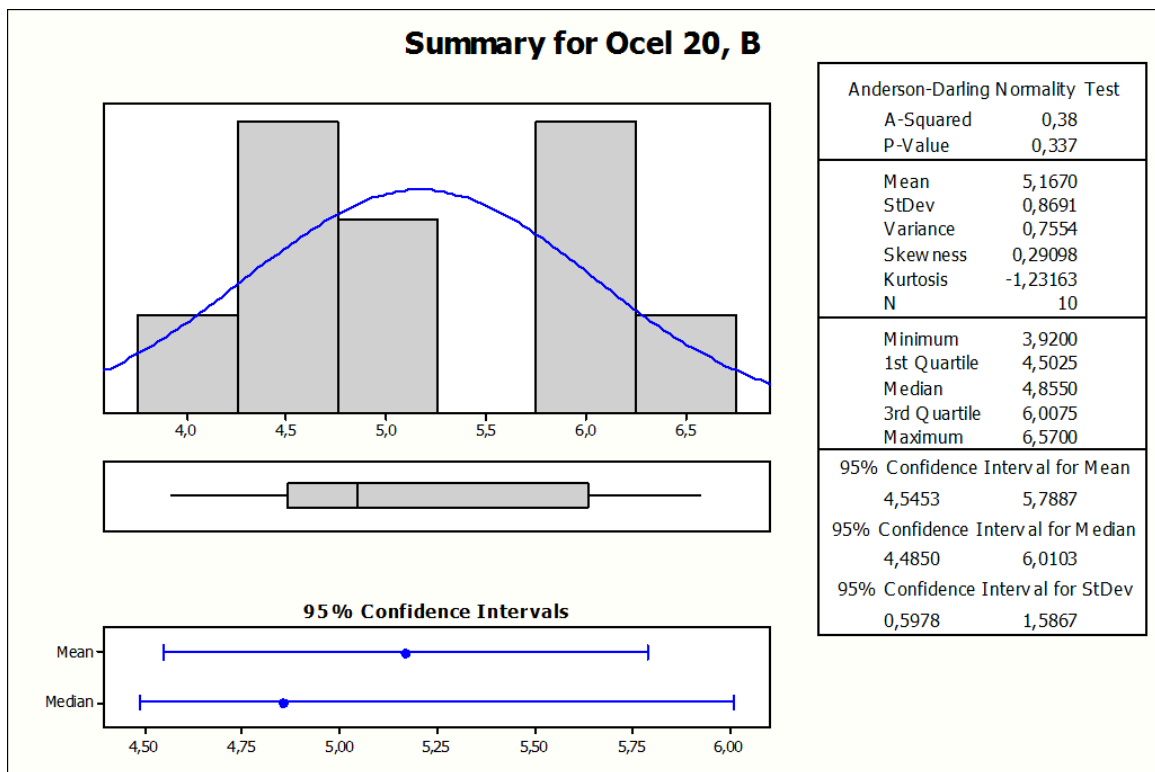
OCEL, tloušťka 20 mm, rovina A, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	15,04	13,32	1,72	2,9447	1,8258	0,1370
2	14,67		1,35	1,8117		
3	12,13		-1,19	1,4256		
4	13,20		-0,12	0,0154		
5	12,86		-0,46	0,2153		
6	12,89		-0,43	0,1884		
7	15,65		2,33	5,4103		
8	11,49		-1,83	3,3636		
9	12,94		-0,38	0,1475		
10	12,37		-0,95	0,9101		
OCEL, tloušťka 20 mm, rovina B, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	4,73	5,17	-0,44	0,1910	0,7554	0,1462
2	4,95		-0,22	0,0471		
3	4,55		-0,62	0,3807		
4	5,80		0,63	0,4007		
5	4,36		-0,81	0,6512		
6	4,76		-0,41	0,1656		
7	3,92		-1,25	1,5550		
8	6,03		0,86	0,7448		
9	6,57		1,40	1,9684		
10	6,00		0,83	0,6939		
OCEL, tloušťka 20 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	2,03	1,83	0,20	0,0396	0,0767	0,0419
2	1,95		0,12	0,0142		
3	2,15		0,32	0,1018		
4	1,63		-0,20	0,0404		
5	1,37		-0,46	0,2125		
6	1,40		-0,43	0,1858		
7	1,87		0,04	0,0015		
8	1,83		0,00	0,0000		
9	1,98		0,15	0,0222		
10	2,10		0,27	0,0724		



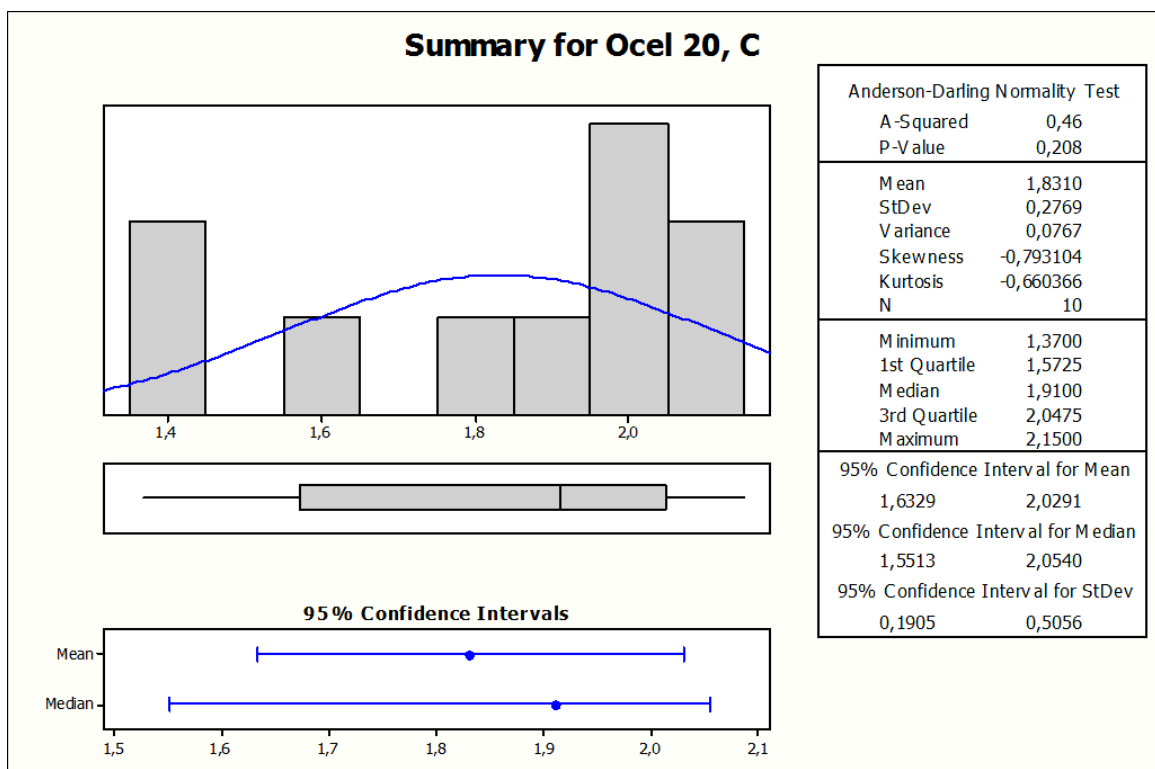
Obr. 50: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 20 mm, obroběného laserem



Obr. 51: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině A



Obr. 52: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině B

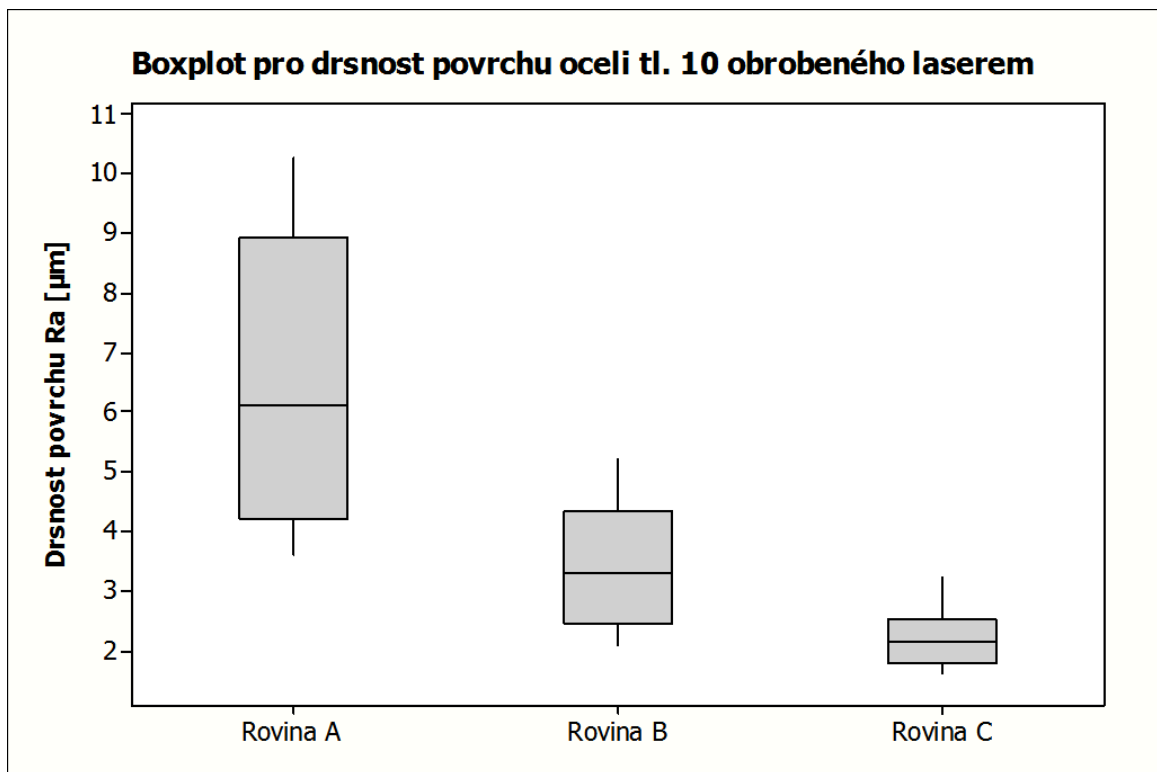


Obr. 53: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině C

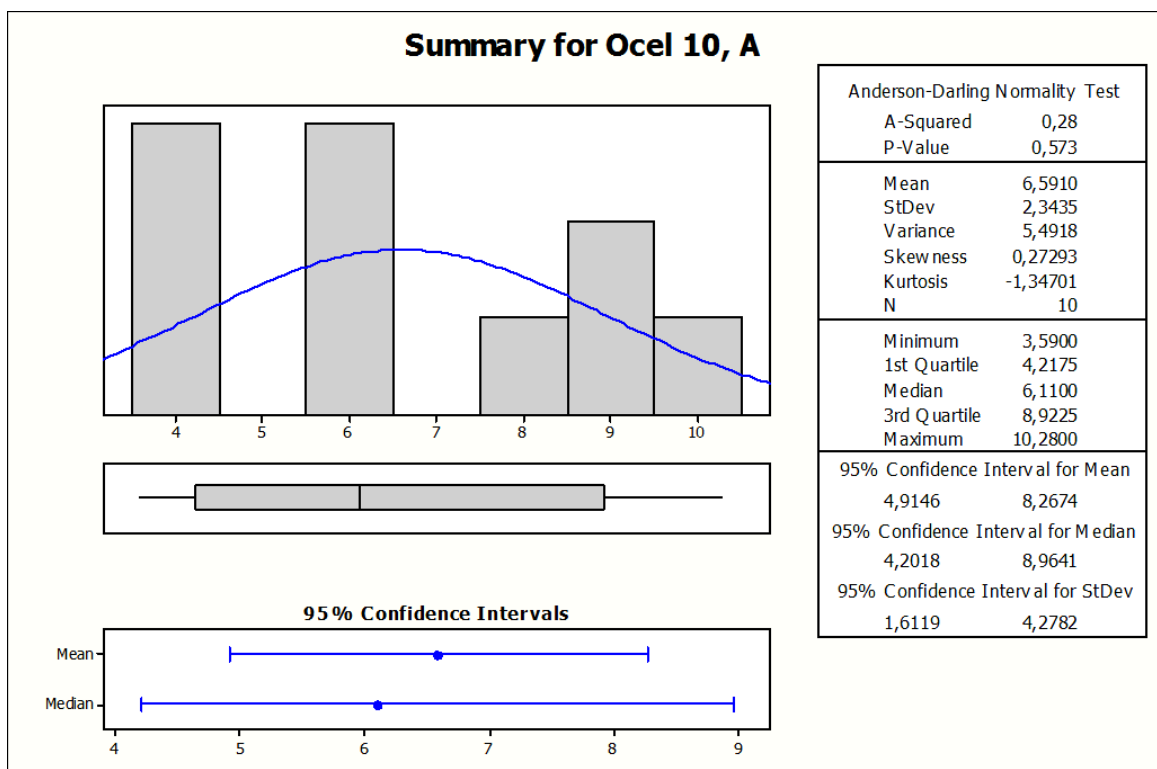
7.1.4 Ocel tloušťky 10 mm

Tab. 7: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 10 mm

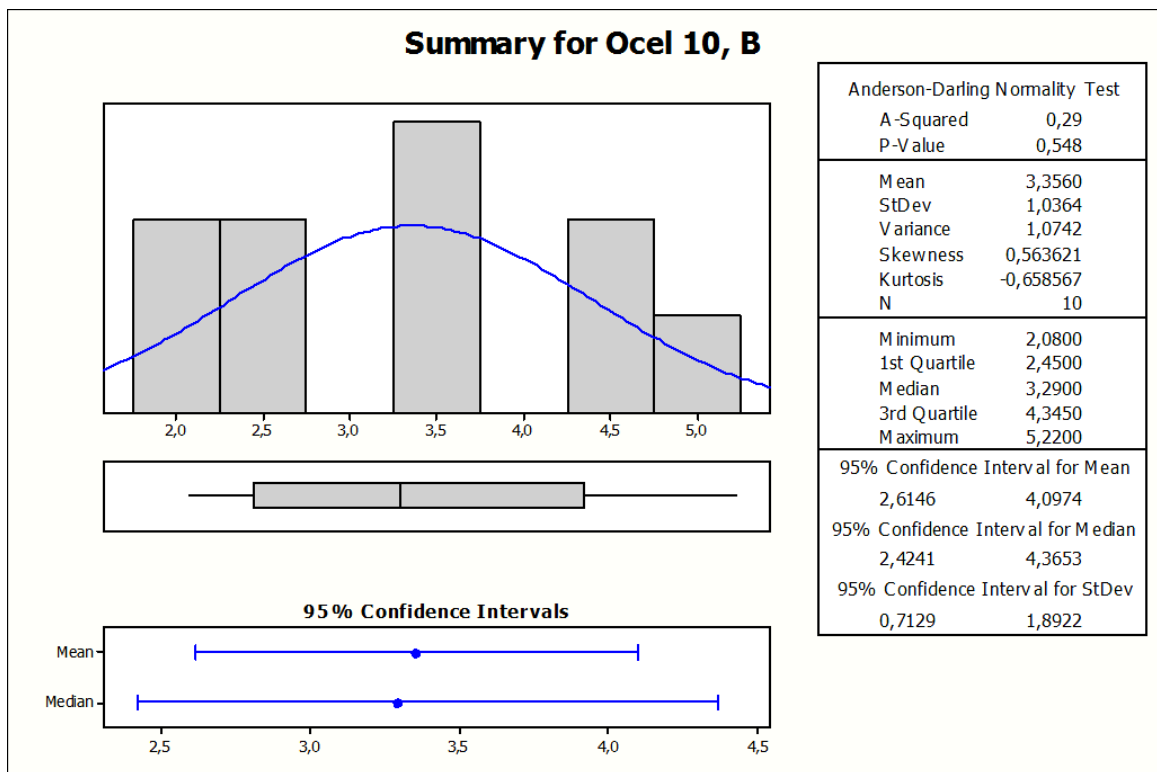
OCEL, tloušťka 10 mm, rovina A, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	3,59	6,59	-3,00	9,0060	5,4918	0,8332
2	9,26		2,67	7,1236		
3	8,81		2,22	4,9240		
4	10,28		3,69	13,6087		
5	4,09		-2,50	6,2550		
6	5,91		-0,68	0,4638		
7	4,26		-2,33	5,4336		
8	5,58		-1,01	1,0221		
9	7,82		1,23	1,5104		
10	6,31		-0,28	0,0790		
OCEL, tloušťka 10 mm, rovina B, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	2,72	3,36	-0,64	0,4045	1,0742	0,3201
2	3,32		-0,04	0,0013		
3	2,08		-1,28	1,6282		
4	3,40		0,04	0,0019		
5	2,24		-1,12	1,2455		
6	4,29		0,93	0,8724		
7	4,51		1,15	1,3317		
8	2,52		-0,84	0,6989		
9	3,26		-0,10	0,0092		
10	5,22		1,86	3,4745		
OCEL, tloušťka 10 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	1,61	2,25	-0,64	0,4045	0,2796	0,1245
2	1,74		-0,51	0,2560		
3	1,81		-0,44	0,1901		
4	2,10		-0,15	0,0213		
5	2,21		-0,04	0,0013		
6	3,23		0,98	0,9683		
7	3,05		0,80	0,6464		
8	2,37		0,12	0,0154		
9	2,14		-0,11	0,0112		
10	2,20		-0,05	0,0021		



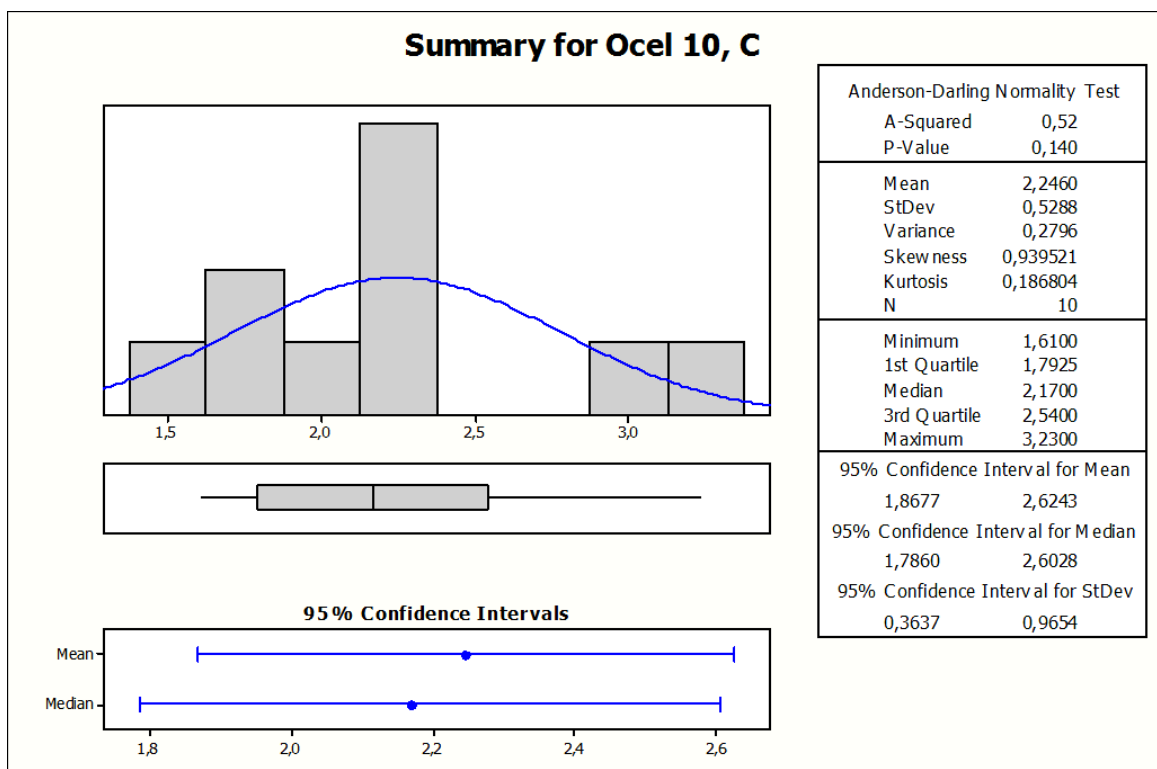
Obr. 54: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 10 mm, obroběného laserem



Obr. 55: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině A



Obr. 56: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině B

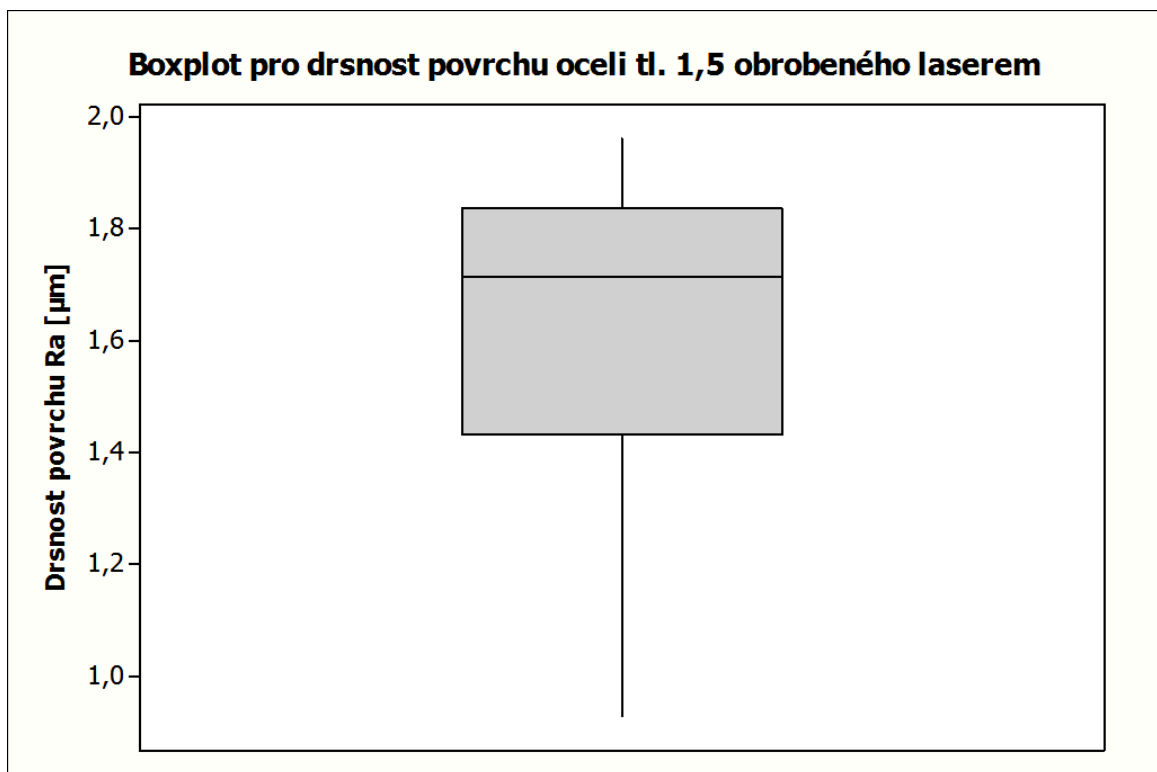


Obr. 57: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině C

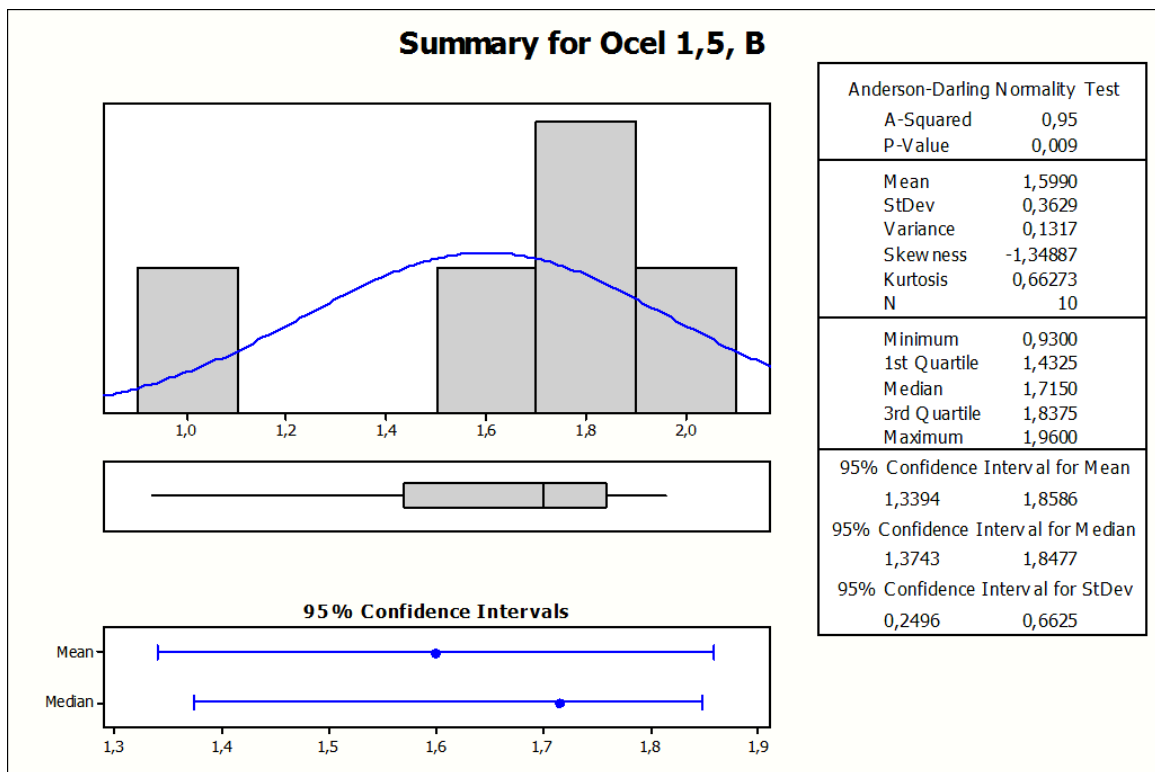
7.1.5 Ocel tloušťky 1,5 mm

Tab. 8: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 1,5 mm

OCEL, tloušťka 1,5 mm, rovina B, LASER						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	1,96	1,60	0,36	0,1303	0,1317	0,0824
2	1,92		0,32	0,1030		
3	1,81		0,21	0,0445		
4	1,59		-0,01	0,0001		
5	1,72		0,12	0,0146		
6	1,64		0,04	0,0017		
7	0,96		-0,64	0,4083		
8	0,93		-0,67	0,4476		
9	1,75		0,15	0,0228		
10	1,71		0,11	0,0123		



Obr. 58: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 1,5 mm, obroběného laserem



Obr. 59: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 1,5 v rovině B

7.1.6 Přehled výsledků měření drsnosti při obrábění laserem

Rovina A

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
Dural 10, A	3,233	0,781	24,17	2,420	2,478	3,100	3,745	4,680	1,268
Dural 5, A	1,847	0,340	18,43	1,440	1,648	1,740	2,023	2,470	0,375
Ocel 20, A	13,324	1,351	10,14	11,490	12,310	12,915	14,762	15,650	2,452
Ocel 10, A	6,591	2,343	35,56	3,590	4,217	6,110	8,922	10,280	4,705

Rovina B

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
Dural 10, B	12,990	1,648	12,69	9,240	12,323	13,090	14,267	14,920	1,945
Dural 5, B	6,273	0,767	12,23	4,550	5,853	6,520	6,835	7,060	0,982
Ocel 20, B	5,167	0,869	16,82	3,920	4,502	4,855	6,008	6,570	1,505
Ocel 10, B	3,356	1,036	30,88	2,080	2,450	3,290	4,345	5,220	1,895
Ocel 1,5, B	1,599	0,363	22,70	0,930	1,433	1,715	1,837	1,960	0,405

Rovina C

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
Dural 10, C	13,697	0,709	5,18	12,310	13,380	13,620	14,150	14,870	0,770
Dural 5, C	6,491	0,443	6,82	5,950	6,095	6,360	6,960	7,160	0,865
Ocel 20, C	1,8310	0,2769	15,13	1,3700	1,5725	1,9100	2,0475	2,1500	0,4750
Ocel 10, C	2,246	0,529	23,54	1,610	1,793	2,170	2,540	3,230	0,748

Vysvětlivky:

Variable – materiál a jeho tloušťka, *Mean* – aritmetický průměr, *StDev* – směrodatná odchylka, *CoefVar* – variační koeficient, *Minimum* – minimální naměřená hodnota, *Q1* – první kvartil, *Median* – medián, *Q3* – třetí kvartil, *Maximum* – maximální naměřená hodnota, *IQR* – interkvartilové rozpětí

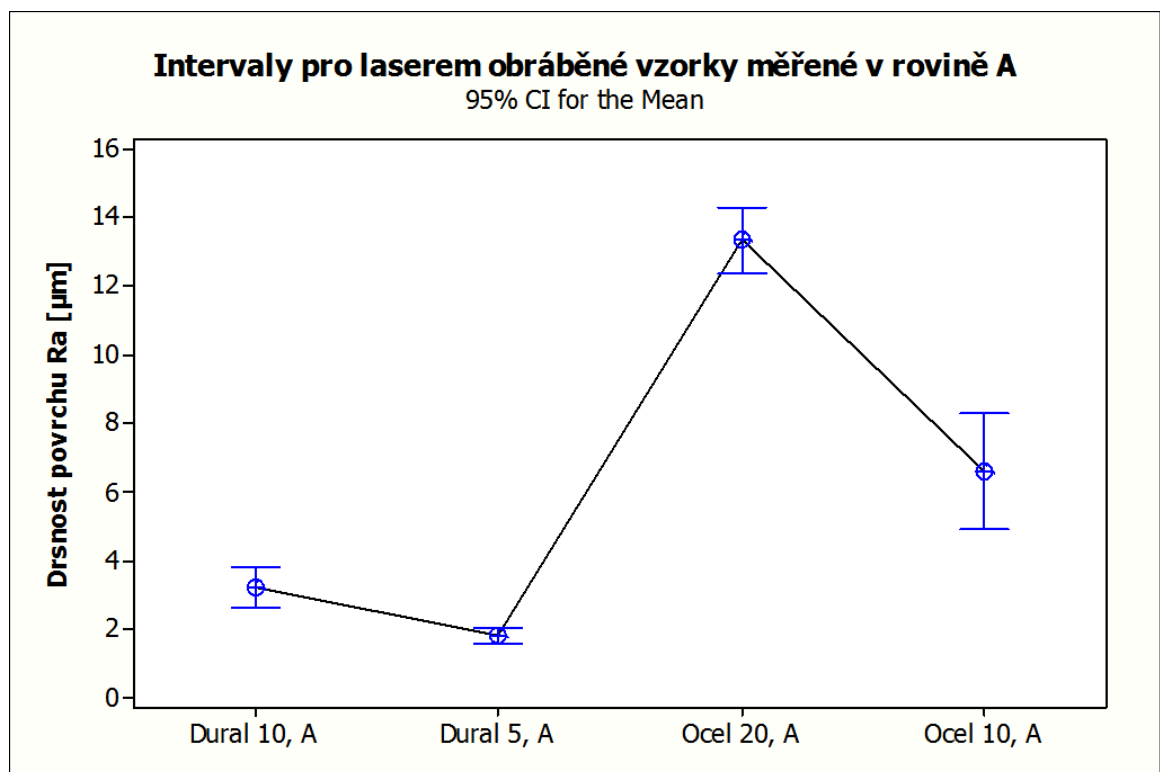
Pro každé měření jsme se řídili následujícím postupem:

$n=10$

$\mu \rightarrow \bar{x}$ neznáme aritmetický průměr základního souboru μ , proto jej nahrazujeme odhadem aritmetické průměru \bar{x}

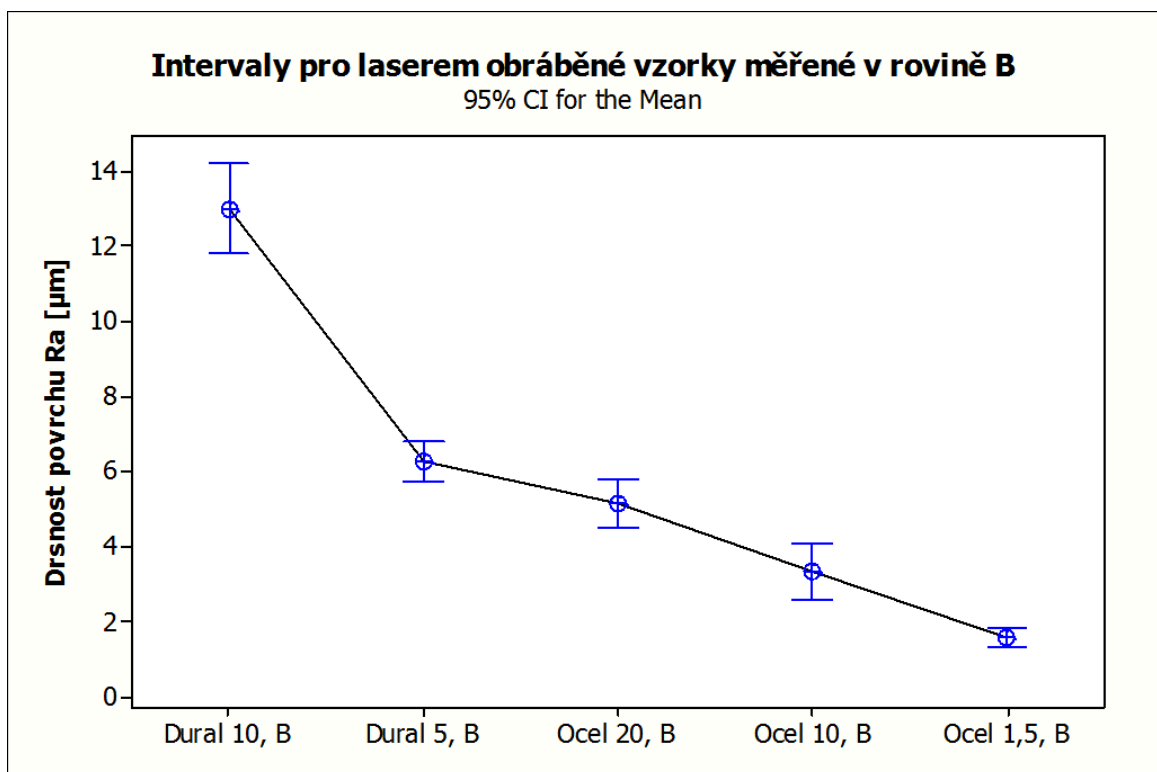
$\sigma \rightarrow s$ neznáme směrodatnou odchylku základního souboru σ , proto ji nahrazujeme odhadem směrodatné odchylky s

konfidenční interval určíme ze vztahu: $\bar{x} \pm \frac{t_{1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} \cdot s = 0,715 \cdot s$ (z tabulek)



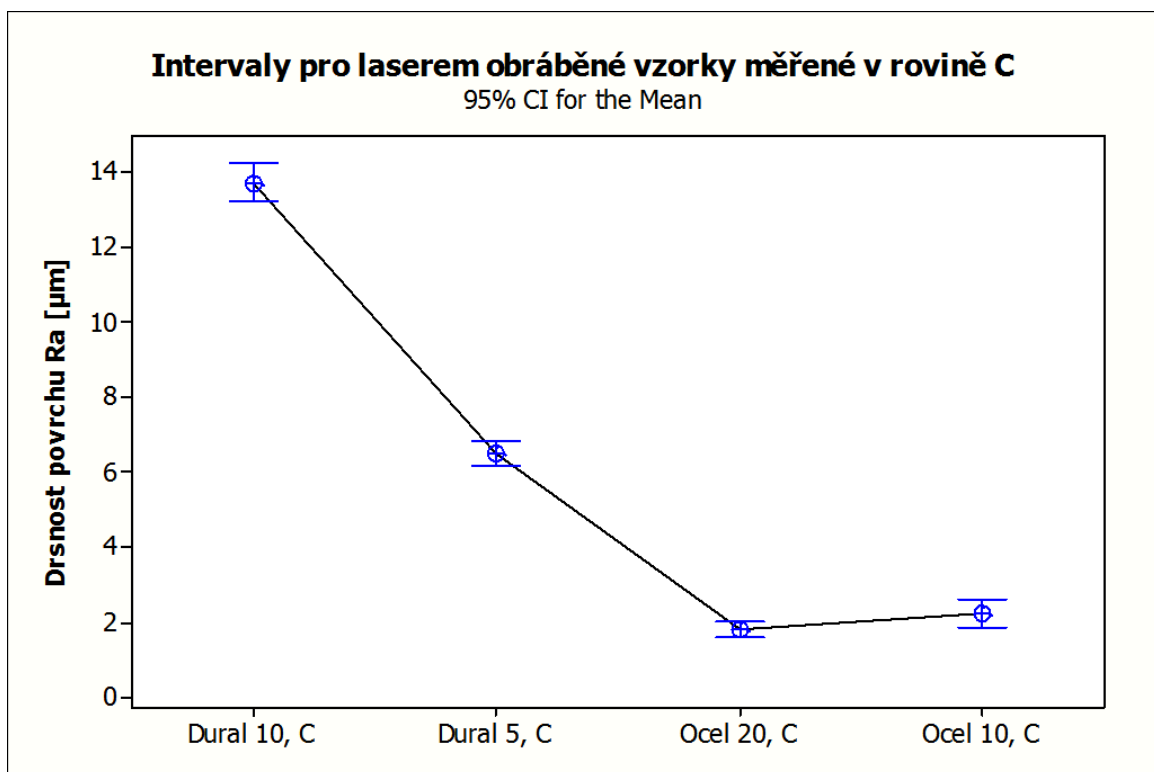
Obr. 60: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené laserem, měřeno v rovině A

Interpretace výsledků pro vzorek z duralu, tloušťky 10 mm, měřeno v rovině A: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$ leží neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ v konfidenčním intervalu od $2,6740 \mu\text{m}$ do $3,7920 \mu\text{m}$.



Obr. 61: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené laserem, měřeno v rovině B

Interpretace výsledků pro vzorek z duralu, tloušťky 10 mm, měřeno v rovině B: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$ leží neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ v konfidenčním intervalu od 11,811 μm do 14,169 μm .



Obr. 62: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené laserem, měřeno v rovině C

Interpretace výsledků pro vzorek z duralu, tloušťky 10 mm, měřeno v rovině C: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$ leží neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ v konfidenčním intervalu od 13,190 μm do 14,204 μm .

7.1.7 Zhodnocení

Při obrábění laserem jsou z naměřených dat a z nich vytvořených grafů patrné materiálové rozdíly. Při obrábění hliníku je povrch začátku řezu (povrch řezu na hraně vstupu paprsku do materiálu) celkem uspokojivý a poměrně nízký, ale v rovině B a C, které už jsou pod bodem fokusace paprsku, dojde k markantnímu zhoršení drsnosti. U tenčího vzorku je drsnost cca o polovinu lepší než u vzorku silnějšího.

U ocelových vzorků má drsnost po hloubce řezu úplně opačný charakter. U hrany vstupu paprsku má nejvyšší drsnost nejsilnější materiál. Vlivem nízké řezné rychlosti zůstávají v řezu stopy po paprsku, avšak s narůstající hloubkou se dostáváme pod fokusační bod a drsnost se zlepšuje. Stejný průběh má drsnost i u vzorku 10 mm silného. Jen rozdíly nejsou

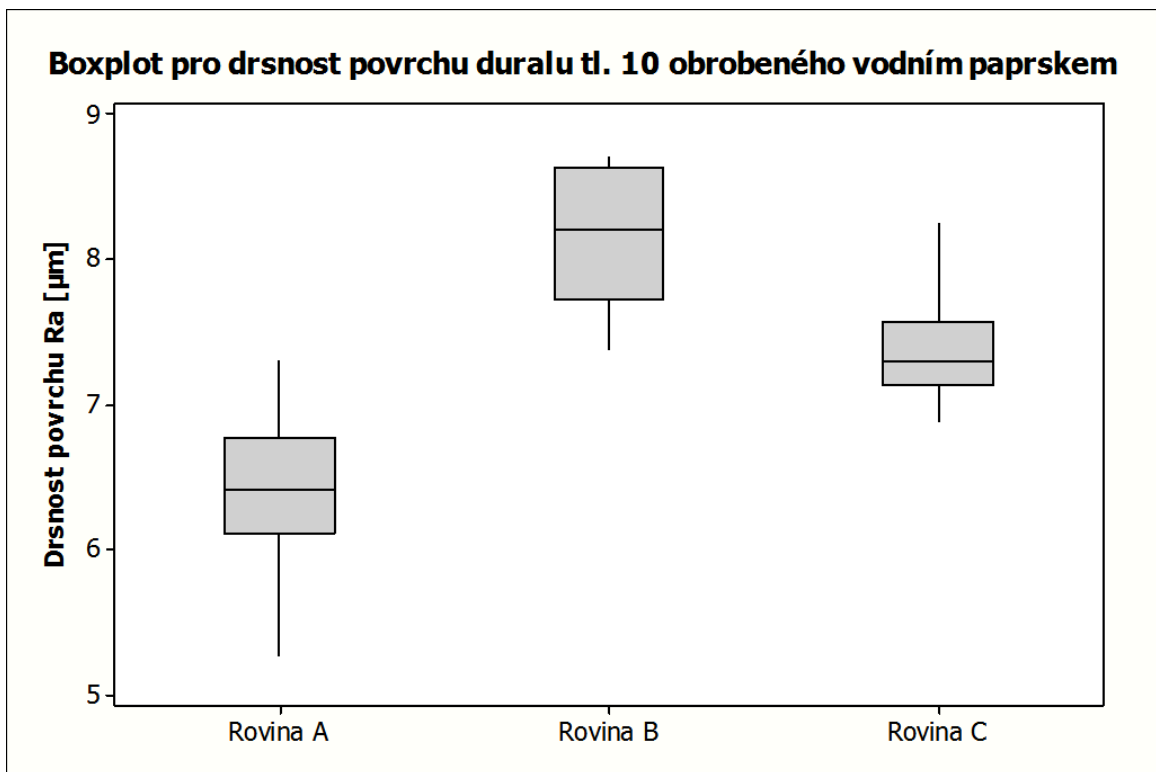
tak markantní. Nejnižší drsnosti dosahuje povrch nejtenčího ocelového materiálu, protože hloubkou řezu se nedostaneme pod fokusační bod.

7.2 Vyhodnocení drsnosti povrchu u vzorků vyrobených vodním parskem

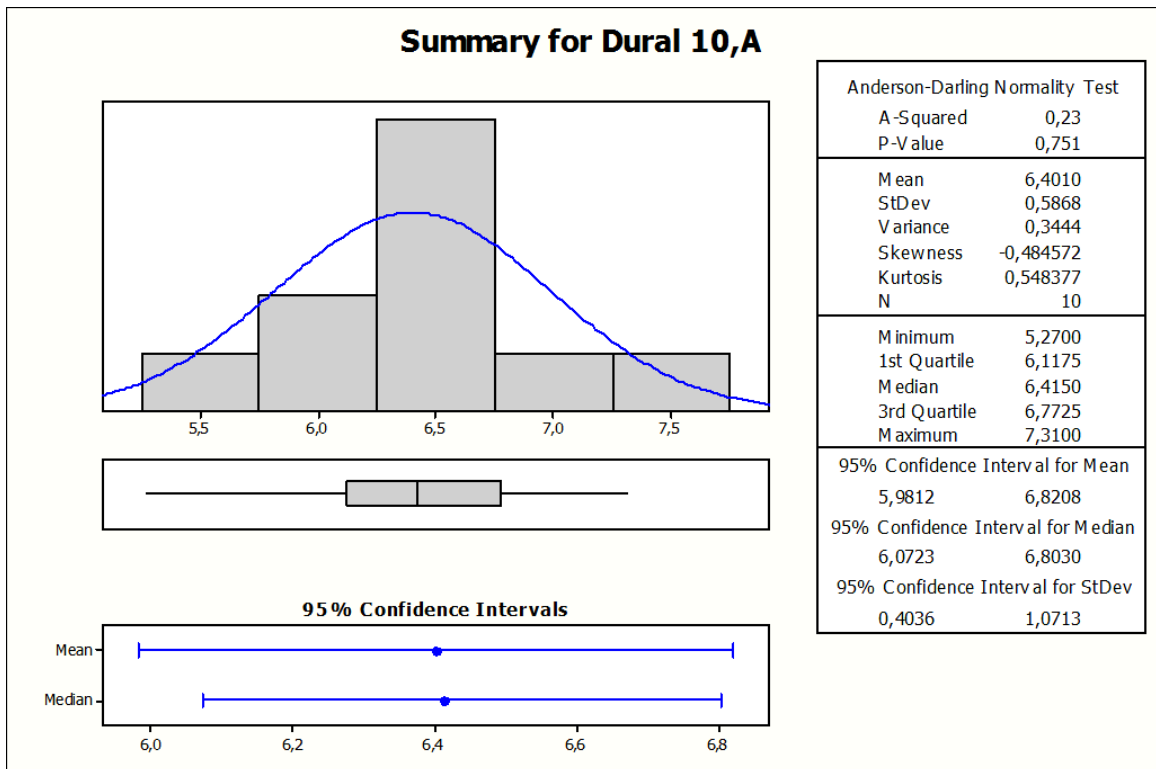
7.2.1 Dural tloušťky 10 mm

Tab. 9: Hodnoty drsnosti pro dural tl. 10 mm

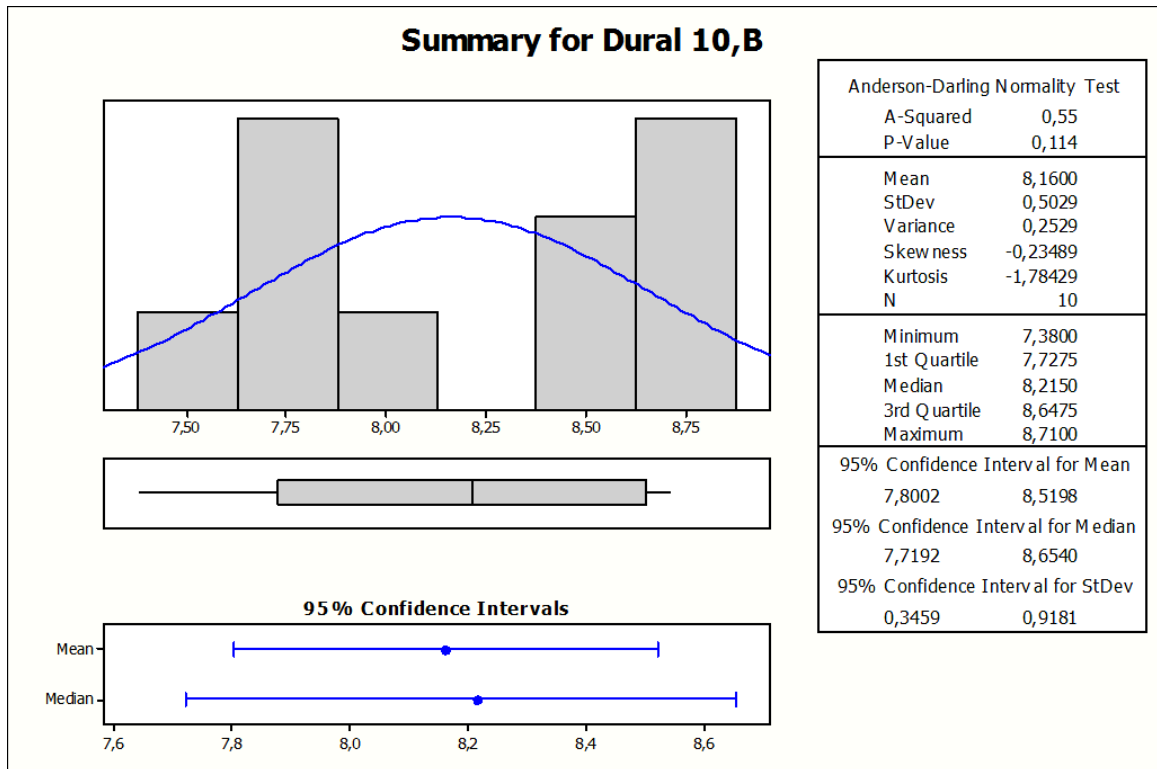
DURAL, tloušťka 10 mm, rovina A, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	6,50	6,40	0,10	0,0098	0,3444	0,0538
2	7,02		0,62	0,3832		
3	5,75		-0,65	0,4238		
4	6,28		-0,12	0,0146		
5	6,24		-0,16	0,0259		
6	7,31		0,91	0,8263		
7	6,62		0,22	0,0480		
8	6,33		-0,07	0,0050		
9	6,69		0,29	0,0835		
10	5,27		-1,13	1,2792		
DURAL, tloušťka 10 mm, rovina B, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	7,76	8,16	-0,40	0,1600	0,2529	0,0310
2	8,00		-0,16	0,0256		
3	8,71		0,55	0,3025		
4	8,43		0,27	0,0729		
5	7,38		-0,78	0,6084		
6	8,63		0,47	0,2209		
7	8,70		0,54	0,2916		
8	8,58		0,42	0,1764		
9	7,75		-0,41	0,1681		
10	7,66		-0,50	0,2500		
DURAL, tloušťka 10 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	7,43	7,39	0,04	0,0018	0,1527	0,0207
2	7,40		0,01	0,0002		
3	6,89		-0,50	0,2470		
4	7,19		-0,20	0,0388		
5	7,21		-0,18	0,0313		
6	8,25		0,86	0,7448		
7	7,16		-0,23	0,0515		
8	7,75		0,36	0,1318		
9	7,53		0,14	0,0204		
10	7,06		-0,33	0,1069		



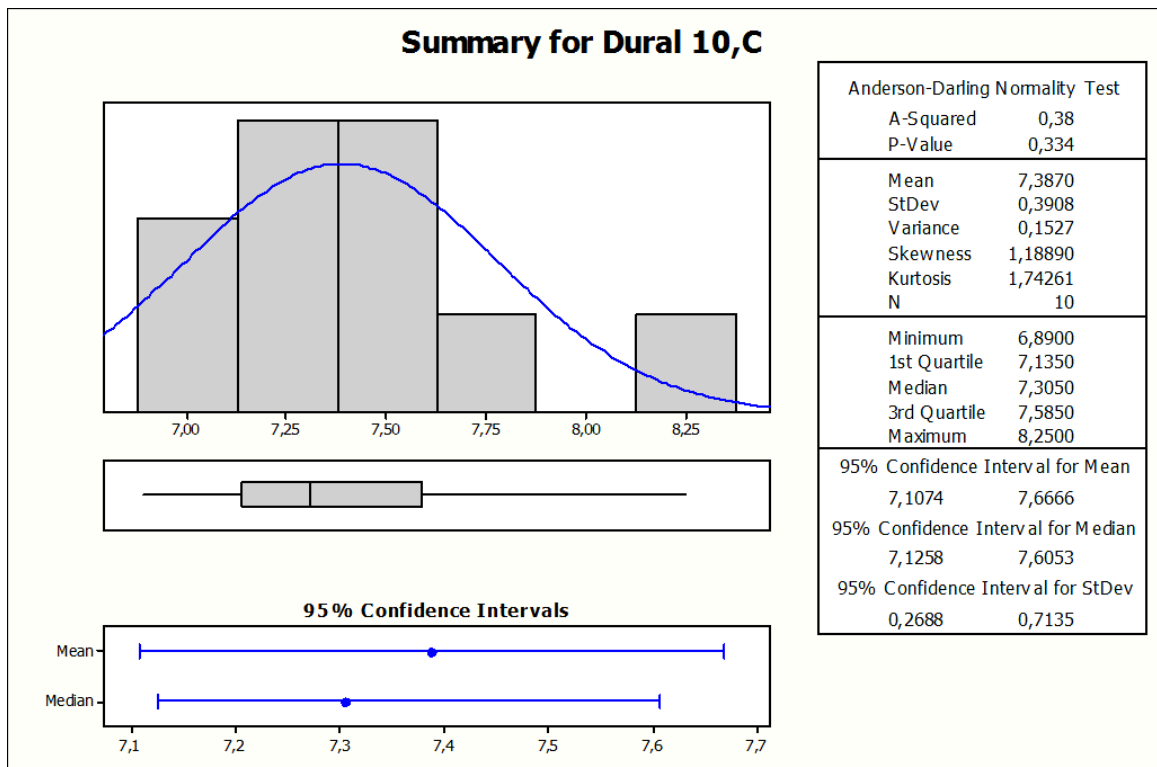
Obr. 63: Boxplot pro drsnost povrchu duralu tl. 10 mm, obrobeného vodním paprskem



Obr. 64: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině A



Obr. 65: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině B

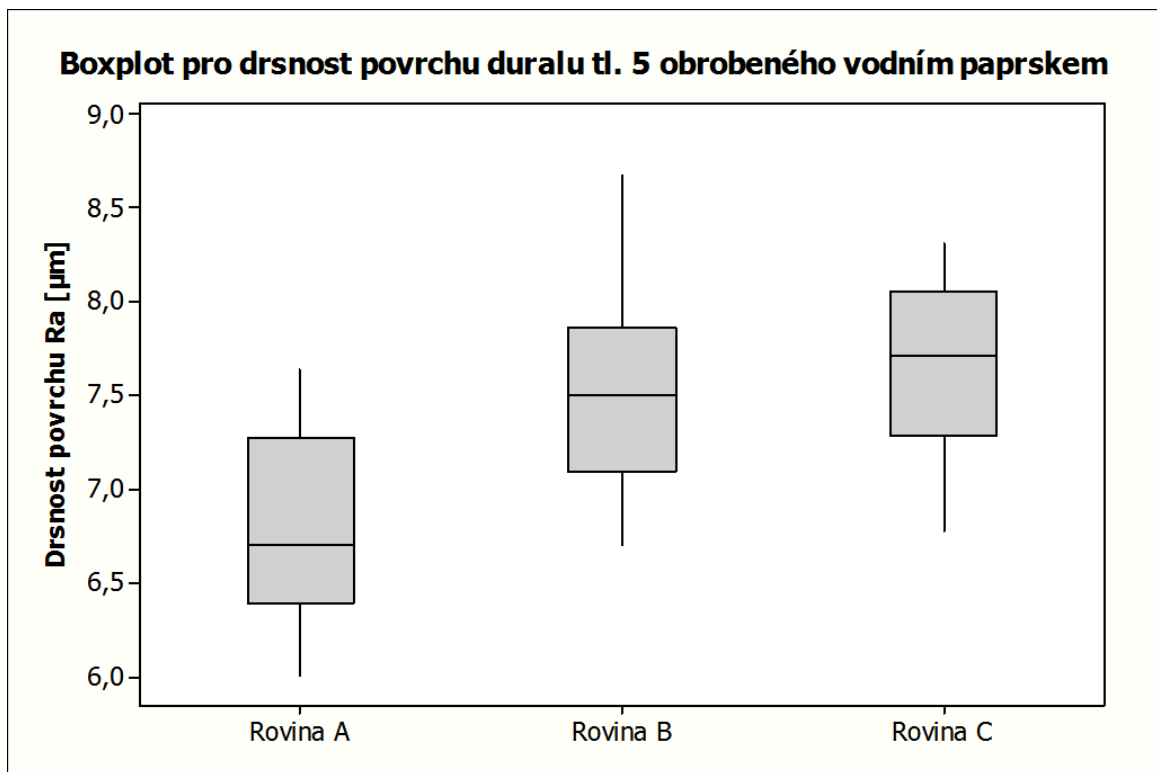


Obr. 66: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině C

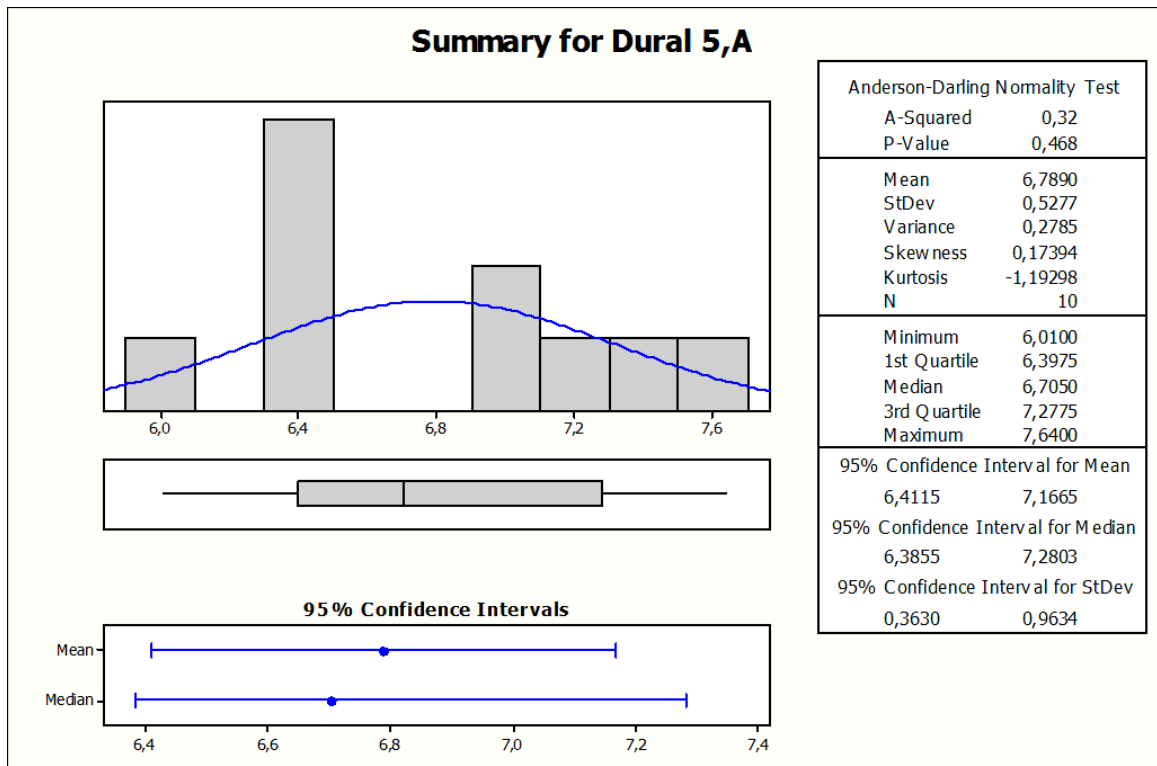
7.2.2 Dural tloušťky 5 mm

Tab. 10: Hodnoty drsnosti pro dural tl. 5 mm

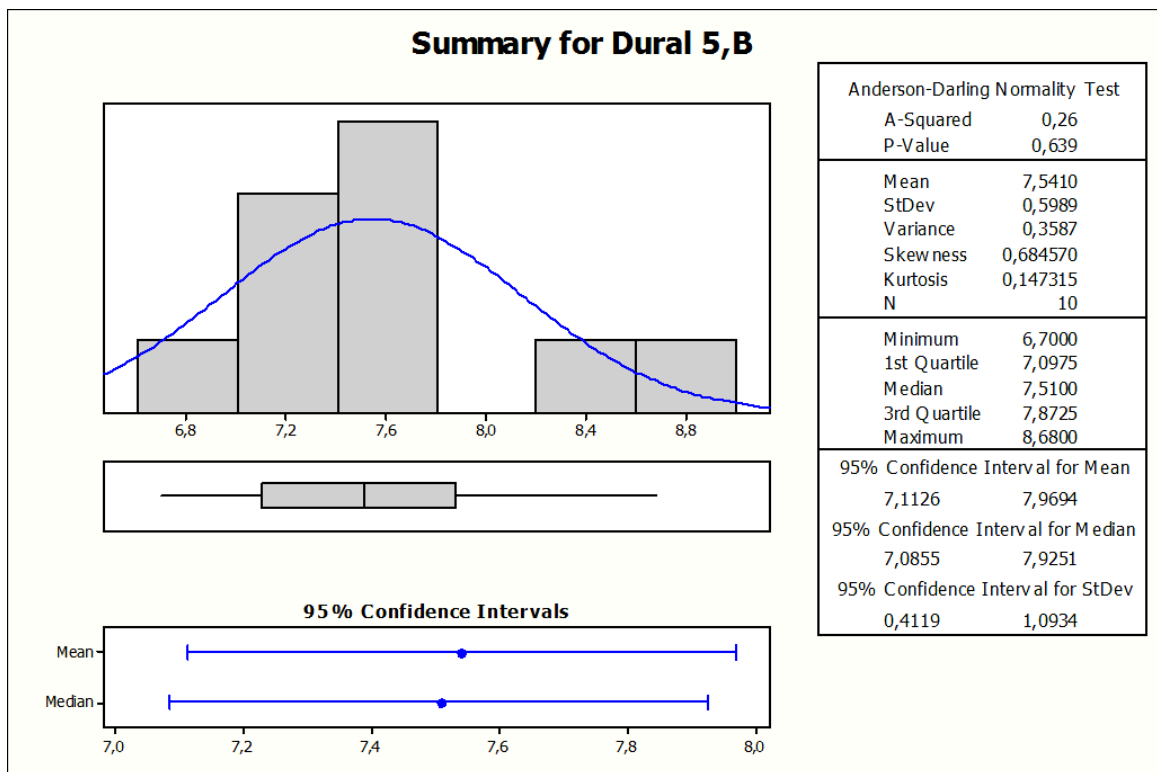
DURAL, tloušťka 5 mm, rovina A, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	6,43	6,79	-0,36	0,1289	0,2785	0,0410
2	6,45		-0,34	0,1149		
3	6,93		0,14	0,0199		
4	7,64		0,85	0,7242		
5	6,01		-0,78	0,6068		
6	7,27		0,48	0,2314		
7	7,08		0,29	0,0847		
8	7,30		0,51	0,2611		
9	6,48		-0,31	0,0955		
10	6,30		-0,49	0,2391		
DURAL, tloušťka 5 mm, rovina B, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	7,73	7,54	0,19	0,0357	0,3587	0,0476
2	8,30		0,76	0,5761		
3	7,41		-0,13	0,0172		
4	7,61		0,07	0,0048		
5	7,65		0,11	0,0119		
6	7,13		-0,41	0,1689		
7	8,68		1,14	1,2973		
8	7,00		-0,54	0,2927		
9	7,20		-0,34	0,1163		
10	6,70		-0,84	0,7073		
DURAL, tloušťka 5 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	7,79	7,64	0,15	0,0228	0,2722	0,0356
2	7,65		0,01	0,0001		
3	7,93		0,29	0,0847		
4	8,06		0,42	0,1772		
5	6,78		-0,86	0,7379		
6	7,55		-0,09	0,0079		
7	6,78		-0,86	0,7379		
8	8,07		0,43	0,1858		
9	8,32		0,68	0,4638		
10	7,46		-0,18	0,0320		



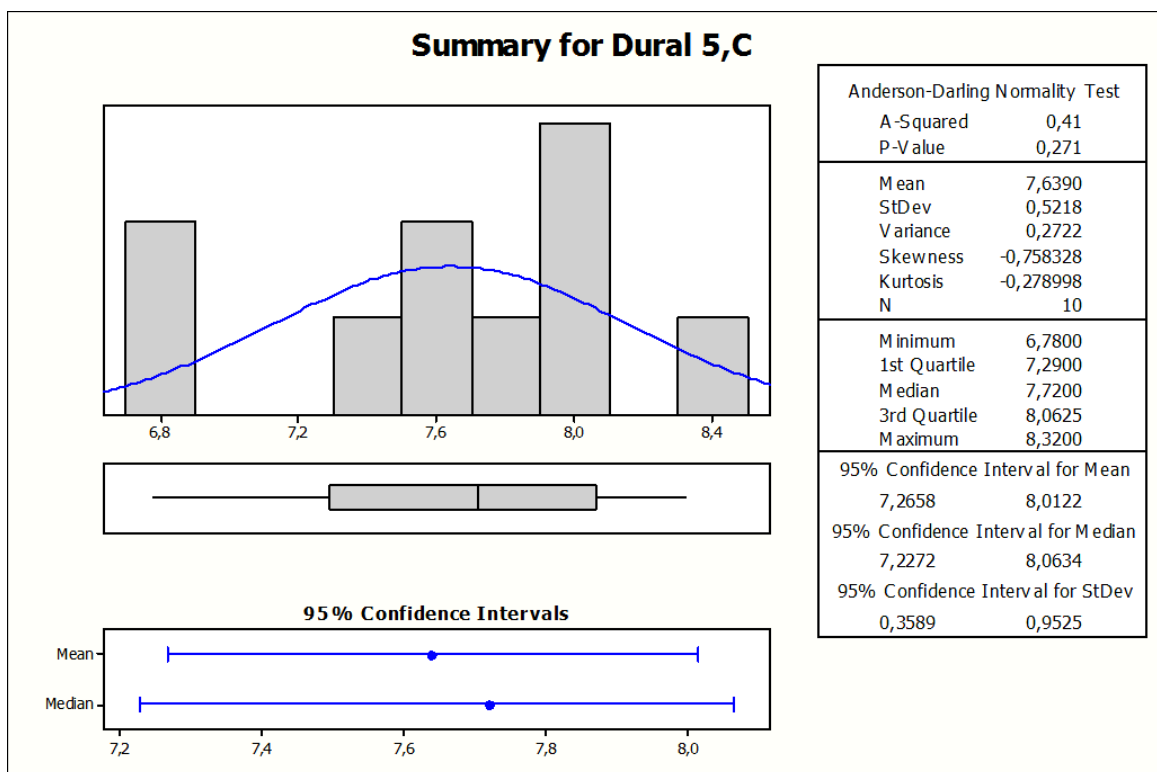
Obr. 67: Boxplot pro drsnost povrchu duralu tl. 5 mm, obrobeneho vodnim paprskem



Obr. 68: Sumar vrsledku pro drsnost duralu tloustk 5 v rovine A



Obr. 69: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině B

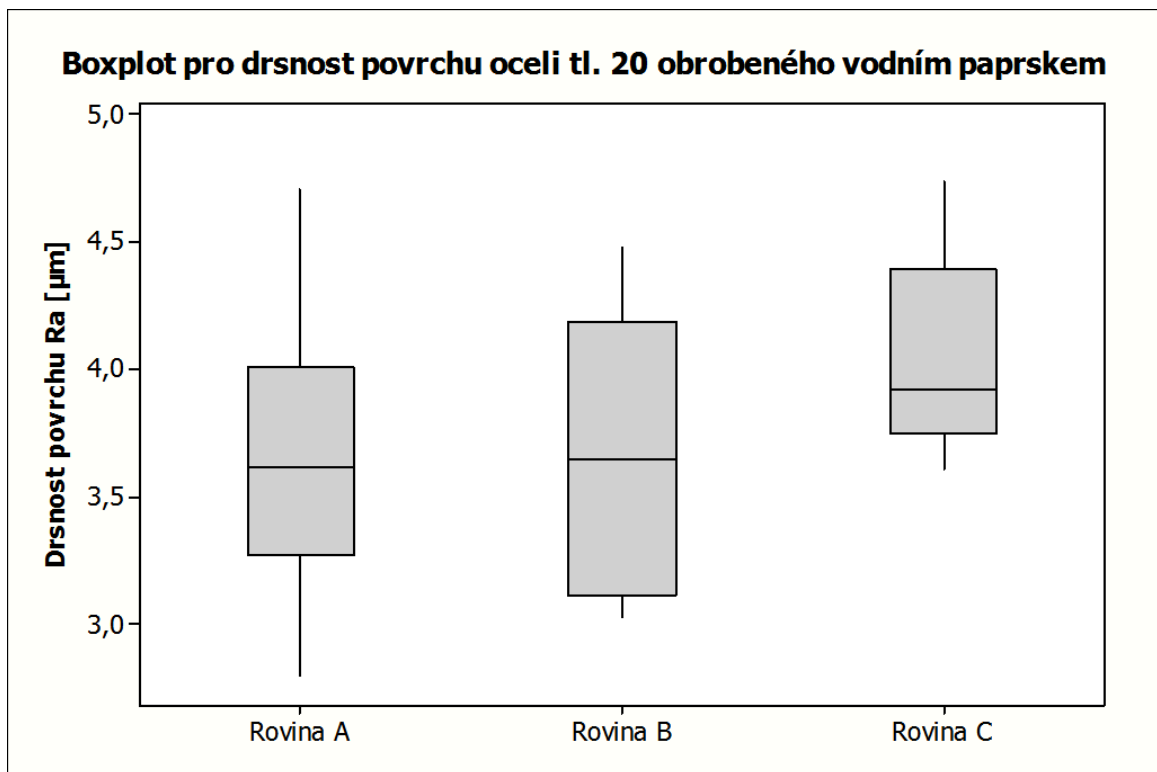


Obr. 70: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině C

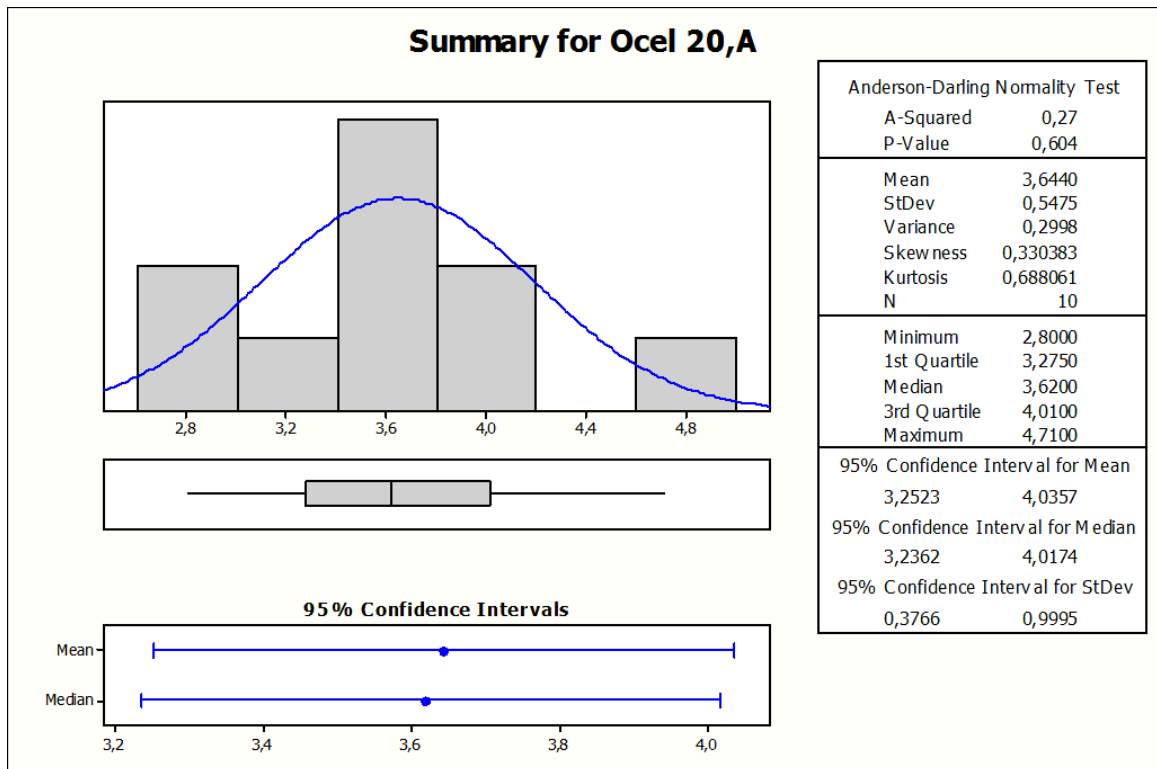
7.2.3 Ocel tloušťky 20 mm

Tab. 11: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 20 mm

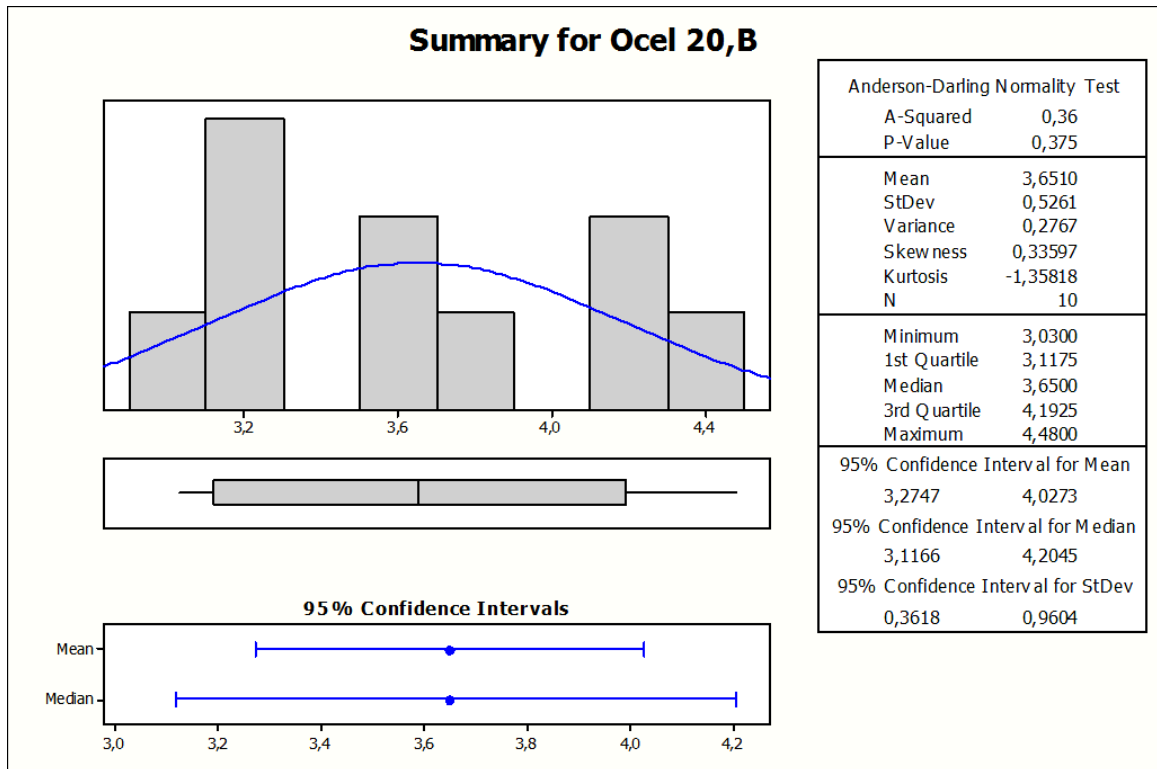
OCEL, tloušťka 20 mm, rovina A, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}[\text{mm}]$	$(x_i - \bar{x})^2[\text{mm}]$	s [mm]	V_x [%]
1	3,71	3,64	0,07	0,0044	0,2998	0,0823
2	4,07		0,43	0,1815		
3	3,64		0,00	0,0000		
4	4,71		1,07	1,1364		
5	3,58		-0,06	0,0041		
6	2,96		-0,68	0,4679		
7	3,38		-0,26	0,0697		
8	2,80		-0,84	0,7123		
9	3,60		-0,04	0,0019		
10	3,99		0,35	0,1197		
OCEL, tloušťka 20 mm, rovina B, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}[\text{mm}]$	$(x_i - \bar{x})^2[\text{mm}]$	s [mm]	V_x [%]
1	3,25	3,65	-0,40	0,1608	0,2767	0,0758
2	4,48		0,83	0,6872		
3	3,12		-0,53	0,2820		
4	3,03		-0,62	0,3856		
5	3,63		-0,02	0,0004		
6	3,67		0,02	0,0004		
7	3,11		-0,54	0,2927		
8	3,77		0,12	0,0142		
9	4,16		0,51	0,2591		
10	4,29		0,64	0,4083		
OCEL, tloušťka 20 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}[\text{mm}]$	$(x_i - \bar{x})^2[\text{mm}]$	s [mm]	V_x [%]
1	4,68	4,05	0,63	0,3919	0,1567	0,0387
2	4,74		0,69	0,4706		
3	3,72		-0,33	0,1116		
4	3,61		-0,44	0,1971		
5	3,88		-0,17	0,0303		
6	3,82		-0,23	0,0548		
7	3,76		-0,29	0,0864		
8	3,97		-0,08	0,0071		
9	4,30		0,25	0,0605		
10	4,06		0,01	0,0000		



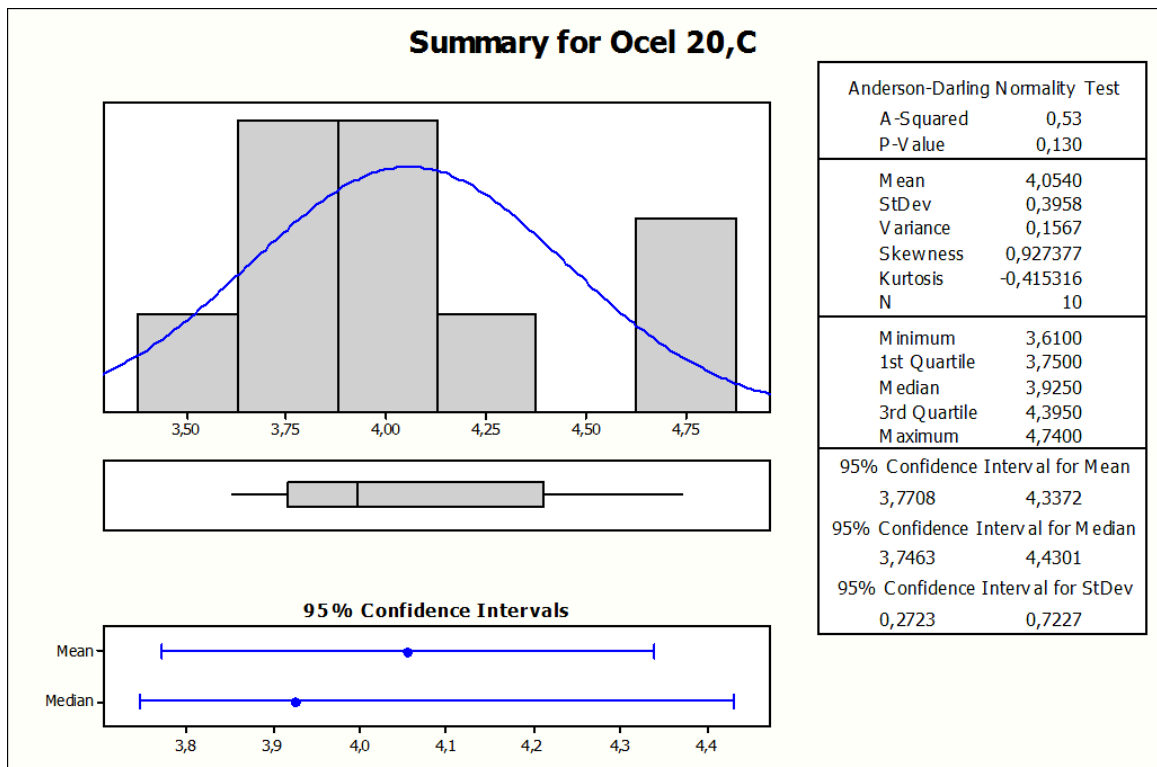
Obr. 71: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 20 mm, obrobeneho vodnim paprskem



Obr. 72: Sumar vrsledku pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině A



Obr. 73: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině B

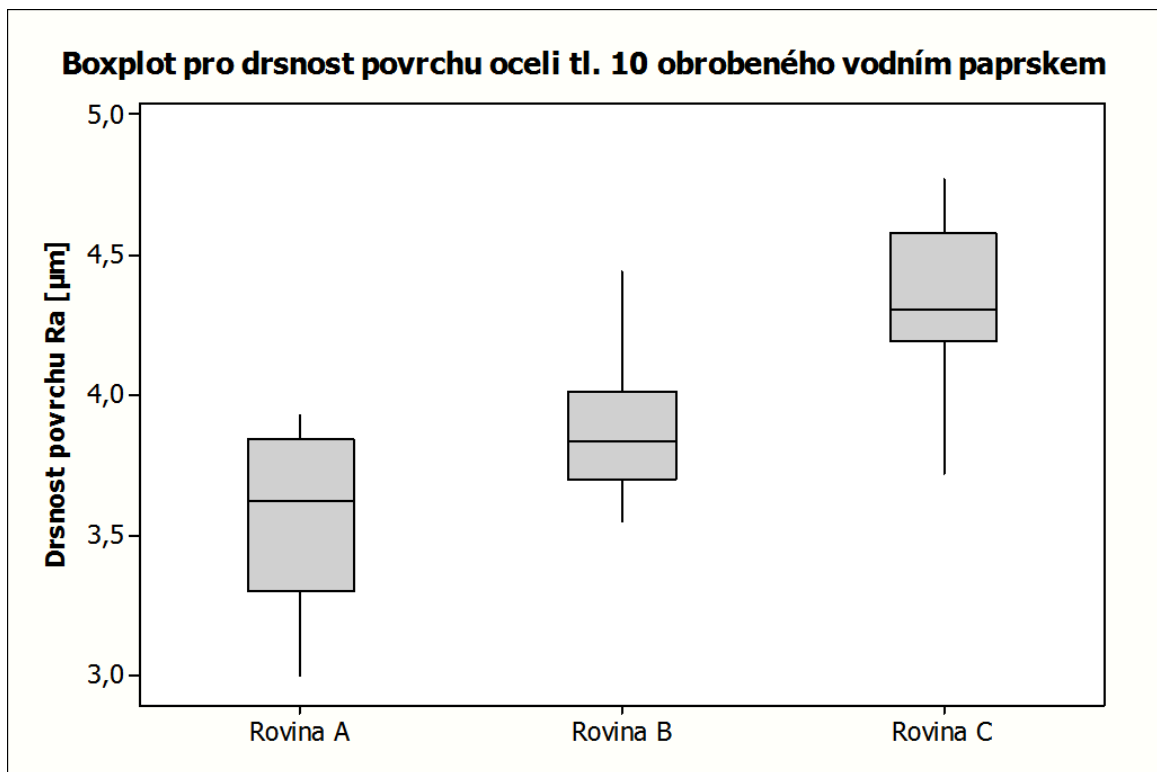


Obr. 74: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině C

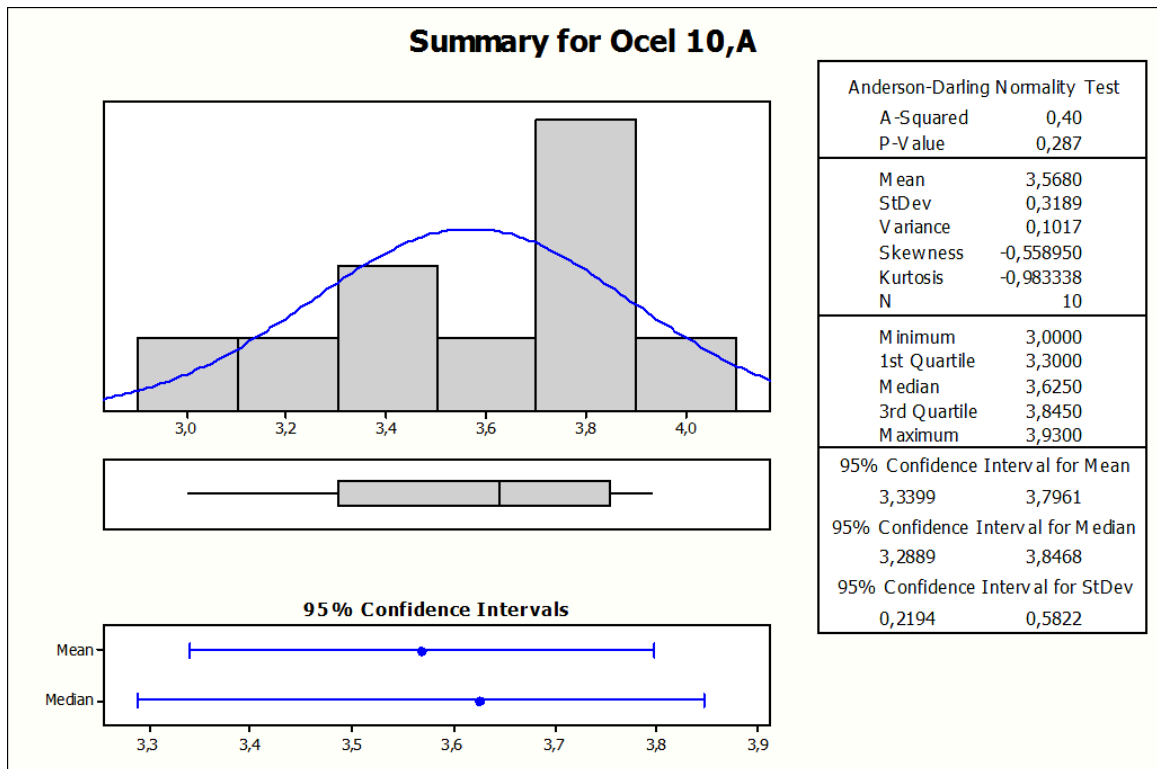
7.2.4 Ocel tloušťky 10 mm

Tab. 12: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 10 mm

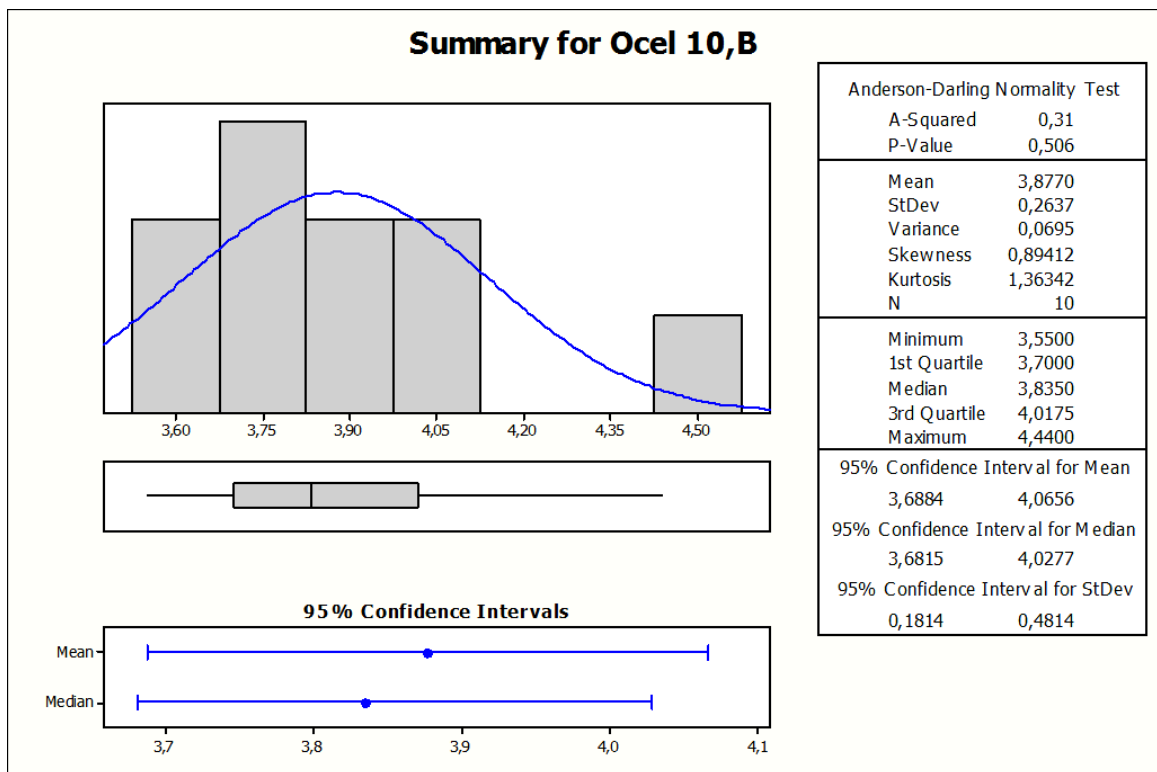
OCEL, tloušťka 10 mm, rovina A, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}[\text{mm}]$	$(x_i - \bar{x})^2[\text{mm}]$	s [mm]	V_x [%]
1	3,21	3,57	-0,36	0,1282	0,1017	0,0285
2	3,86		0,29	0,0853		
3	3,44		-0,13	0,0164		
4	3,00		-0,57	0,3226		
5	3,84		0,27	0,0740		
6	3,75		0,18	0,0331		
7	3,50		-0,07	0,0046		
8	3,33		-0,24	0,0566		
9	3,93		0,36	0,1310		
10	3,82		0,25	0,0635		
OCEL, tloušťka 10 mm, rovina B, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}[\text{mm}]$	$(x_i - \bar{x})^2[\text{mm}]$	s [mm]	V_x [%]
1	3,75	3,88	-0,13	0,0161	0,0695	0,0179
2	3,93		0,05	0,0028		
3	3,80		-0,08	0,0059		
4	4,44		0,56	0,3170		
5	3,55		-0,33	0,1069		
6	3,99		0,11	0,0128		
7	3,55		-0,33	0,1069		
8	3,87		-0,01	0,0000		
9	3,79		-0,09	0,0076		
10	4,10		0,22	0,0497		
OCEL, tloušťka 10 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}[\text{mm}]$	$(x_i - \bar{x})^2[\text{mm}]$	s [mm]	V_x [%]
1	4,05	4,34	-0,29	0,0829	0,0978	0,0225
2	4,24		-0,10	0,0096		
3	4,44		0,10	0,0104		
4	3,72		-0,62	0,3819		
5	4,52		0,18	0,0331		
6	4,29		-0,05	0,0023		
7	4,32		-0,02	0,0003		
8	4,75		0,41	0,1697		
9	4,77		0,43	0,1866		
10	4,28		-0,06	0,0034		



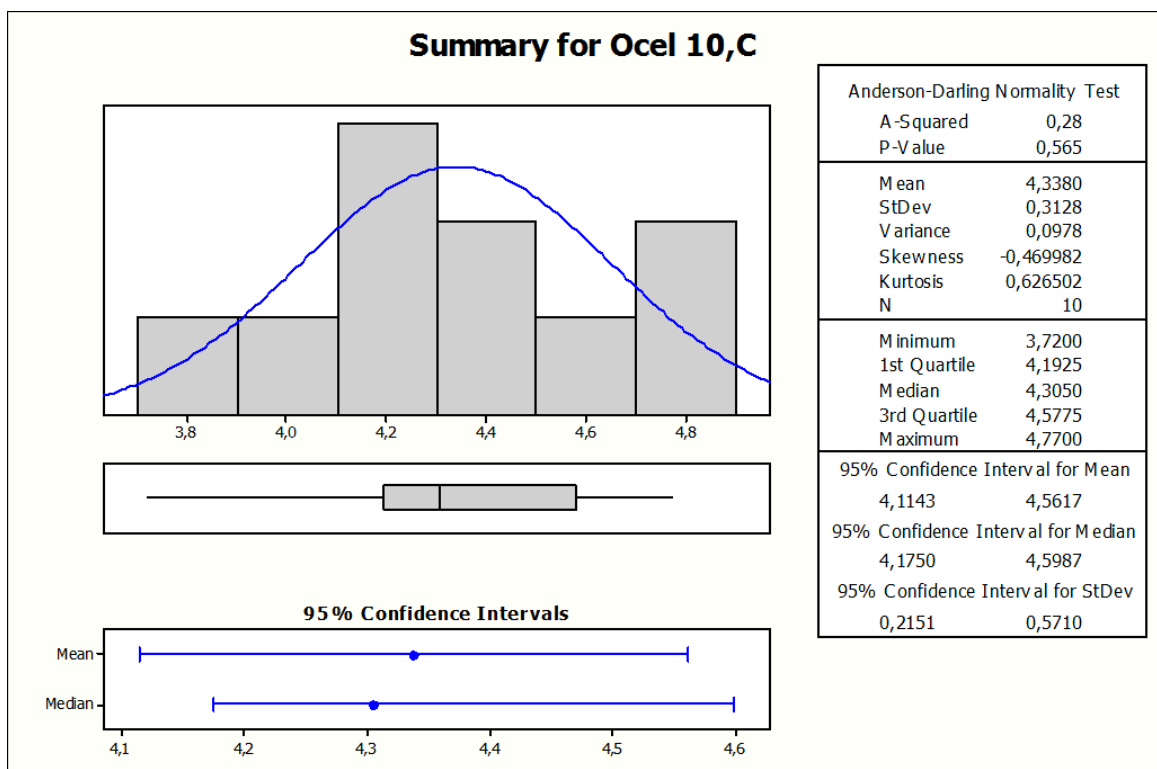
Obr. 75: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 10 mm, obrobeneho vodnim paprskem



Obr. 76: Sumar vrsledku pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině A



Obr. 77: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině B

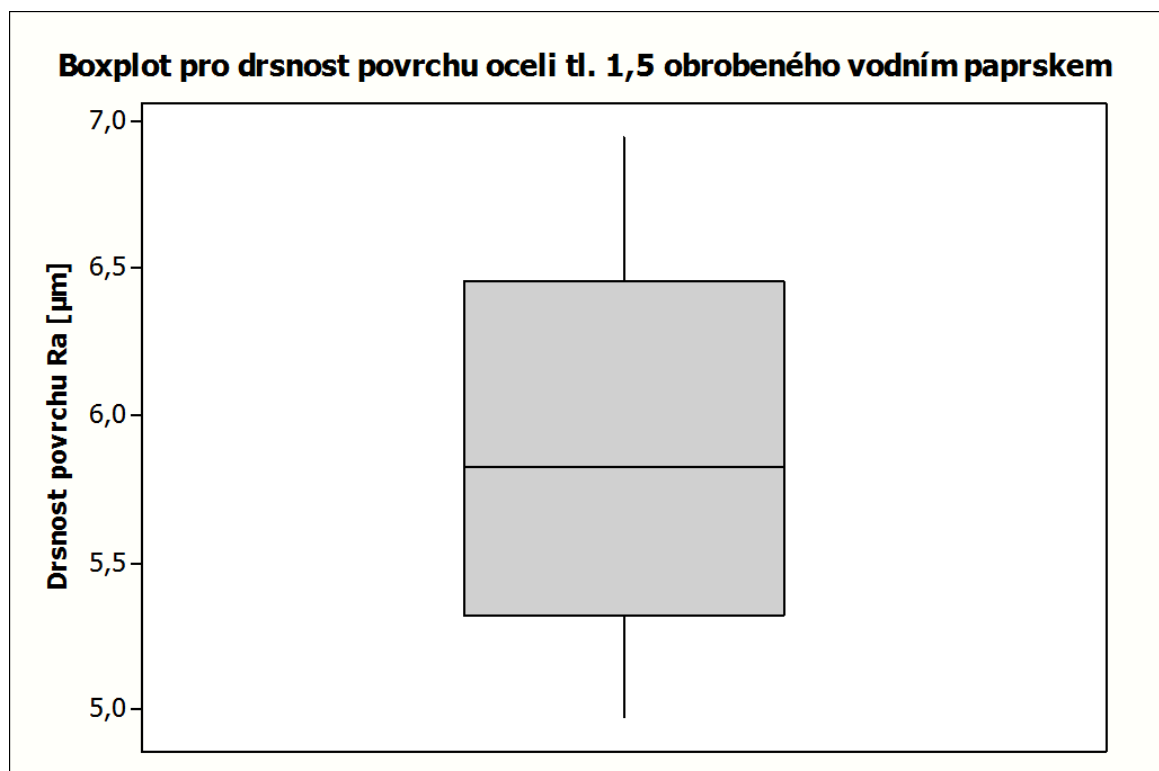


Obr. 78: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině C

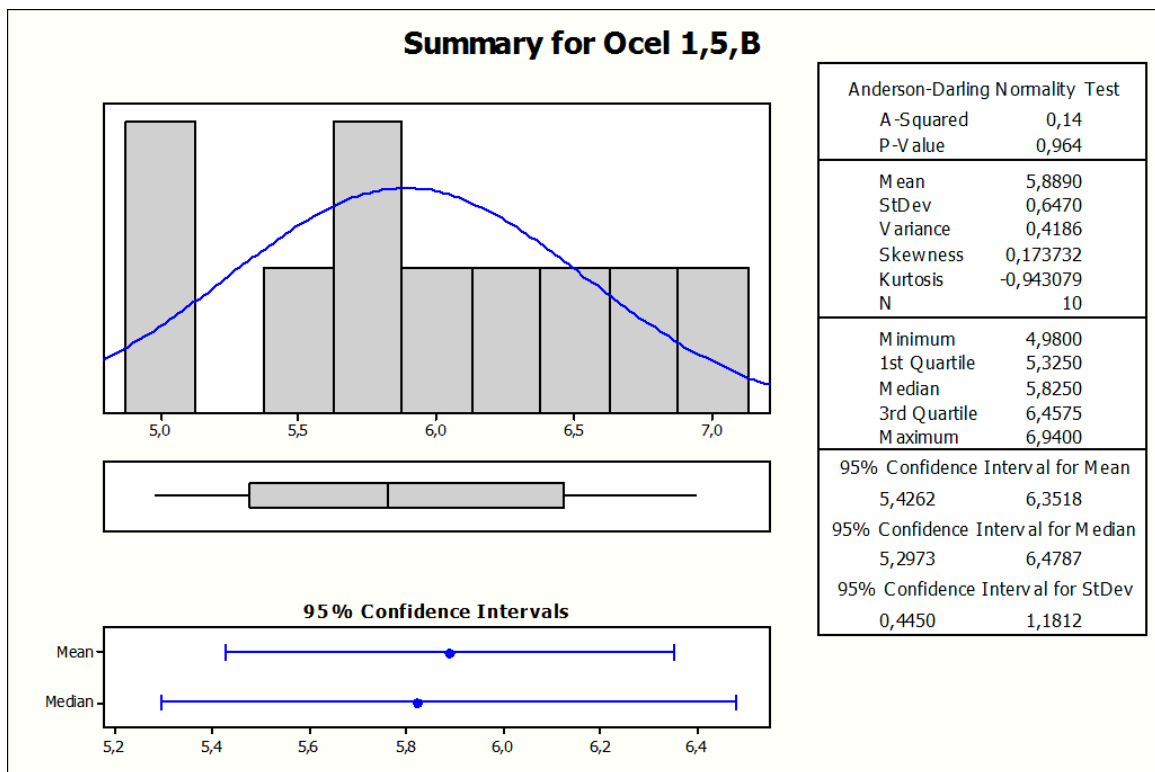
7.2.5 Ocel tloušťky 1,5 mm

Tab. 13: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 1,5 mm

OCEL, tloušťka 1,5 mm, rovina B, VODA						
Č.měření	Hodnota Ra [μm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	6,94	5,89	1,05	1,1046	0,4186	0,0711
2	4,98		-0,91	0,8263		
3	5,40		-0,49	0,2391		
4	5,94		0,05	0,0026		
5	6,40		0,51	0,2611		
6	5,64		-0,25	0,0620		
7	5,71		-0,18	0,0320		
8	6,63		0,74	0,5491		
9	6,15		0,26	0,0681		
10	5,10		-0,79	0,6225		



Obr. 79: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 1,5 mm, obrobeneho vodním paprskem



Obr. 80: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 1,5 v rovině B

7.2.6 Přehled výsledků měření drsnosti při obrábění vodním paprskem

Rovina A

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
Dural 10,A	6,401	0,587	9,17	5,270	6,117	6,415	6,773	7,310	0,655
Dural 5,A	6,789	0,528	7,77	6,010	6,398	6,705	7,277	7,640	0,880
Ocel 20,A	3,644	0,548	15,02	2,800	3,275	3,620	4,010	4,710	0,735
Ocel 10,A	3,568	0,319	8,94	3,000	3,300	3,625	3,845	3,930	0,545

Rovina B

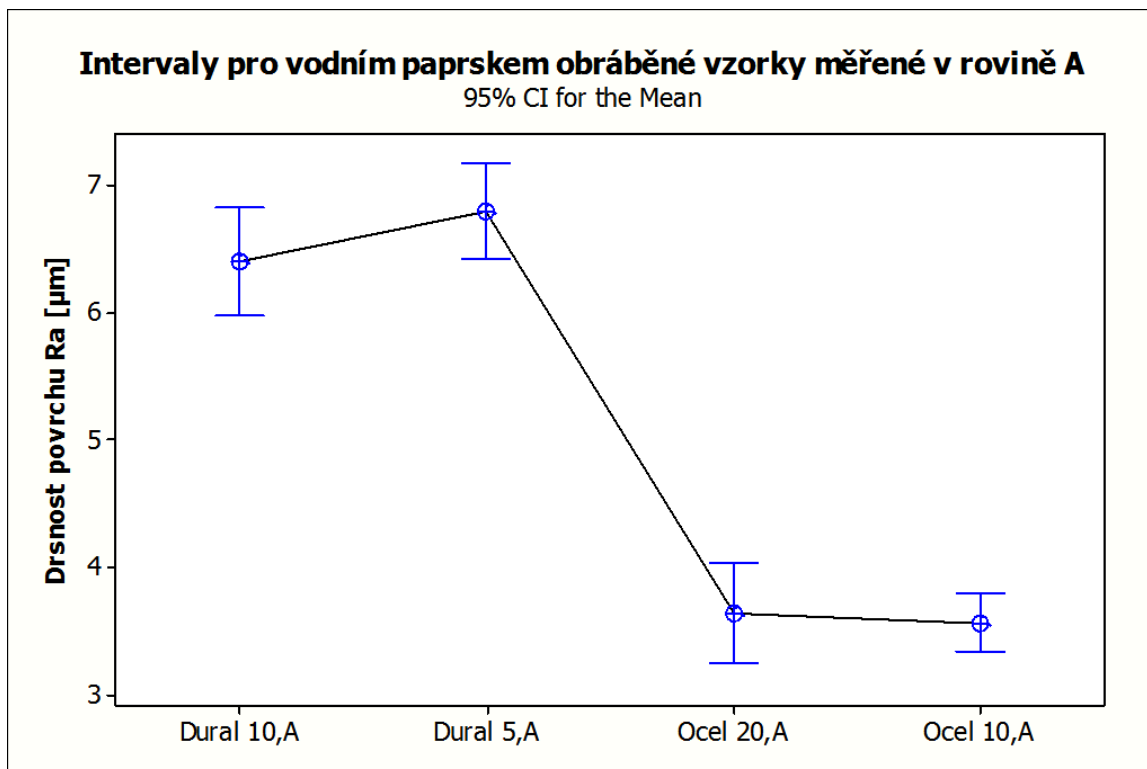
Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
Dural 10,B	8,160	0,503	6,16	7,380	7,728	8,215	8,648	8,710	0,920
Dural 5,B	7,541	0,599	7,94	6,700	7,098	7,510	7,873	8,680	0,775
Ocel 20,B	3,651	0,526	14,41	3,030	3,117	3,650	4,192	4,480	1,075
Ocel 10,B	3,8770	0,2637	6,80	3,5500	3,700	3,8350	4,017	4,4400	0,317
Ocel 1,5,B	5,889	0,647	10,99	4,980	5,325	5,825	6,458	6,940	1,132

Rovina C

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
Dural 10,C	7,387	0,391	5,29	6,890	7,135	7,305	7,585	8,250	0,450
Dural 5,C	7,639	0,522	6,83	6,780	7,290	7,720	8,063	8,320	0,772
Ocel 20,C	4,054	0,396	9,76	3,610	3,750	3,925	4,395	4,740	0,645
Ocel 10,C	4,338	0,3128	7,21	3,7200	4,192	4,3050	4,577	4,7700	0,385

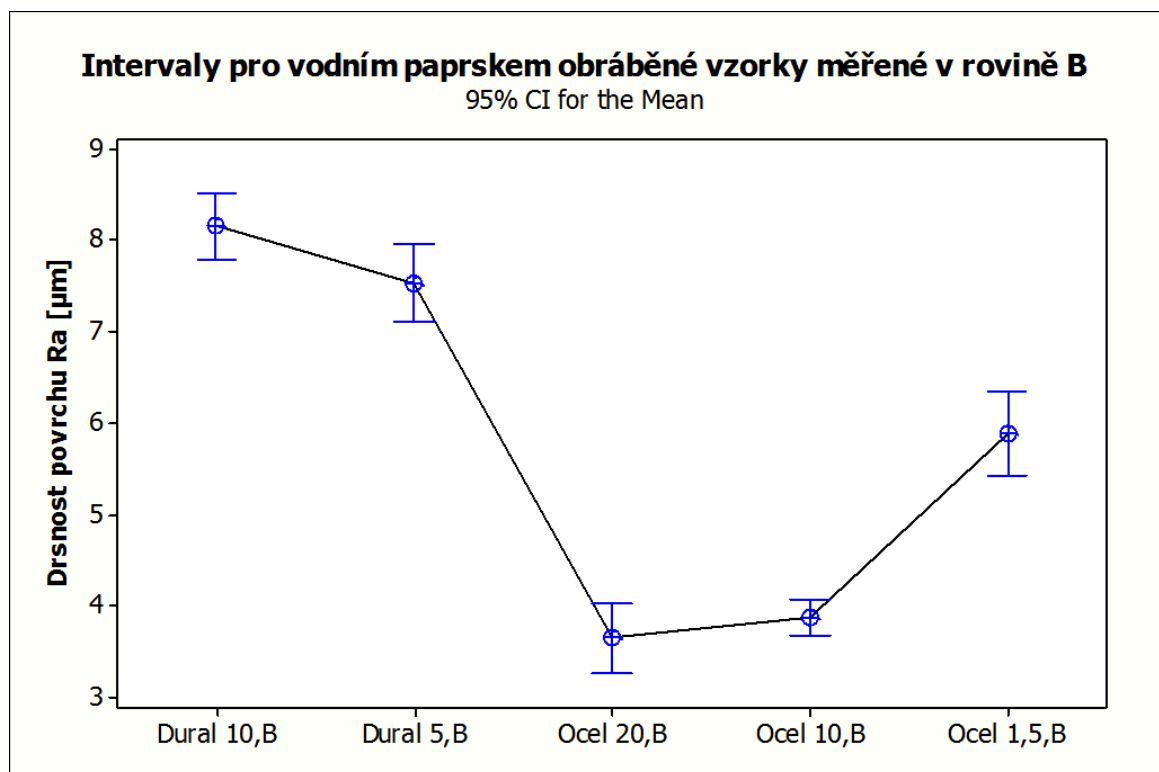
Vysvětlivky:

Variable – materiál a jeho tloušťka, *Mean* – aritmetický průměr, *StDev* – směrodatná odchylka, *CoefVar* – variační koeficient, *Minimum* – minimální naměřená hodnota, *Q1* – první kvartil, *Median* – medián, *Q3* – třetí kvartil, *Maximum* – maximální naměřená hodnota, *IQR* – interkvartilové rozpětí



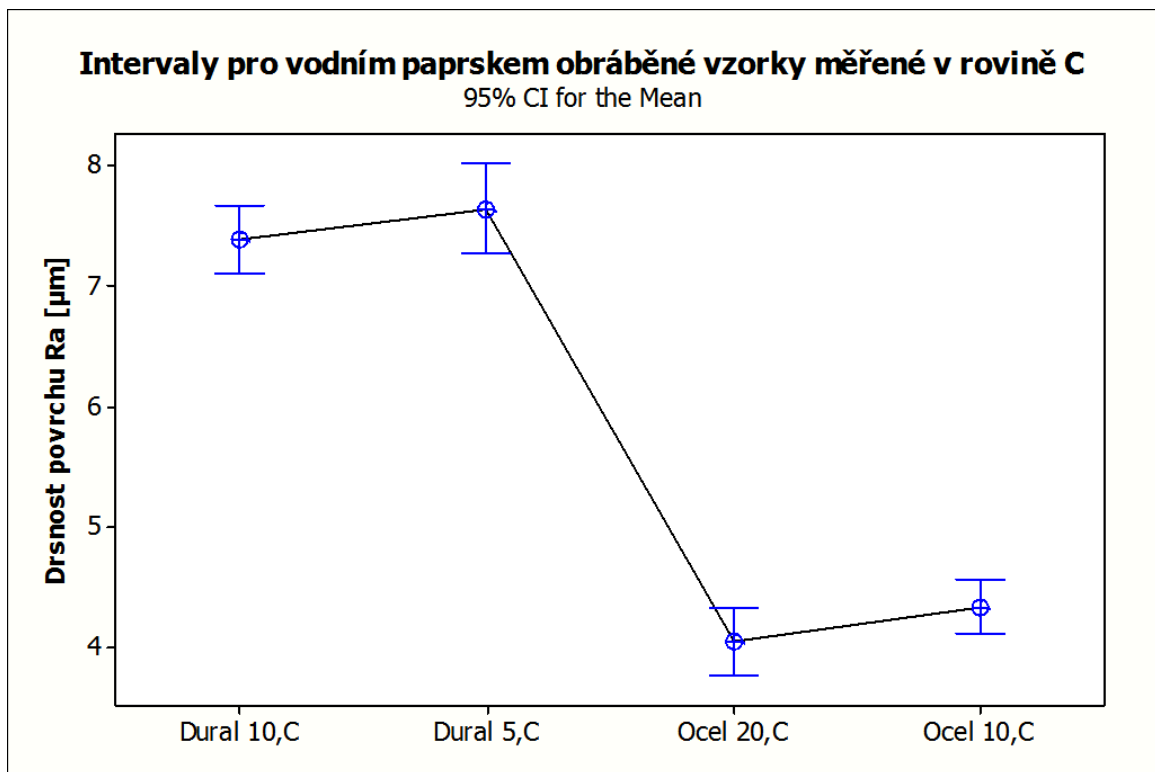
Obr. 81: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené vodním paprskem, měřeno v rovině A

Interpretace výsledků pro vzorek z duralu, tloušťky 10 mm, měřeno v rovině A: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$ leží neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ v konfidenčním intervalu od $5,9812 \mu\text{m}$ do $6,8208 \mu\text{m}$.



Obr. 82: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené vodním paprskem, měřeno v rovině B

Interpretace výsledků pro vzorek z duralu, tloušťky 10 mm, měřeno v rovině A: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$ leží neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ v konfidenčním intervalu od $7,8002 \mu\text{m}$ do $8,5198 \mu\text{m}$.



Obr. 83: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené vodním paprskem, měřeno v rovině C

Interpretace výsledků pro vzorek z duralu, tloušťky 10 mm, měřeno v rovině A: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$ leží neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ v konfidenčním intervalu od 7,1074 μm do 7,6666 μm .

7.2.7 Zhodnocení

Z grafů a tedy i výsledků je patrné, že drsnost povrchu při obrábění vodním paprskem je vyšší u měkčího materiálu, tedy duralu, téměř bez závislosti na tloušťce materiálu. Nejnižší je drsnost u hrany vstupu paprsku do materiálu, dále se téměř nemění.

U ocelových vzorků je drsnost povrchu taktéž téměř stejná u tloušťky 20 mm i 10 mm. Rozdíl tvoří pouze tenký materiál 1,5 mm, který má drsnost povrchu vyšší než drsnost ostatních ocelových vzorků, ale drsnost stále nepřesahuje hodnoty naměřené u duralu. Zvýšená drsnost u tohoto vzorku je dána vznikajícím otřepem.

7.3 Vyhodnocení kuželovitosti vzorků při řezání laserem

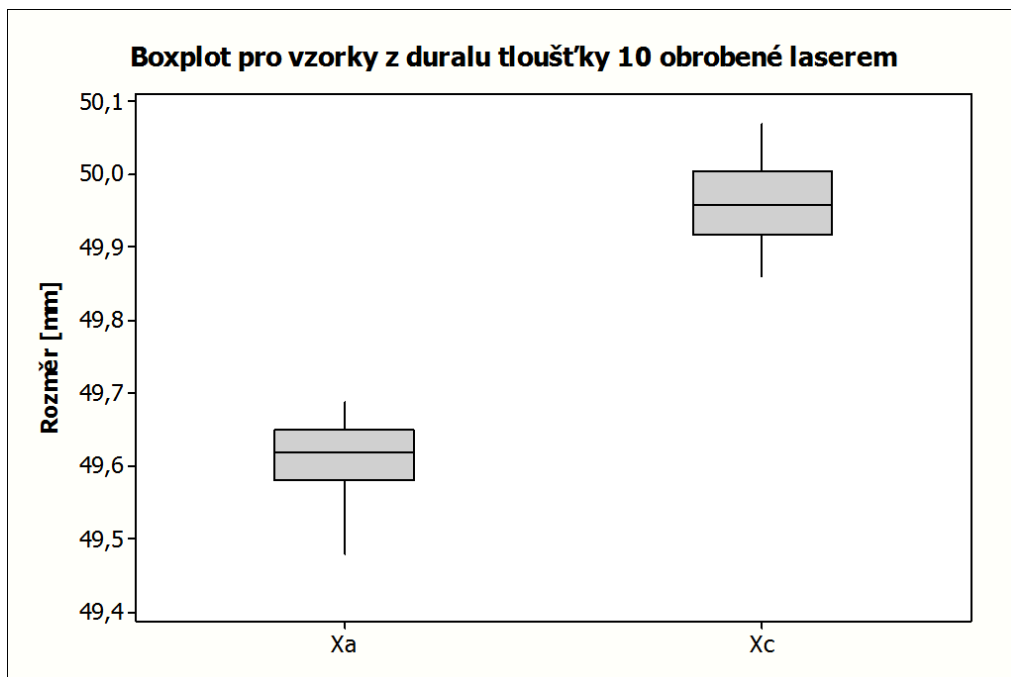
Vzorky byly měřeny mikrometrem ve dvou rovinách, v rovině A a C, v každé 10 měření. Naměřené hodnoty byly statisticky vyhodnoceny a z nich byl poté spočítán rozdíl v rozměrech horní a dolní hrany.

7.3.1 Dural tloušťky 10 mm

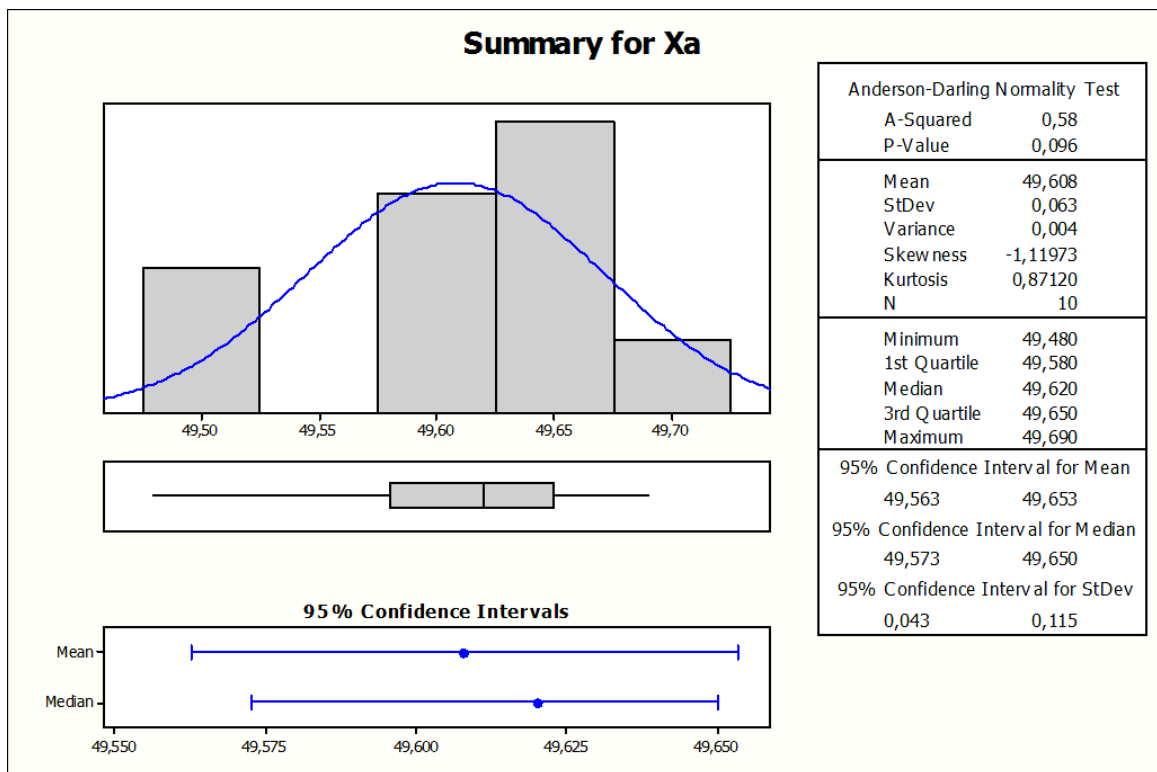
Tab. 14: Kuželovitost vzorku z duralu tl. 10, laser

DURAL, tloušťka 10 mm, rovina A, LASER						
Č.měření	x_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,48	49,61	-0,13	0,0164	0,0040	0,0001
2	49,52		-0,09	0,0077		
3	49,61		0,00	0,0000		
4	49,64		0,03	0,0010		
5	49,69		0,08	0,0067		
6	49,65		0,04	0,0018		
7	49,60		-0,01	0,0001		
8	49,61		0,00	0,0000		
9	49,65		0,04	0,0018		
10	49,63		0,02	0,0005		
DURAL, tloušťka 10 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,86	49,96	-0,10	0,0106	0,0037	0,0001
2	50,00		0,04	0,0014		
3	49,94		-0,02	0,0005		
4	50,07		0,11	0,0114		
5	49,92		-0,04	0,0018		
6	50,02		0,06	0,0032		
7	49,92		-0,04	0,0018		
8	49,99		0,03	0,0007		
9	49,98		0,02	0,0003		
10	49,93		-0,03	0,0011		

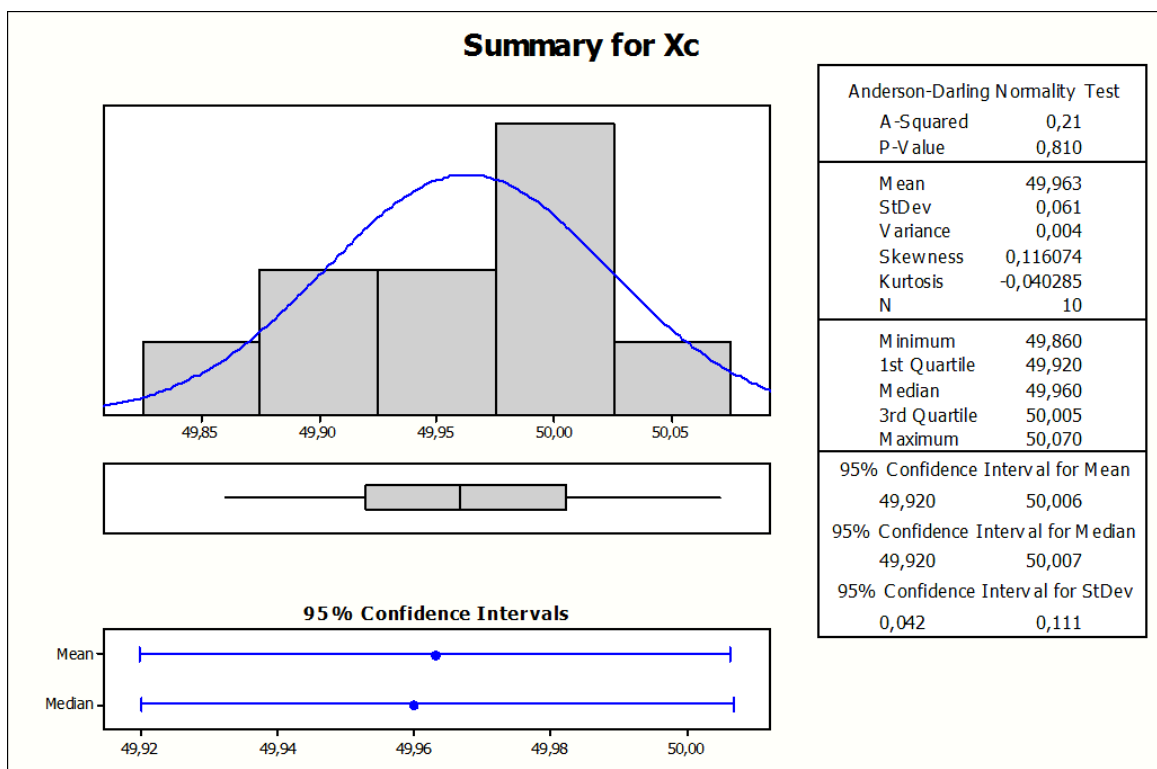
Kuželovitost obrobku je 0,35 mm.



Obr. 84: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu duralu tl. 10



Obr. 85: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 10 v rovině A



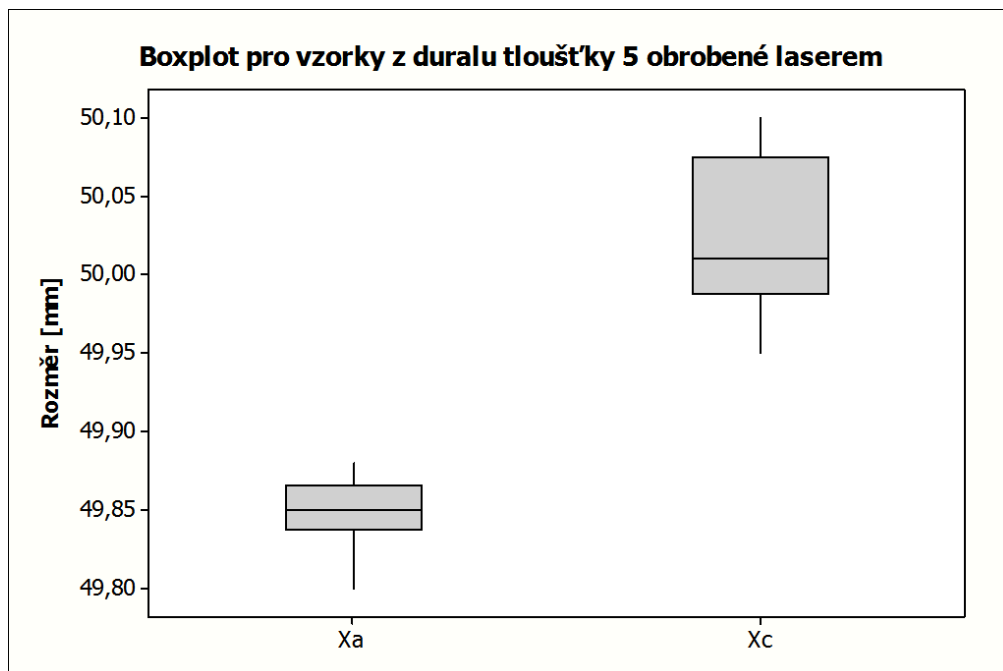
Obr. 86: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 10 v rovině C

7.3.2 Dural tloušťky 5 mm

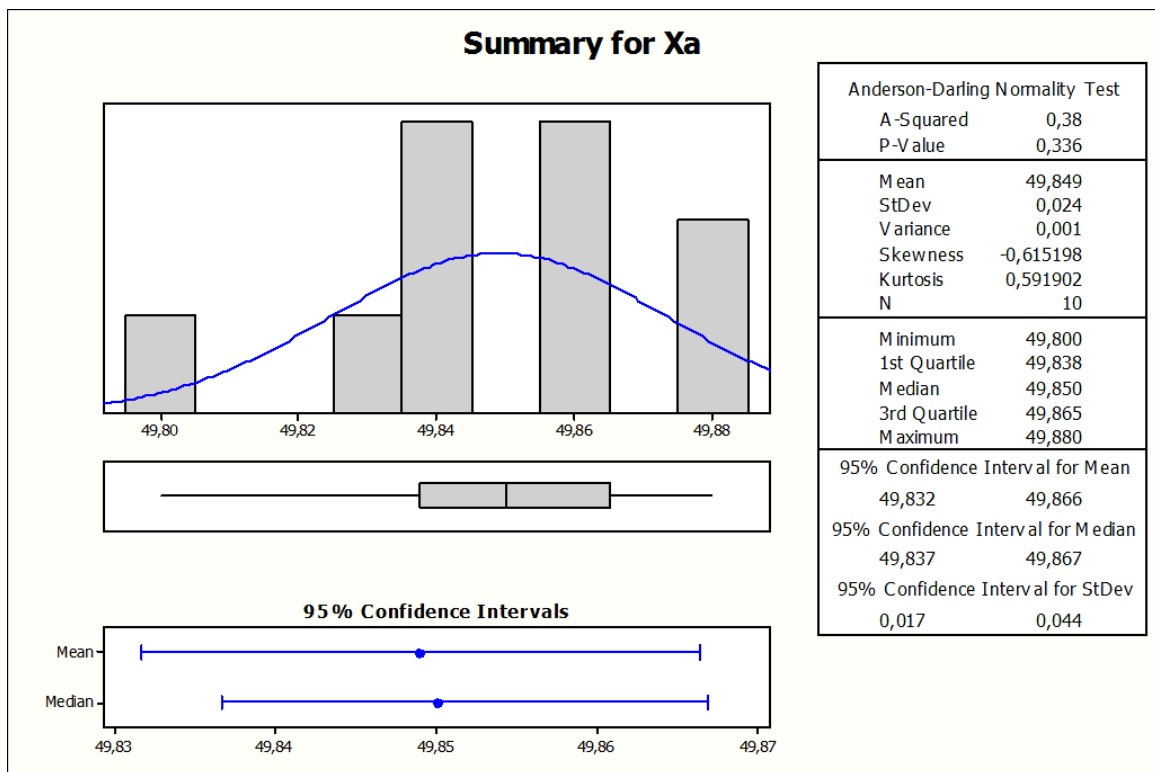
Tab. 15: Kuželovitost vzorku z duralu tl. 5, laser

DURAL, tloušťka 5 mm, rovina A, LASER						
Č.měření	x_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,80	49,85	-0,05	0,0024	0,0006	0,0000
2	49,86		0,01	0,0001		
3	49,88		0,03	0,0010		
4	49,84		-0,01	0,0001		
5	49,86		0,01	0,0001		
6	49,83		-0,02	0,0004		
7	49,84		-0,01	0,0001		
8	49,86		0,01	0,0001		
9	49,88		0,03	0,0010		
10	49,84		-0,01	0,0001		
DURAL, tloušťka 5 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	50,10	50,03	0,08	0,0056	0,0025	0,0001
2	49,99		-0,03	0,0012		
3	50,05		0,02	0,0006		
4	50,00		-0,02	0,0006		
5	50,07		0,05	0,0020		
6	49,95		-0,07	0,0056		
7	50,09		0,07	0,0042		
8	49,98		-0,05	0,0020		
9	50,00		-0,02	0,0006		
10	50,02		0,00	0,0000		

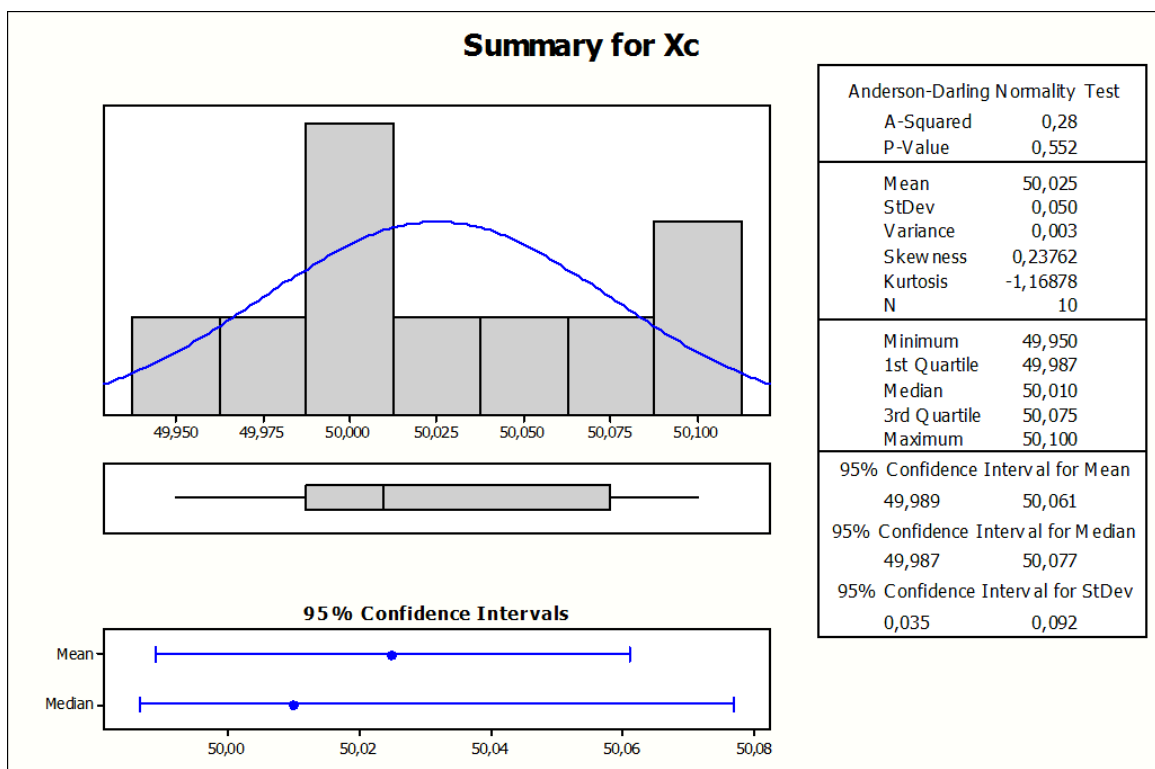
Kuželovitost obrobku je 0,18 mm.



Obr. 87: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu duralu tl. 5



Obr. 88: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 5 v rovině A



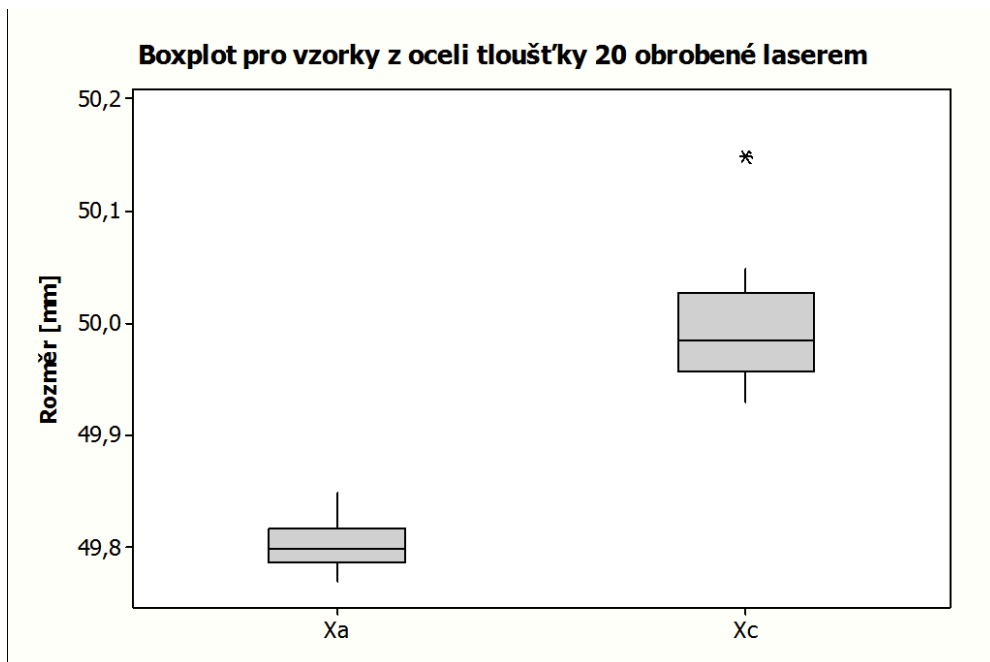
Obr. 89: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 5 v rovině C

7.3.3 Ocel tloušťky 20 mm

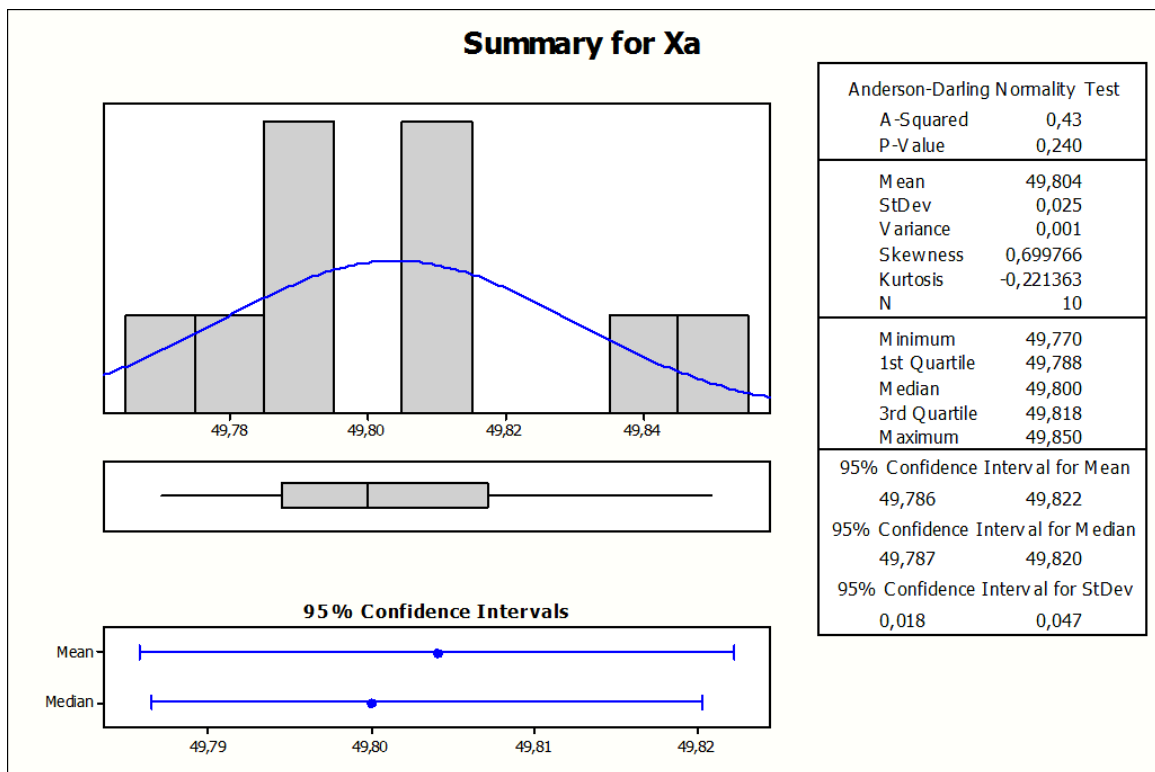
Tab. 16: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 20, laser

OCEL, tloušťka 20 mm, rovina A, LASER						
Č.měření	x_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,78	49,80	-0,02	0,0006	0,0006	0,0000
2	49,77		-0,03	0,0012		
3	49,85		0,05	0,0021		
4	49,81		0,01	0,0000		
5	49,84		0,04	0,0013		
6	49,81		0,01	0,0000		
7	49,79		-0,01	0,0002		
8	49,79		-0,01	0,0002		
9	49,81		0,01	0,0000		
10	49,79		-0,01	0,0002		
OCEL, tloušťka 20 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,99	50,00	-0,01	0,0001	0,0040	0,0001
2	50,15		0,15	0,0225		
3	49,96		-0,04	0,0016		
4	49,95		-0,05	0,0025		
5	49,98		-0,02	0,0004		
6	50,05		0,05	0,0025		
7	50,02		0,02	0,0004		
8	49,97		-0,03	0,0009		
9	49,93		-0,07	0,0049		
10	50,00		0,00	0,0000		

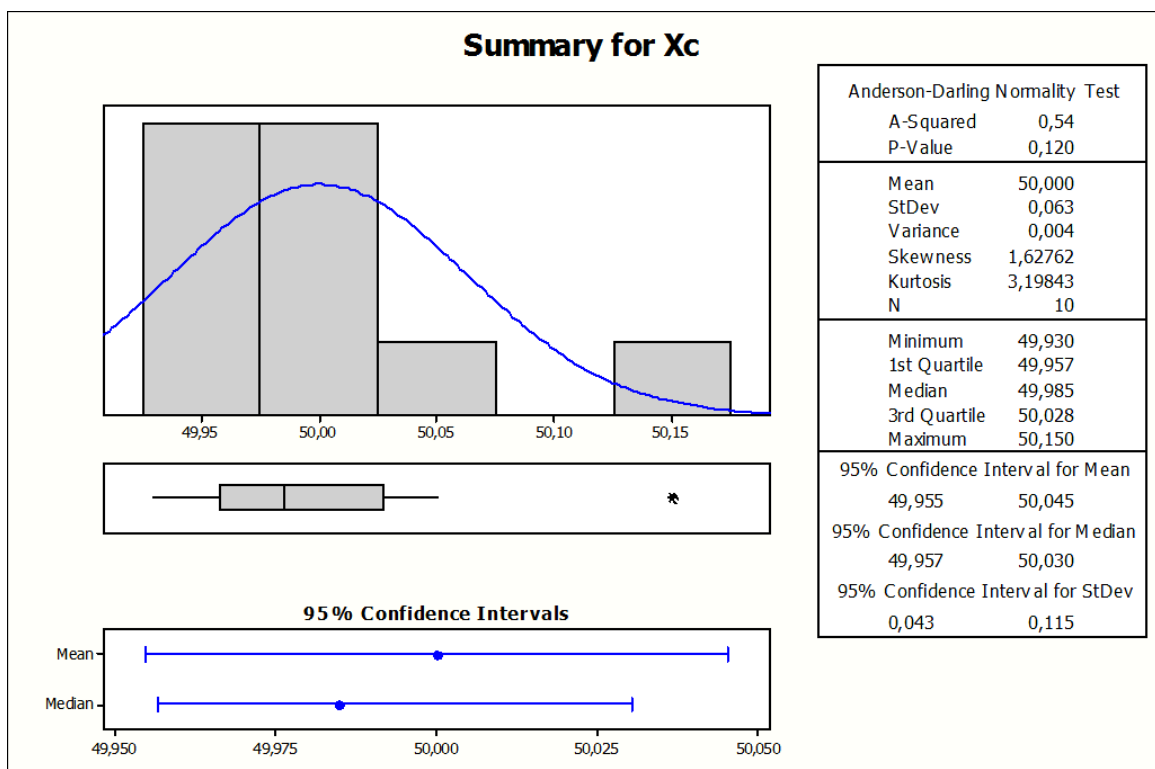
Kuželovitost obrobku je 0,2 mm.



Obr. 90: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 20



Obr. 91: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 20 v rovině A



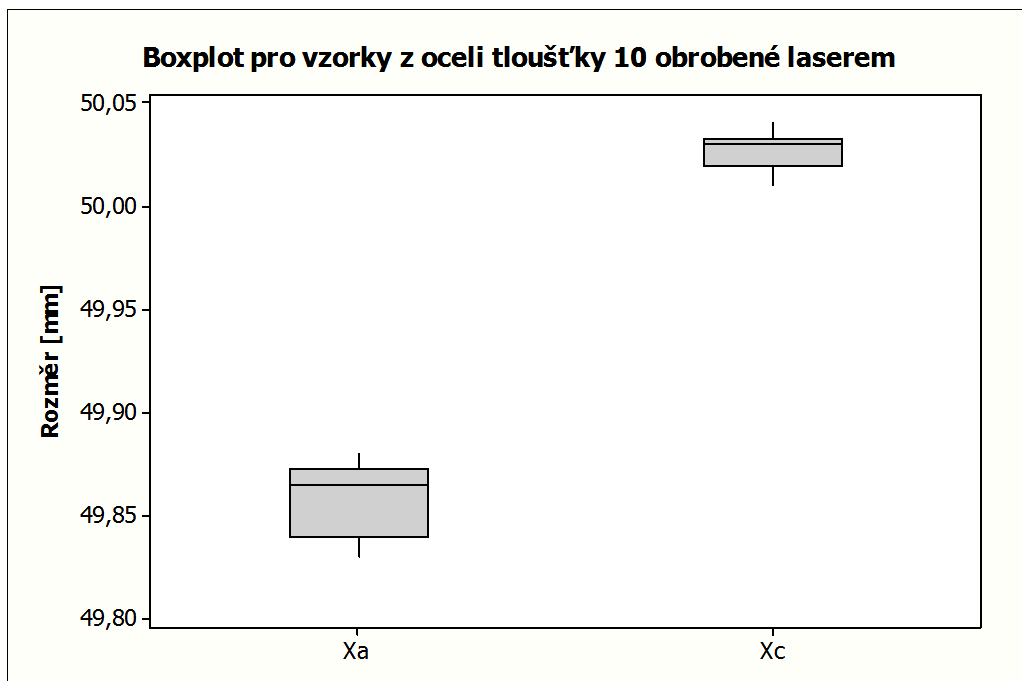
Obr. 92: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 20 v rovině C

7.3.4 Ocel tloušťky 10 mm

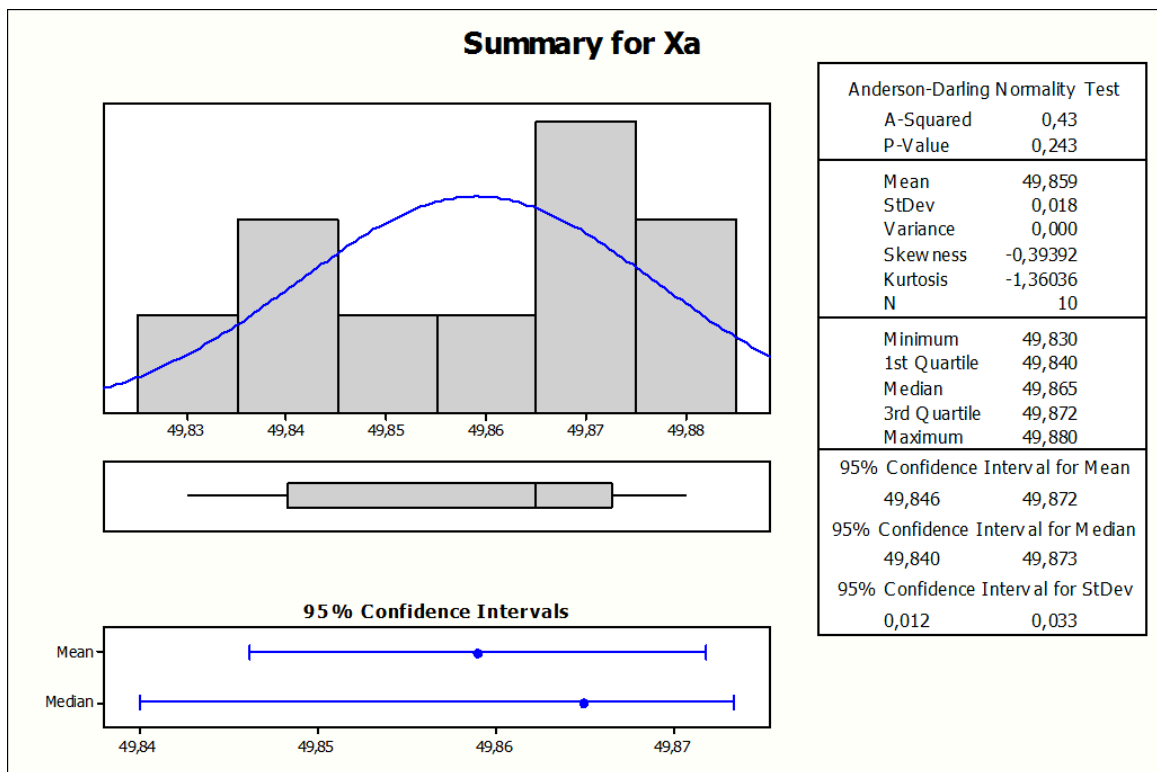
Tab. 17: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 10, laser

OCEL, tloušťka 10 mm, rovina A, LASER						
Č.měření	x_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,87	49,86	0,01	0,0001	0,0003	0,0000
2	49,86		0,00	0,0000		
3	49,88		0,02	0,0004		
4	49,85		-0,01	0,0001		
5	49,88		0,02	0,0004		
6	49,83		-0,03	0,0008		
7	49,84		-0,02	0,0004		
8	49,84		-0,02	0,0004		
9	49,87		0,01	0,0001		
10	49,87		0,01	0,0001		
OCEL, tloušťka 10 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	50,04	50,03	0,01	0,0001	0,0001	0,0000
2	50,03		0,00	0,0000		
3	50,03		0,00	0,0000		
4	50,03		0,00	0,0000		
5	50,02		-0,01	0,0001		
6	50,03		0,00	0,0000		
7	50,04		0,01	0,0001		
8	50,01		-0,02	0,0003		
9	50,02		-0,01	0,0001		
10	50,03		0,00	0,0000		

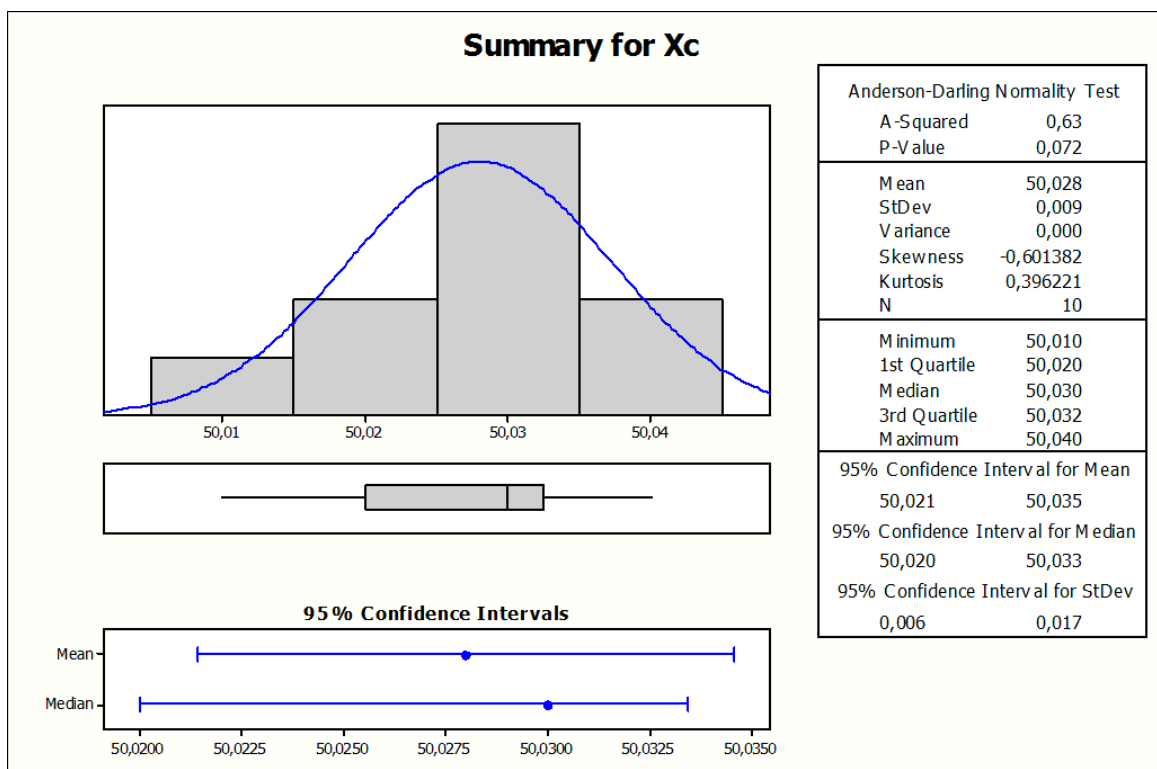
Kuželovitost obrobku je 0,17 mm.



Obr. 93: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 10



Obr. 94: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 10 v rovině A



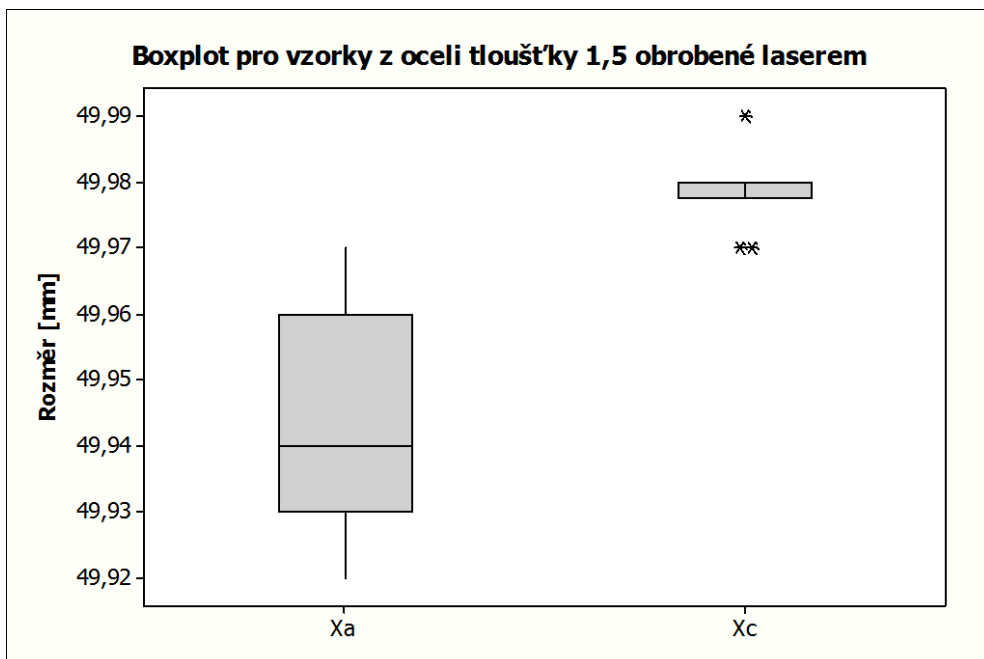
Obr. 95: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 10 v rovině C

7.3.5 Ocel tloušťky 1,5 mm

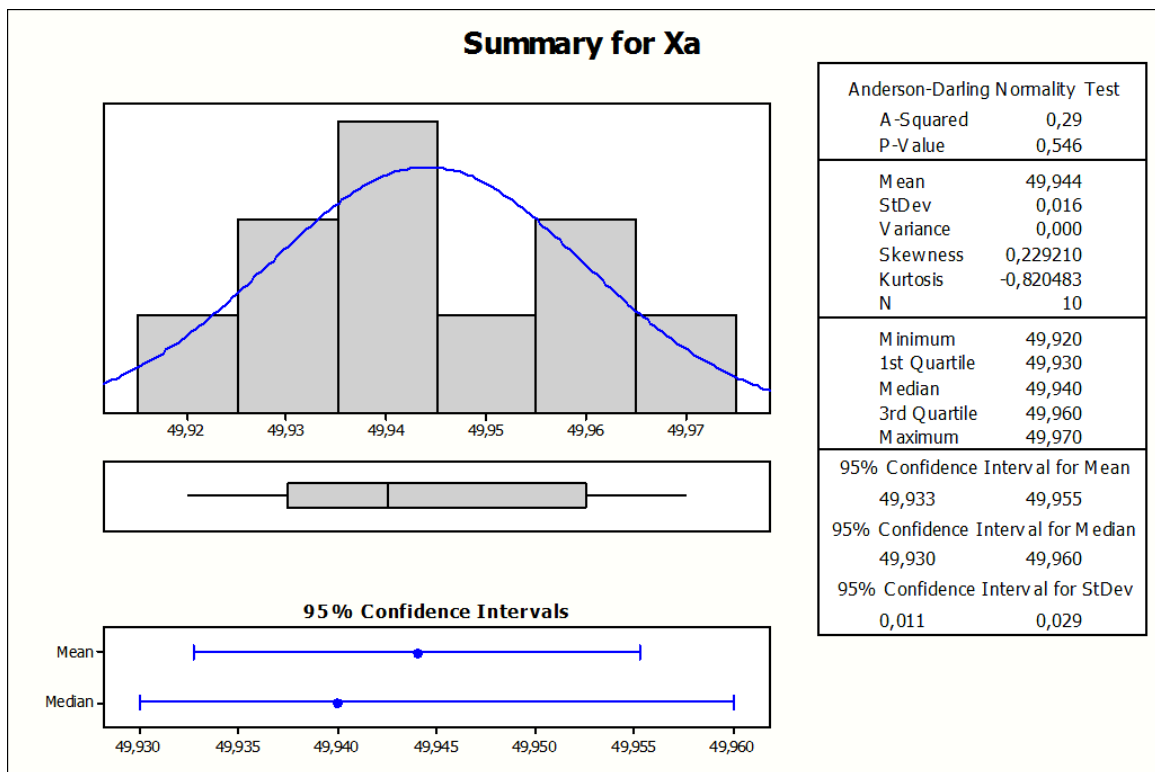
Tab. 18: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 1,5, laser

OCEL, tloušťka 1,5 mm, rovina A, LASER						
Č.měření	x_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,97	49,94	0,03	0,0007	0,0002	0,0000
2	49,92		-0,02	0,0006		
3	49,96		0,02	0,0003		
4	49,94		0,00	0,0000		
5	49,93		-0,01	0,0002		
6	49,94		0,00	0,0000		
7	49,96		0,02	0,0003		
8	49,95		0,01	0,0000		
9	49,93		-0,01	0,0002		
10	49,94		0,00	0,0000		
OCEL, tloušťka 1,5 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,98	49,98	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
2	49,98		0,00	0,0000		
3	49,98		0,00	0,0000		
4	49,98		0,00	0,0000		
5	49,98		0,00	0,0000		
6	49,97		-0,01	0,0001		
7	49,98		0,00	0,0000		
8	49,99		0,01	0,0001		
9	49,98		0,00	0,0000		
10	49,97		-0,01	0,0001		

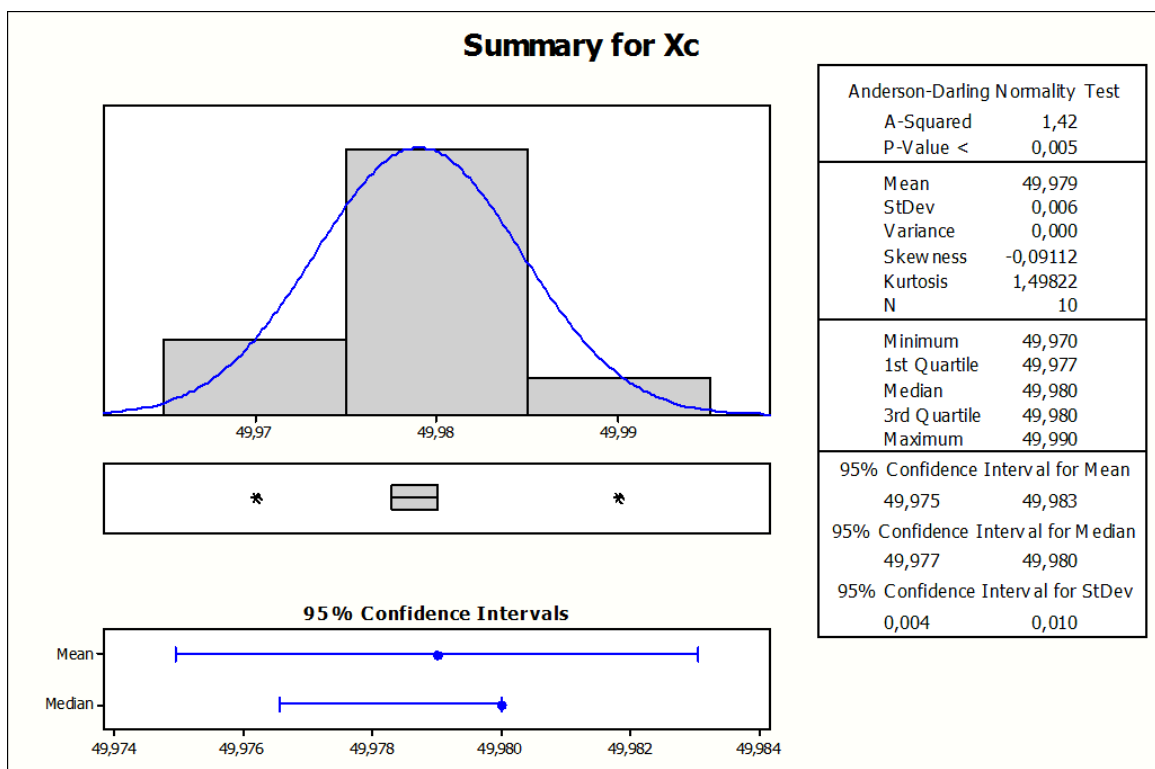
Kuželovitost obrobku je 0,04 mm.



Obr. 96: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 1,5



Obr. 97: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 1,5 v rovině A



Obr. 98: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 1,5 v rovině C

7.3.6 Přehled výsledků měření kuželovitosti při obrábění laserem

Rovina A

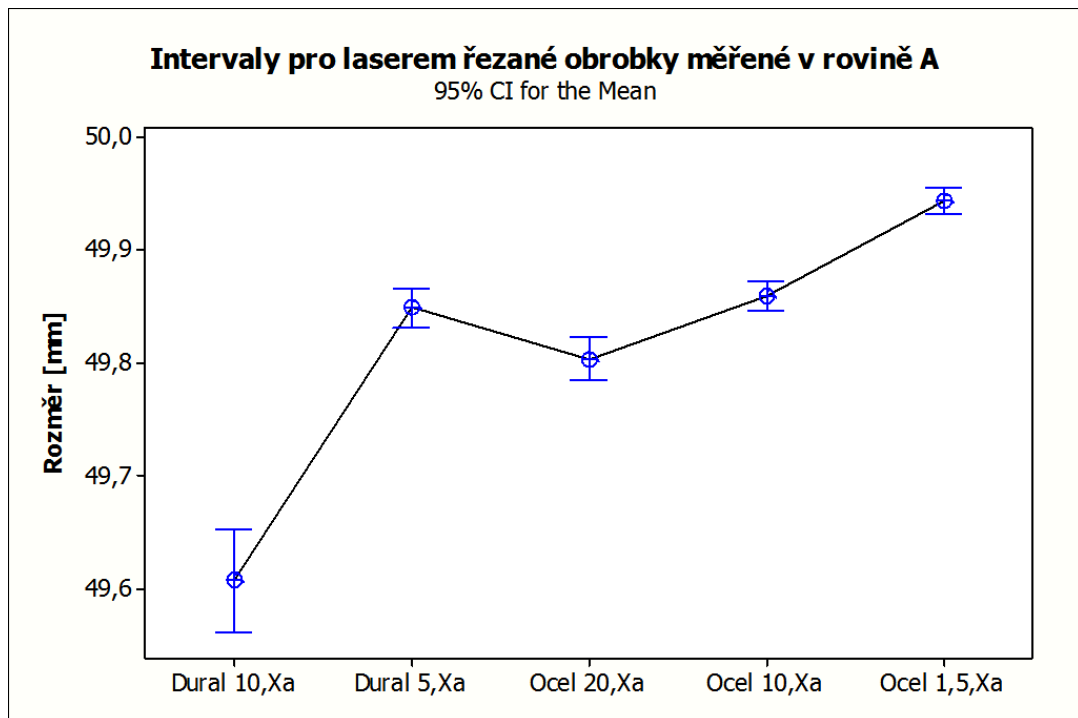
Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
Dural 10,Xa	49,608	0,0632	0,13	49,480	49,580	49,620	49,650	49,690	0,0700
Dural 5,Xa	49,849	0,0242	0,05	49,800	49,838	49,850	49,865	49,880	0,0275
Ocel 20,Xa	49,804	0,0255	0,05	49,770	49,788	49,800	49,818	49,850	0,0300
Ocel 10,Xa	49,859	0,0179	0,04	49,830	49,840	49,865	49,872	49,880	0,0325
Ocel 1,5,Xa	49,944	0,0158	0,03	49,920	49,930	49,940	49,960	49,970	0,0300

Rovina C

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
Dural 10,Xc	49,963	0,0606	0,12	49,860	49,920	49,960	50,005	50,070	0,0850
Dural 5,Xc	50,025	0,0502	0,10	49,950	49,987	50,010	50,075	50,100	0,0875
Ocel 20,Xc	50,000	0,0631	0,13	49,930	49,957	49,985	50,028	50,150	0,0700
Ocel 10,Xc	50,028	0,00919	0,02	50,010	50,020	50,030	50,032	50,040	0,0125
Ocel 1,5,Xc	49,979	0,00568	0,01	49,970	49,977	49,980	49,980	49,990	0,0025

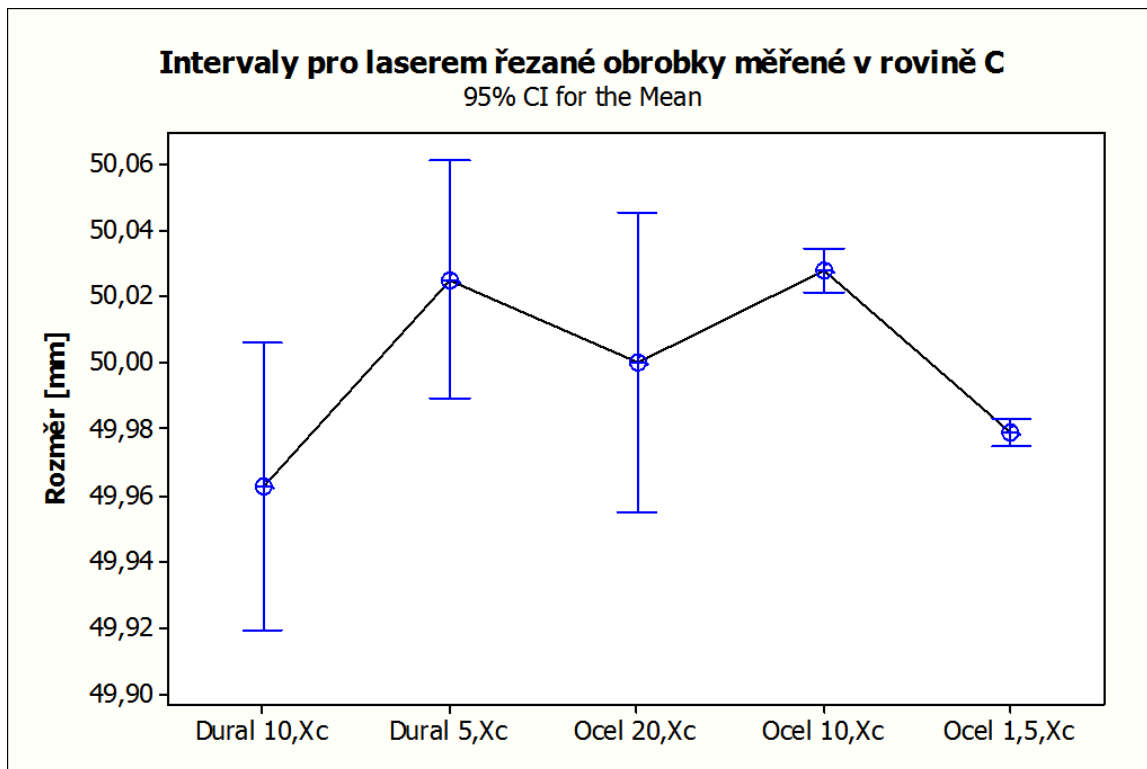
Vysvětlivky:

Variable – materiál a jeho tloušťka, *Mean* – aritmetický průměr, *StDev* – směrodatná odchylka, *CoefVar* – variační koeficient, *Minimum* – minimální naměřená hodnota, *Q1* – první kvartil, *Median* – medián, *Q3* – třetí kvartil, *Maximum* – maximální naměřená hodnota, *IQR* – interkvartilové rozpětí



Obr. 99: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobene laserem, měreno v rovině A

Interpretace výsledků pro vzorek z duralu, tloušťky 10 mm, měřeno v rovině A: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$ leží neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ v konfidenčním intervalu od 49,563 μm do 49,653 μm .



Obr. 100: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobene laserem, měřeno v rovině C

Interpretace výsledků pro vzorek z duralu, tloušťky 10 mm, měřeno v rovině A: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$ leží neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ v konfidenčním intervalu od 49,920 μm do 50,007 μm .

Tab. 19: Tabulka kuželovitosti

Vzorek	Rozměr v rovině A	Rozměr v rovině C
Dural 10 mm	49,61	49,96
Dural 5 mm	49,85	50,03
Ocel 20 mm	49,80	50,00
Ocel 10 mm	49,86	50,03
Ocel 1,5 mm	49,94	49,98

7.3.7 Zhodnocení

Z výsledků vyplývá, že při obrábění laserem dochází ke značné kuželovitosti, až na výjimku v podobě nejtenčího plechu. To nám může někdy ovlivnit celý výrobek a je třeba s tímto faktem počítat při návrhu.

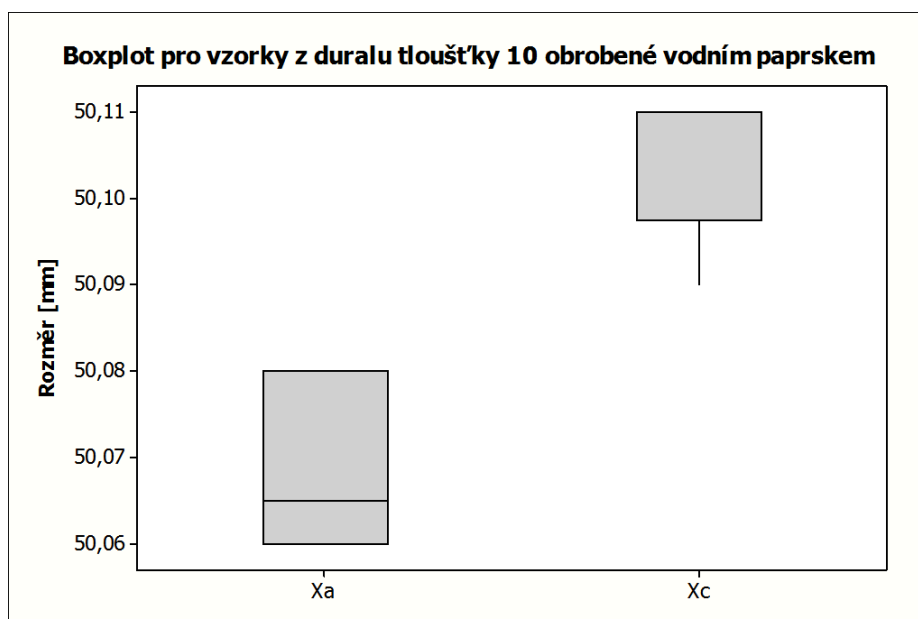
7.4 Vyhodnocení kuželovitosti vzorků při řezání vodním paprskem

7.4.1 Dural tloušťky 10 mm

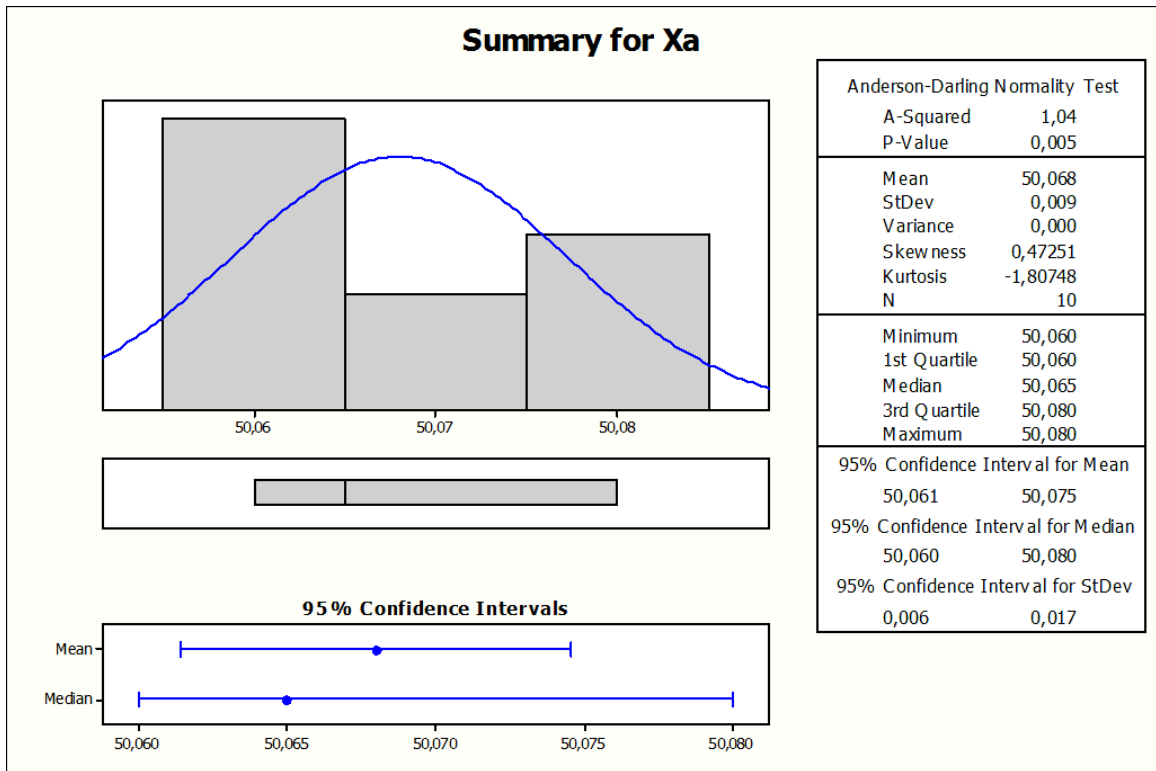
Tab. 20: Kuželovitost vzorku z duralu tl.10, vodní paprsek

DURAL, tloušťka 10 mm, rovina A, VODA						
Č.měření	x_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	50,08	50,07	0,01	0,0001	0,0001	0,0000
2	50,06		-0,01	0,0001		
3	50,06		-0,01	0,0001		
4	50,06		-0,01	0,0001		
5	50,06		-0,01	0,0001		
6	50,08		0,01	0,0001		
7	50,07		0,00	0,0000		
8	50,06		-0,01	0,0001		
9	50,08		0,01	0,0001		
10	50,07		0,00	0,0000		
DURAL, tloušťka 10 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	50,11	50,10	0,01	0,0000	0,0001	0,0000
2	50,11		0,01	0,0000		
3	50,09		-0,01	0,0002		
4	50,11		0,01	0,0000		
5	50,10		0,00	0,0000		
6	50,11		0,01	0,0000		
7	50,09		-0,01	0,0002		
8	50,10		0,00	0,0000		
9	50,11		0,01	0,0000		
10	50,11		0,01	0,0000		

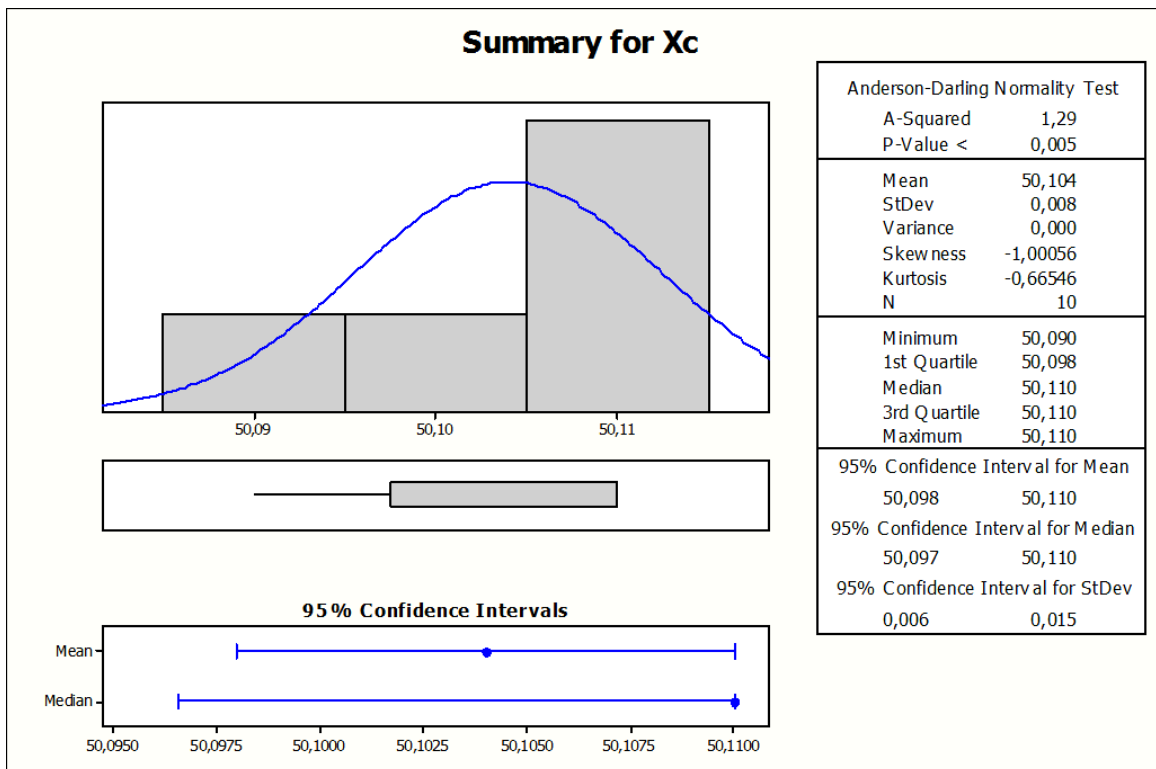
Kuželovitost obrobku je 0,03 mm.



Obr. 101: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu duralu tl. 10



Obr. 102: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 10 v rovině A



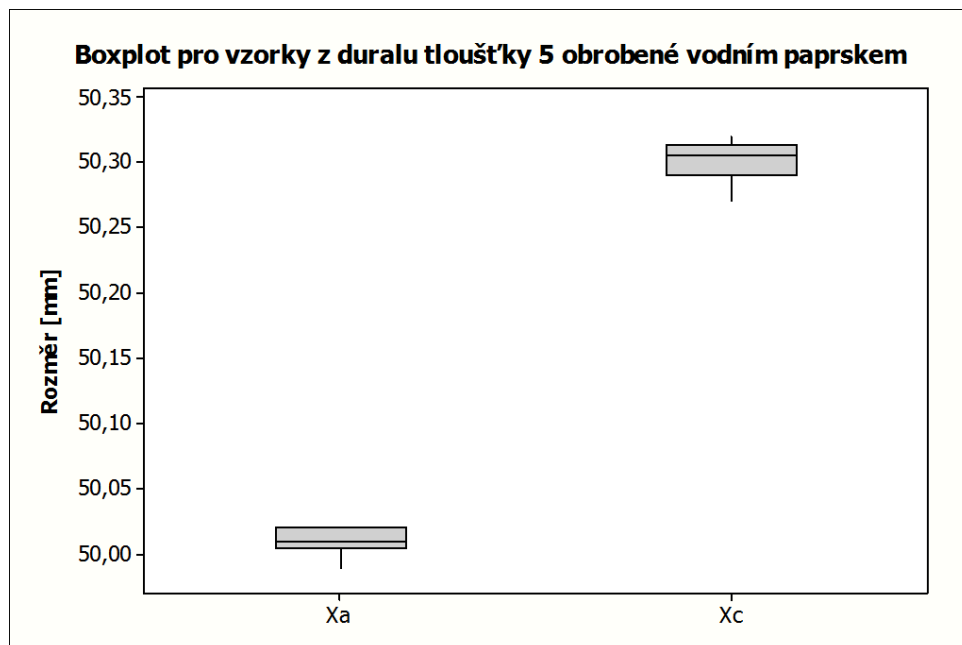
Obr. 103: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 10 v rovině C

7.4.2 Dural tloušťky 5 mm

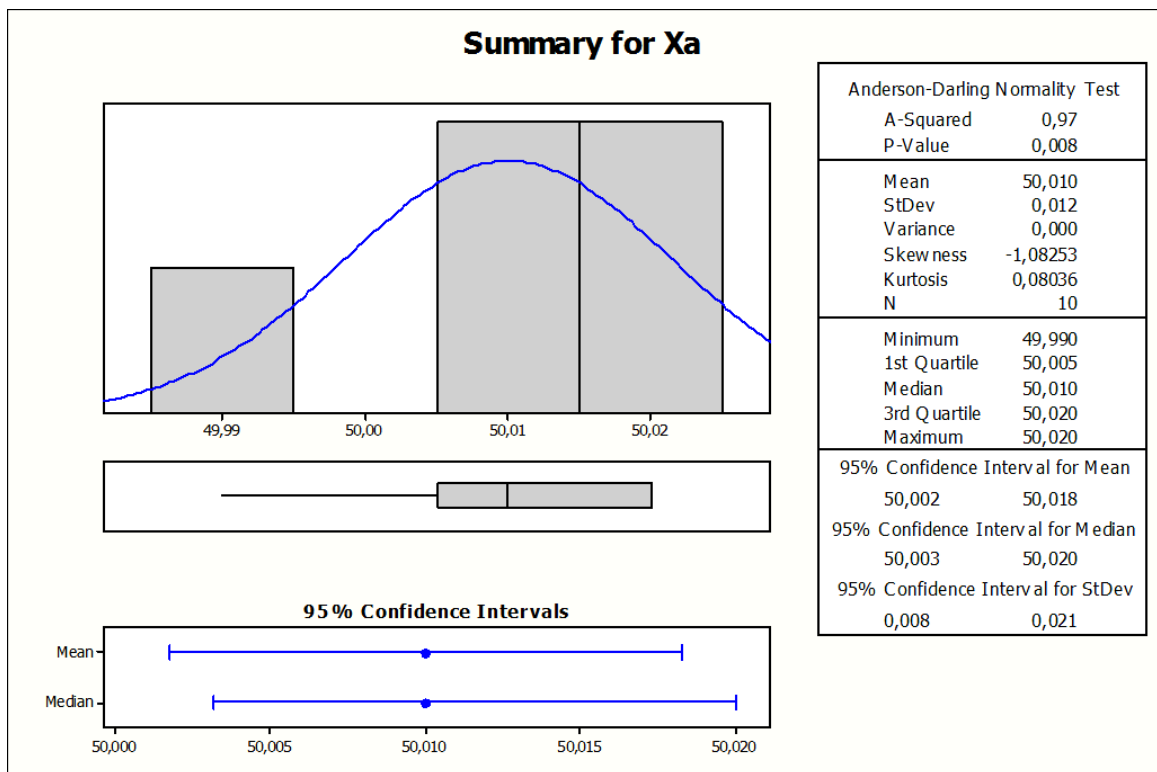
Tab. 21: Kuželovitost vzorku z duralu tl. 5, vodní paprsek

DURAL, tloušťka 5 mm, rovina A, VODA						
Č.měření	x_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	50,02	50,01	0,01	0,0001	0,0001	0,0000
2	50,01		0,00	0,0000		
3	50,01		0,00	0,0000		
4	50,02		0,01	0,0001		
5	49,99		-0,02	0,0004		
6	50,01		0,00	0,0000		
7	50,02		0,01	0,0001		
8	50,02		0,01	0,0001		
9	49,99		-0,02	0,0004		
10	50,01		0,00	0,0000		
DURAL, tloušťka 5 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	50,27	50,30	-0,03	0,0010	0,0003	0,0000
2	50,30		0,00	0,0000		
3	50,31		0,01	0,0001		
4	50,31		0,01	0,0001		
5	50,31		0,01	0,0001		
6	50,32		0,02	0,0004		
7	50,29		-0,01	0,0001		
8	50,29		-0,01	0,0001		
9	50,29		-0,01	0,0001		
10	50,32		0,02	0,0004		

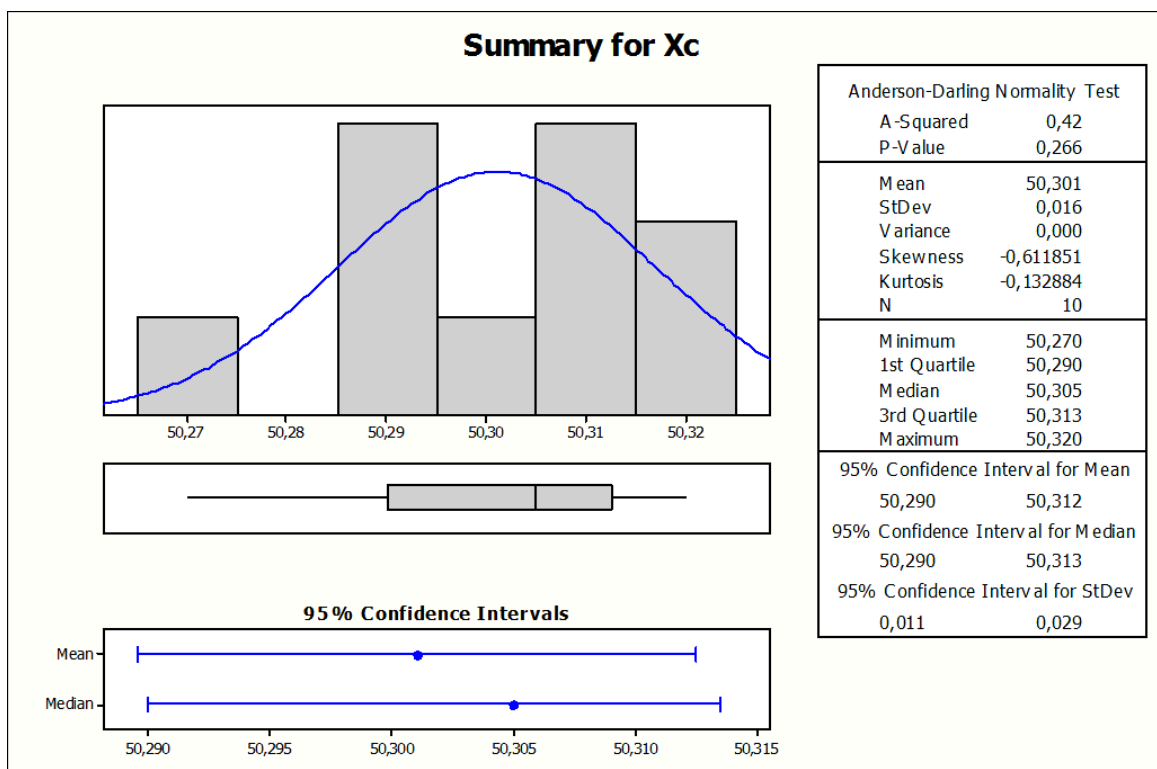
Kuželovitost obrobku je 0,29 mm.



Obr. 104: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu duralu tl. 5



Obr. 105: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 5 v rovině A



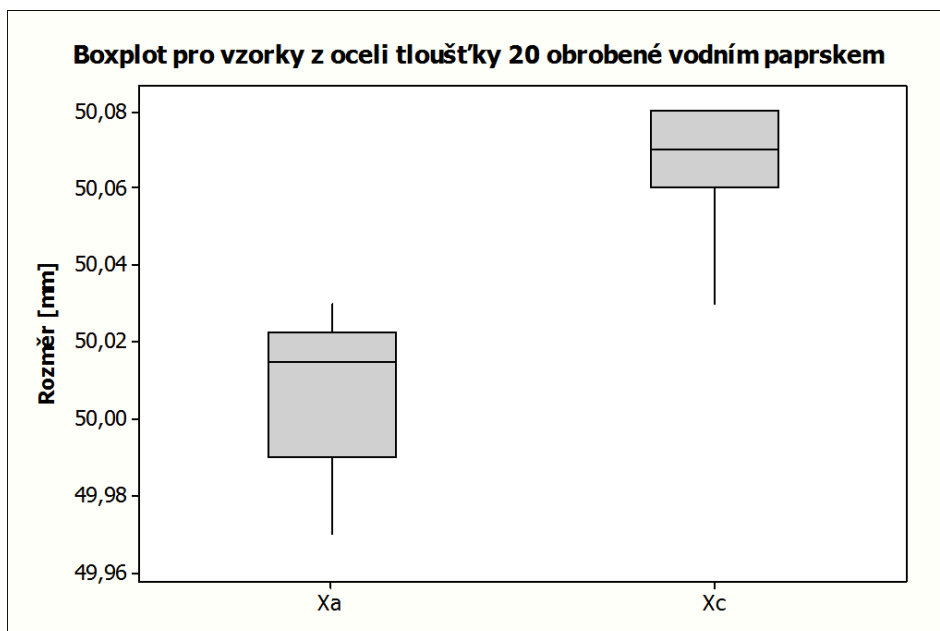
Obr. 106: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 5 v rovině C

7.4.3 Ocel tloušťky 20 mm

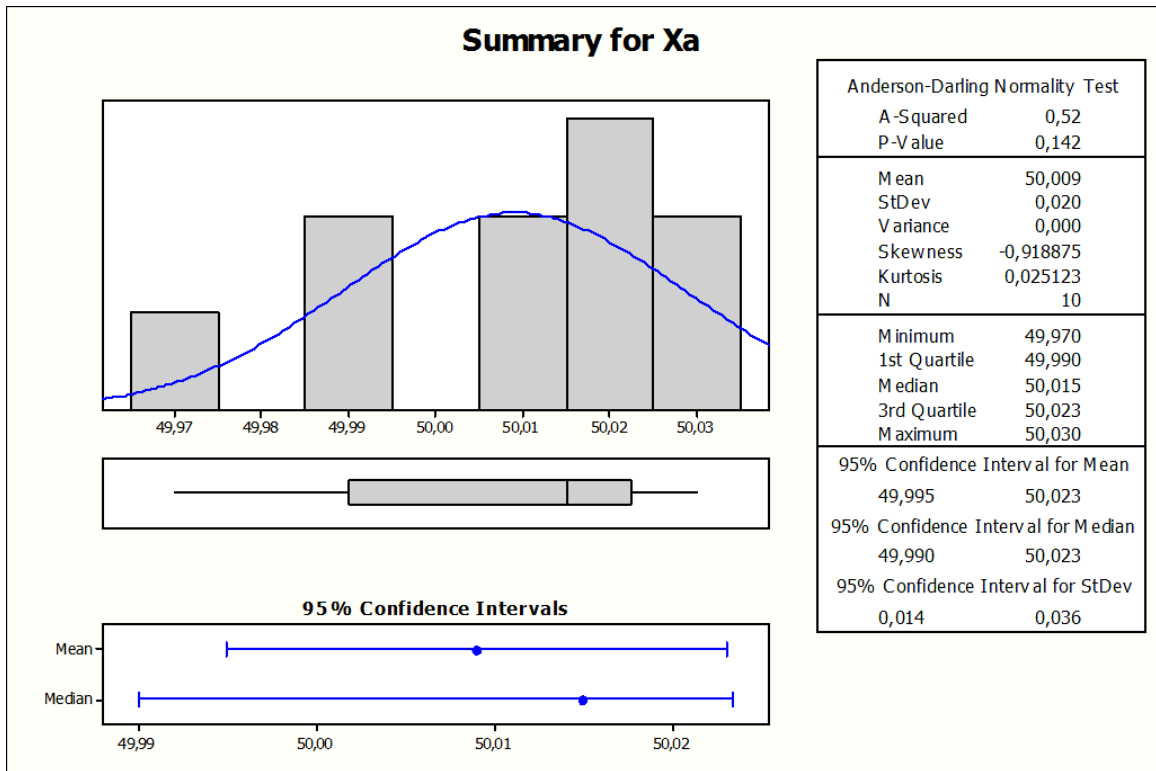
Tab. 22: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 20, vodní paprsek

OCEL, tloušťka 20 mm, rovina A, VODA						
Č.měření	x_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	49,99	50,01	-0,02	0,0004	0,0004	0,0000
2	50,02		0,01	0,0001		
3	50,03		0,02	0,0004		
4	49,99		-0,02	0,0004		
5	50,03		0,02	0,0004		
6	49,97		-0,04	0,0015		
7	50,02		0,01	0,0001		
8	50,01		0,00	0,0000		
9	50,02		0,01	0,0001		
10	50,01		0,00	0,0000		
OCEL, tloušťka 20 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	50,03	50,07	-0,04	0,0013	0,0002	0,0000
2	50,06		-0,01	0,0000		
3	50,08		0,01	0,0002		
4	50,07		0,00	0,0000		
5	50,06		-0,01	0,0000		
6	50,07		0,00	0,0000		
7	50,06		-0,01	0,0000		
8	50,07		0,00	0,0000		
9	50,08		0,01	0,0002		
10	50,08		0,01	0,0002		

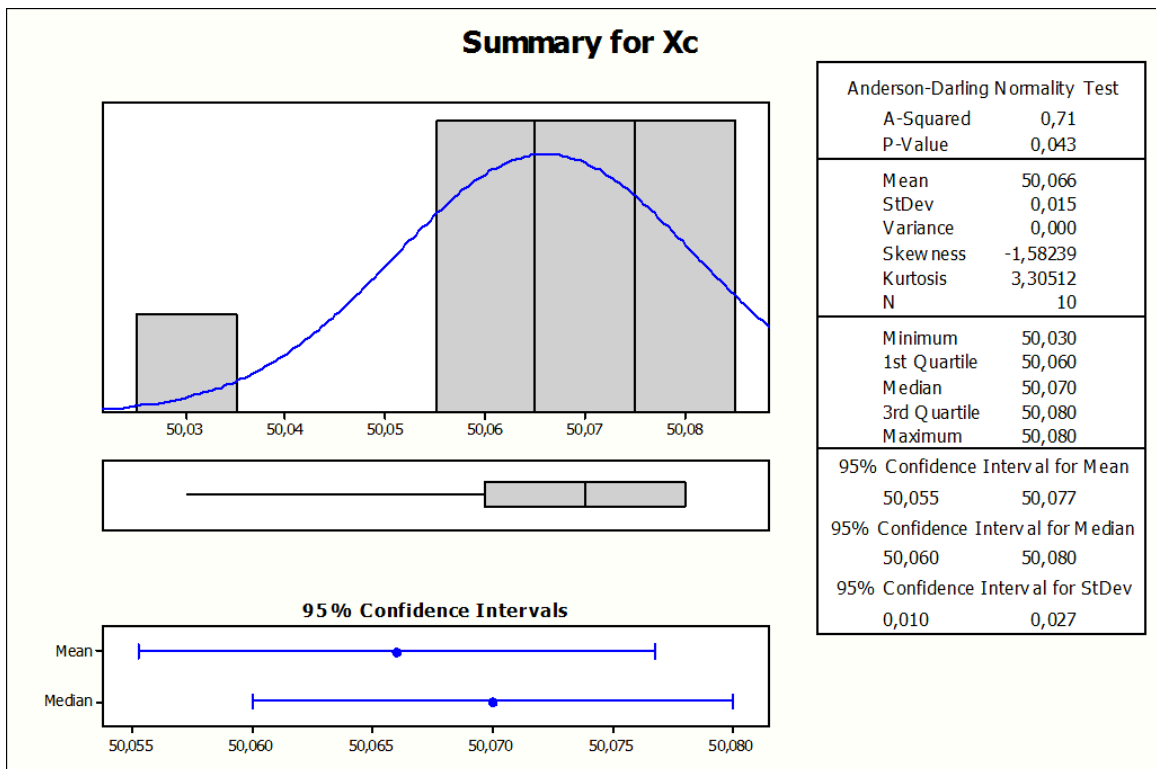
Kuželovitost obrobku je 0,06 mm.



Obr. 107: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 20



Obr. 108: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 20 v rovině A



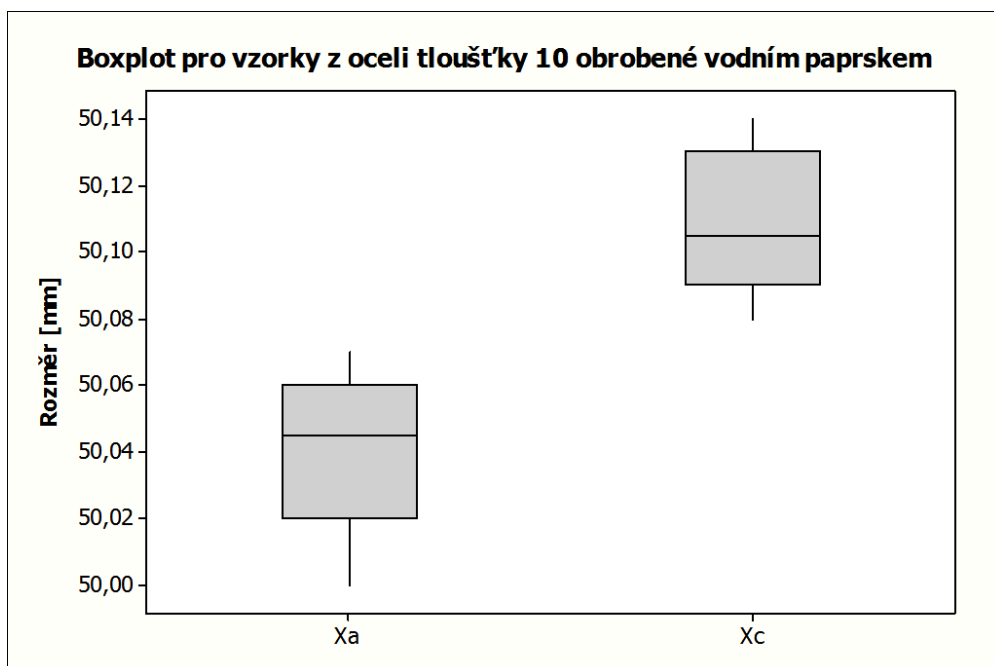
Obr. 109: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 20 v rovině C

7.4.4 Ocel tloušťky 10 mm

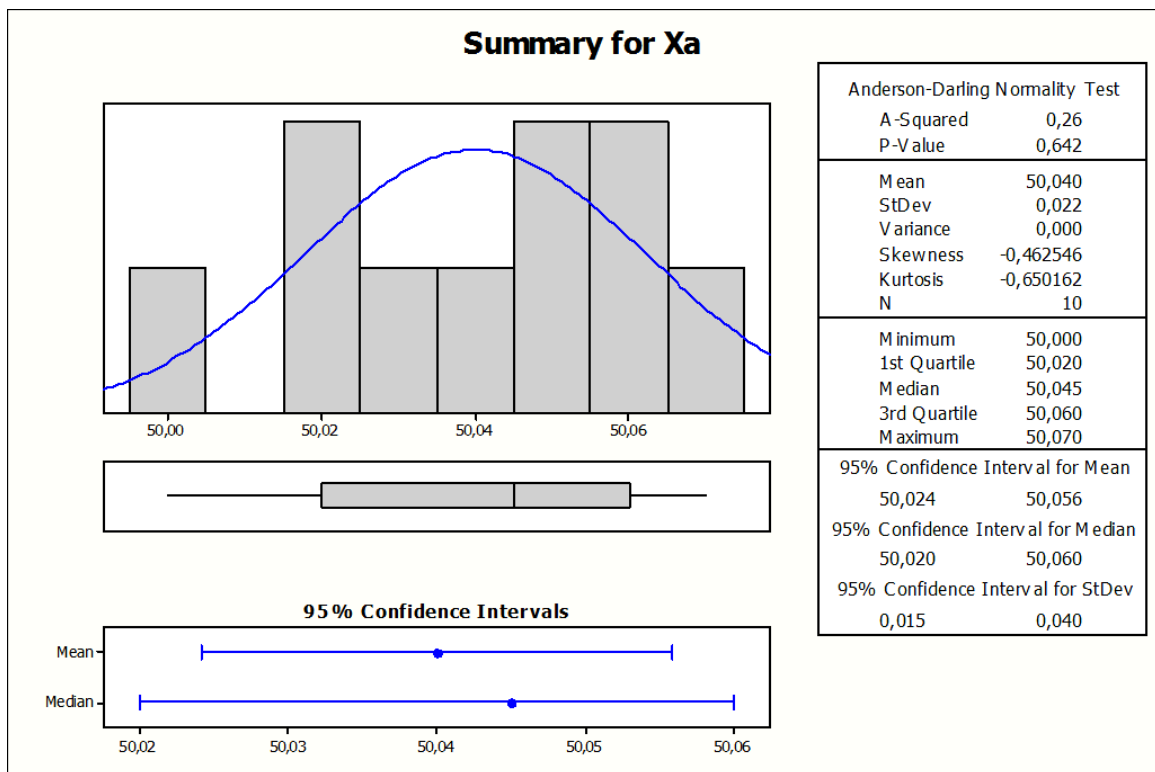
Tab. 23: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 10, vodní paprsek

OCEL, tloušťka 10 mm, rovina A, VODA						
Č.měření	x_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	50,02	50,04	-0,02	0,0004	0,0005	0,0000
2	50,00		-0,04	0,0016		
3	50,06		0,02	0,0004		
4	50,07		0,03	0,0009		
5	50,02		-0,02	0,0004		
6	50,05		0,01	0,0001		
7	50,03		-0,01	0,0001		
8	50,06		0,02	0,0004		
9	50,04		0,00	0,0000		
10	50,05		0,01	0,0001		
OCEL, tloušťka 10 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	50,09	50,11	-0,02	0,0004	0,0004	0,0000
2	50,13		0,02	0,0004		
3	50,13		0,02	0,0004		
4	50,10		-0,01	0,0001		
5	50,14		0,03	0,0010		
6	50,11		0,00	0,0000		
7	50,08		-0,03	0,0008		
8	50,10		-0,01	0,0001		
9	50,12		0,01	0,0001		
10	50,09		-0,02	0,0004		

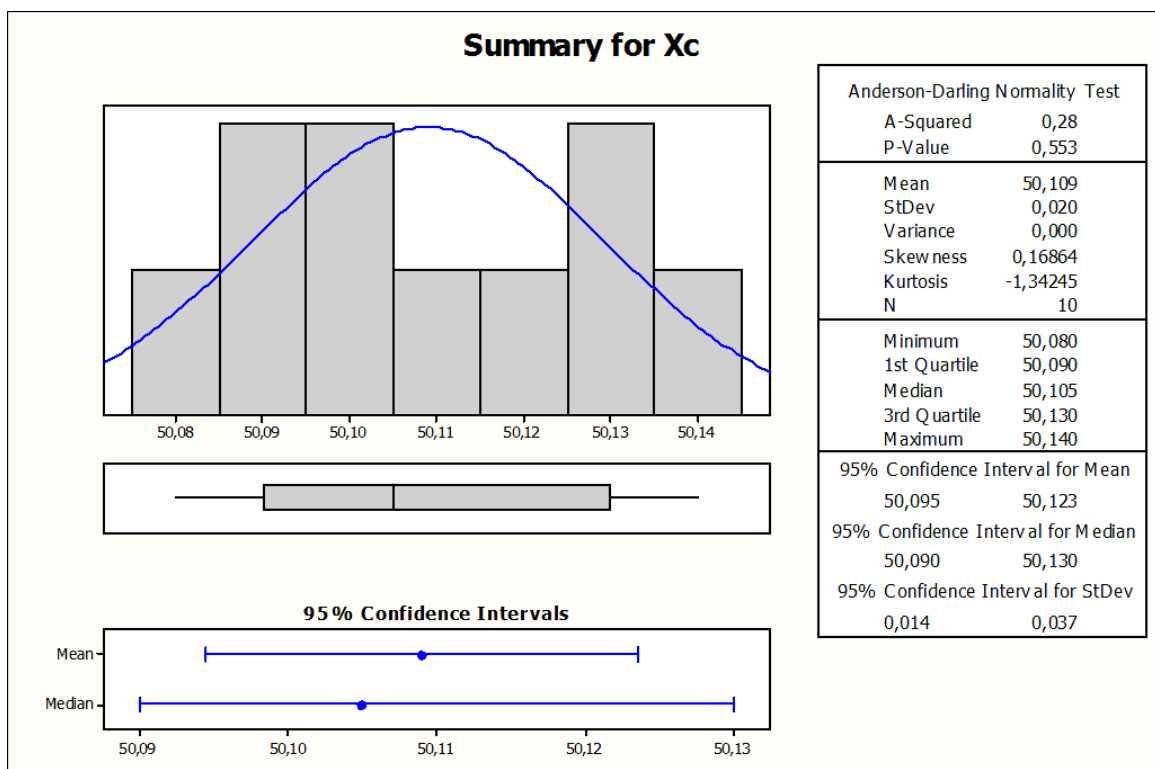
Kuželovitost obrobku je 0,07 mm.



Obr. 110: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 10



Obr. 111: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 10 v rovině A



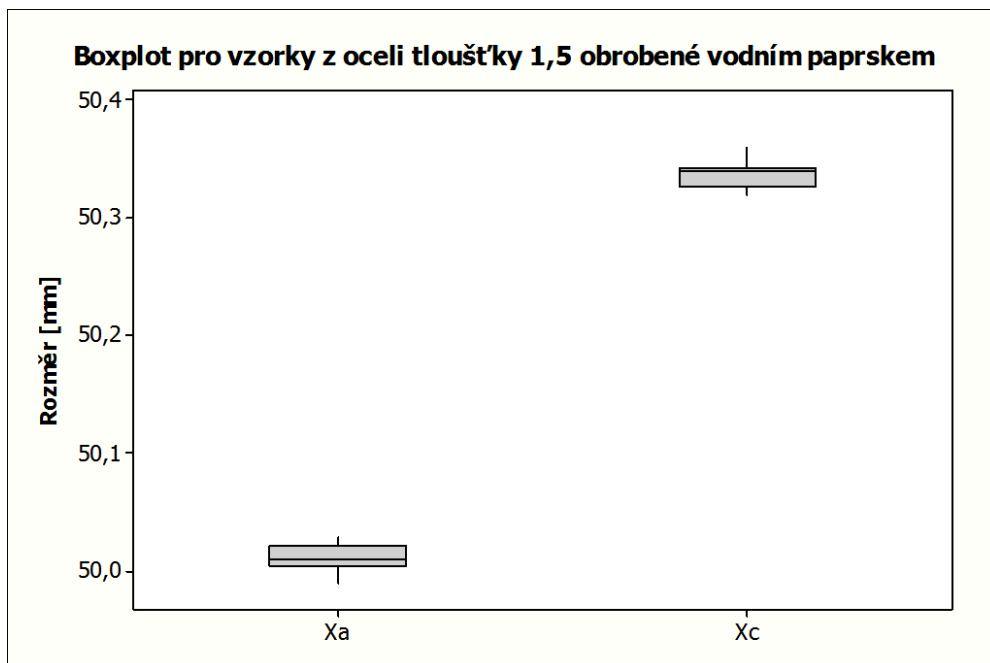
Obr. 112: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 10 v rovině C

7.4.5 Ocel tloušťky 1,5 mm

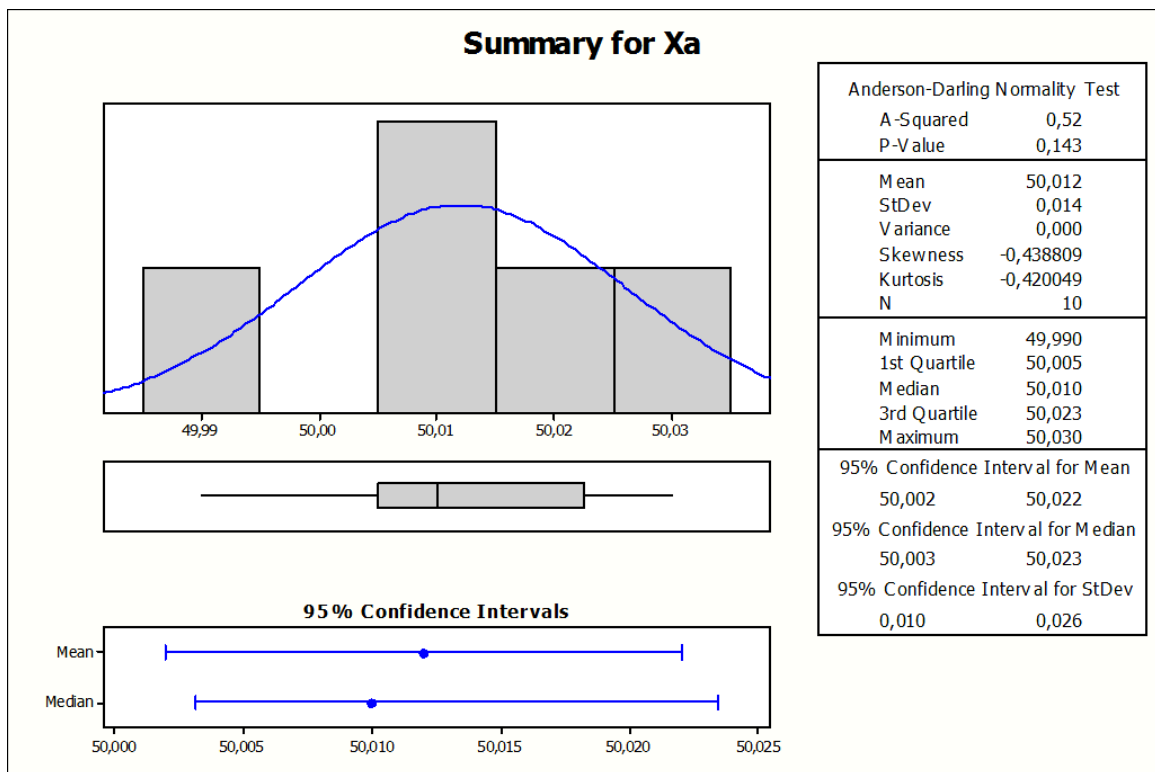
Tab. 24: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 1,5, vodní paprsek

OCEL, tloušťka 1,5 mm, rovina A, VODA						
Č.měření	x_A [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	50,01	50,01	0,00	0,0000	0,0002	0,0000
2	50,03		0,02	0,0003		
3	49,99		-0,02	0,0005		
4	50,01		0,00	0,0000		
5	50,01		0,00	0,0000		
6	50,02		0,01	0,0001		
7	49,99		-0,02	0,0005		
8	50,03		0,02	0,0003		
9	50,01		0,00	0,0000		
10	50,02		0,01	0,0001		
OCEL, tloušťka 1,5 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	50,32	50,34	-0,02	0,0003	0,0002	0,0000
2	50,34		0,00	0,0000		
3	50,34		0,00	0,0000		
4	50,35		0,01	0,0002		
5	50,36		0,02	0,0005		
6	50,33		-0,01	0,0000		
7	50,34		0,00	0,0000		
8	50,34		0,00	0,0000		
9	50,32		-0,02	0,0003		
10	50,33		-0,01	0,0000		

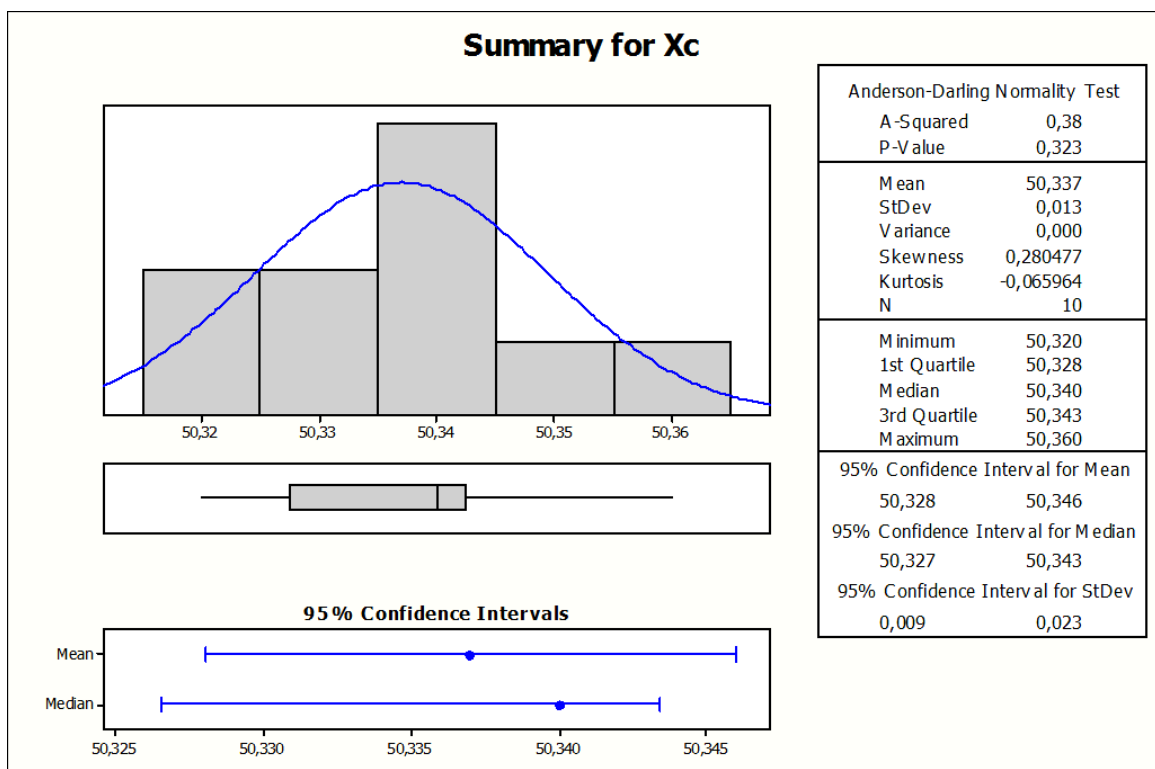
Kuželovitost obrobku je 0,33 mm.



Obr. 113: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 1,5



Obr. 114: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 1,5 v rovině A



Obr. 115: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 1,5 v rovině C

7.4.6 Přehled výsledků měření kuželovitosti při obrábění vodním paprskem

Rovina A

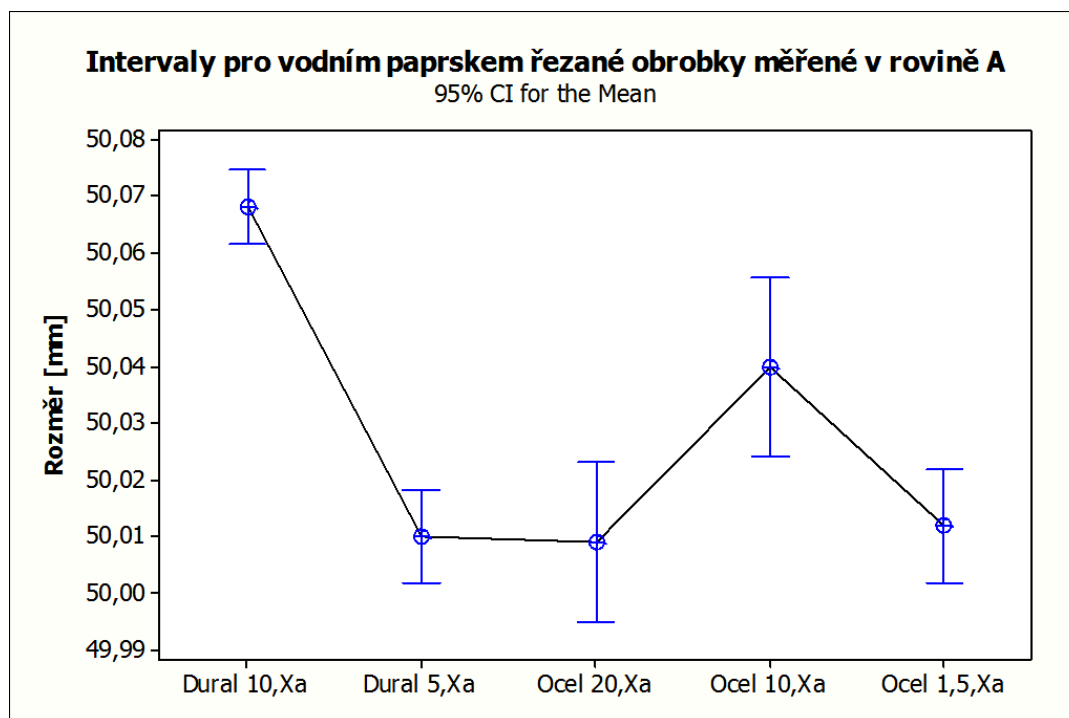
Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
Dural 10,Xa	50,068	0,00919	0,02	50,060	50,060	50,065	50,080	50,080	0,0200
Dural 5,Xa	50,010	0,0115	0,02	49,990	50,005	50,010	50,020	50,020	0,0150
Ocel 20,Xa	50,009	0,0197	0,04	49,970	49,990	50,015	50,023	50,030	0,0325
Ocel 10,Xa	50,040	0,0221	0,04	50,000	50,020	50,045	50,060	50,070	0,0400
Ocel 1,5,Xa	50,012	0,0140	0,03	49,990	50,005	50,010	50,023	50,030	0,0175

Rovina C

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
Dural 10,Xc	50,104	0,00843	0,02	50,090	50,098	50,110	50,110	50,110	0,0125
Dural 5,Xc	50,301	0,0160	0,03	50,270	50,290	50,305	50,313	50,320	0,0225
Ocel 20,Xc	50,066	0,0151	0,03	50,030	50,060	50,070	50,080	50,080	0,0200
Ocel 10,Xc	50,109	0,0202	0,04	50,080	50,090	50,105	50,130	50,140	0,0400
Ocel 1,5,Xc	50,337	0,0125	0,02	50,320	50,328	50,340	50,343	50,360	0,0150

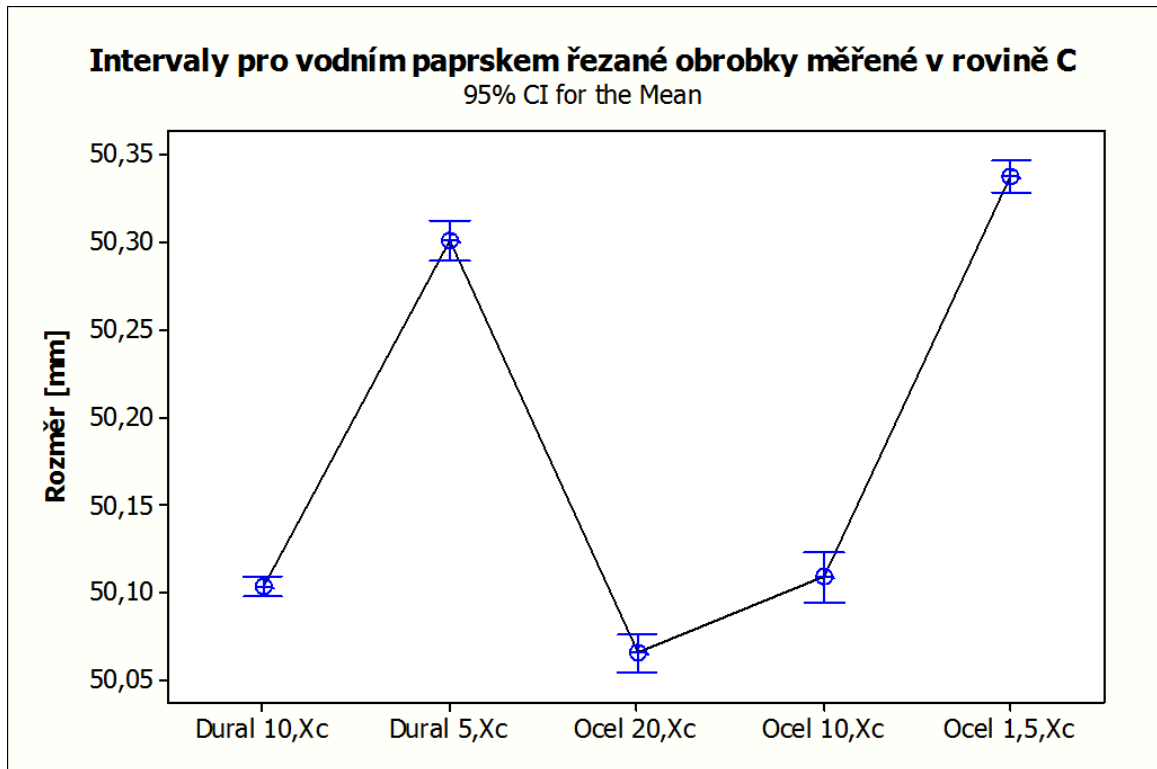
Vysvětlivky:

Variable – materiál a jeho tloušťka, *Mean* – aritmetický průměr, *StDev* – směrodatná odchylka, *CoefVar* – variační koeficient, *Minimum* – minimální naměřená hodnota, *Q1* – první kvartil, *Median* – medián, *Q3* – třetí kvartil, *Maximum* – maximální naměřená hodnota, *IQR* – interkvartilové rozpětí



Obr. 116: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobeké vodním paprskem, měřeno v rovině A

Interpretace výsledků pro vzorek z duralu, tloušťky 10 mm, měřeno v rovině A: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$ leží neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ v konfidenčním intervalu od 50,061 μm do 50,075 μm .



Obr. 117: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobky vodním paprskem, měřeno v rovině C

Interpretace výsledků pro vzorek z duralu, tloušťky 10 mm, měřeno v rovině C: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$ leží neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ v konfidenčním intervalu od 50,098 μm do 50,110 μm .

Tab. 25: Tabulka kuželovitosti

Vzorek	Rozměr v rovině A	Rozměr v rovině C
Dural 10 mm	50,07	50,1
Dural 5 mm	50,01	50,3
Ocel 20 mm	50,01	50,07
Ocel 10 mm	50,04	50,11
Ocel 1,5 mm	50,01	50,34

7.4.7 Zhodnocení

Naměřené hodnoty, grafy a konečná shrnující tabulka nám ukazují, že u vodního paprsku se tvoří kužel velmi malý. Rozdíl je u tenčích plechů, kde je úkos stěny řezu poměrně velký.

7.5 Hodnocení rozměrové přesnosti

Vzhledem k předchozímu měření a zjištění značné kuželovitosti u vzorků, je hodnocení rozměrové přesnosti neprůkazné. Proto jsou v práci vloženy pouze tabulky s naměřenými hodnotami a jejich odhady aritmetických průměrů. Z těchto dat nelze vyvozovat žádné závěry o rozměrové přesnosti strojů a jednotlivých technologií. Všechny tyto rozměry byly měřeny v rovině C, tedy v místě s největším rozměrem.

7.5.1 Laserové obrábění

Dural 10 mm

Tab. 26: Rozměry vzorku z duralu tloušťky 10 mm

DURAL, tloušťka 10 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	49,86	49,96	-0,10	0,0106	0,0037	0,0001
2	50,00		0,04	0,0014		
3	49,94		-0,02	0,0005		
4	50,07		0,11	0,0114		
5	49,92		-0,04	0,0018		
6	50,02		0,06	0,0032		
7	49,92		-0,04	0,0018		
8	49,99		0,03	0,0007		
9	49,98		0,02	0,0003		
10	49,93		-0,03	0,0011		
DURAL, tloušťka 10 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	y_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	60,56	60,28	0,28	0,0773	0,0333	0,0006
2	60,58		0,30	0,0888		
3	60,34		0,06	0,0034		
4	60,25		-0,03	0,0010		
5	60,35		0,07	0,0046		
6	60,08		-0,20	0,0408		
7	60,14		-0,14	0,0202		
8	60,12		-0,16	0,0262		
9	60,09		-0,19	0,0369		
10	60,31		0,03	0,0008		

Dural 5 mm

Tab. 27: Rozměry vzorku z duralu tloušťky 5 mm

DURAL, tloušťka 5 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	50,10	50,03	0,08	0,0056	0,0025	0,0001
2	49,99		-0,03	0,0012		
3	50,05		0,02	0,0006		
4	50,00		-0,02	0,0006		
5	50,07		0,05	0,0020		
6	49,95		-0,07	0,0056		
7	50,09		0,07	0,0042		
8	49,98		-0,05	0,0020		
9	50,00		-0,02	0,0006		
10	50,02		0,00	0,0000		
DURAL, tloušťka 5 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	y_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	60,25	60,19	0,06	0,0034	0,0075	0,0001
2	60,32		0,13	0,0164		
3	60,11		-0,08	0,0067		
4	60,19		0,00	0,0000		
5	60,27		0,08	0,0061		
6	60,16		-0,03	0,0010		
7	60,08		-0,11	0,0125		
8	60,16		-0,03	0,0010		
9	60,29		0,10	0,0096		
10	60,09		-0,10	0,0104		

Ocel 20 mm

Tab. 28: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 20 mm

OCEL, tloušťka 20 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	49,99	50,00	-0,01	0,0001	0,0040	0,0001
2	50,15		0,15	0,0225		
3	49,96		-0,04	0,0016		
4	49,95		-0,05	0,0025		
5	49,98		-0,02	0,0004		
6	50,05		0,05	0,0025		
7	50,02		0,02	0,0004		
8	49,97		-0,03	0,0009		
9	49,93		-0,07	0,0049		
10	50,00		0,00	0,0000		
OCEL, tloušťka 20 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	y_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	60,12	60,17	-0,05	0,0020	0,0019	0,0000
2	60,24		0,08	0,0056		
3	60,17		0,01	0,0000		
4	60,15		-0,02	0,0002		
5	60,17		0,01	0,0000		
6	60,12		-0,05	0,0020		
7	60,23		0,06	0,0042		
8	60,16		-0,01	0,0000		
9	60,11		-0,05	0,0030		
10	60,18		0,02	0,0002		

Ocel 10 mm

Tab. 29: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 10 mm

OCEL, tloušťka 10 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	50,04	50,03	0,01	0,0001	0,0001	0,0000
2	50,03		0,00	0,0000		
3	50,03		0,00	0,0000		
4	50,03		0,00	0,0000		
5	50,02		-0,01	0,0001		
6	50,03		0,00	0,0000		
7	50,04		0,01	0,0001		
8	50,01		-0,02	0,0003		
9	50,02		-0,01	0,0001		
10	50,03		0,00	0,0000		
OCEL, tloušťka 10 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	y_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	59,95	59,96	-0,01	0,0001	0,0005	0,0000
2	59,93		-0,03	0,0010		
3	59,98		0,02	0,0003		
4	59,96		0,00	0,0000		
5	59,97		0,01	0,0001		
6	59,99		0,03	0,0008		
7	59,94		-0,02	0,0005		
8	60,00		0,04	0,0014		
9	59,96		0,00	0,0000		
10	59,94		-0,02	0,0005		

Ocel 1,5 mm

Tab. 30: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 1,5 mm

OCEL, tloušťka 1,5 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	49,98	49,98	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
2	49,98		0,00	0,0000		
3	49,98		0,00	0,0000		
4	49,98		0,00	0,0000		
5	49,98		0,00	0,0000		
6	49,97		-0,01	0,0001		
7	49,98		0,00	0,0000		
8	49,99		0,01	0,0001		
9	49,98		0,00	0,0000		
10	49,97		-0,01	0,0001		
OCEL, tloušťka 1,5 mm, rovina C, LASER						
Č.měření	y_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	59,99	59,98	0,01	0,0000	0,0007	0,0000
2	59,98		0,00	0,0000		
3	60,00		0,02	0,0003		
4	60,02		0,04	0,0013		
5	59,97		-0,01	0,0002		
6	59,96		-0,02	0,0006		
7	59,98		0,00	0,0000		
8	60,03		0,05	0,0021		
9	59,96		-0,02	0,0006		
10	59,95		-0,03	0,0012		

7.5.2 Obrábění vodním paprskem

Dural 10 mm

Tab. 31: Rozměry vzorku z duralu tloušťky 10 mm

DURAL, tloušťka 10 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	50,11	50,10	0,01	0,0000	0,0001	0,0000
2	50,11		0,01	0,0000		
3	50,09		-0,01	0,0002		
4	50,11		0,01	0,0000		
5	50,10		0,00	0,0000		
6	50,11		0,01	0,0000		
7	50,09		-0,01	0,0002		
8	50,10		0,00	0,0000		
9	50,11		0,01	0,0000		
10	50,11		0,01	0,0000		
DURAL, tloušťka 10 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	y_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
1	60,12	60,12	0,00	0,0000	0,0001	0,0000
2	60,11		-0,01	0,0001		
3	60,14		0,02	0,0003		
4	60,12		0,00	0,0000		
5	60,11		-0,01	0,0001		
6	60,12		0,00	0,0000		
7	60,12		0,00	0,0000		
8	60,11		-0,01	0,0001		
9	60,14		0,02	0,0003		
10	60,13		0,01	0,0001		

Dural 5 mm

Tab. 32: Rozměry vzorku z duralu tloušťky 5 mm

DURAL, tloušťka 5 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	50,27	50,30	-0,03	0,0010	0,0003	0,0000
2	50,30		0,00	0,0000		
3	50,31		0,01	0,0001		
4	50,31		0,01	0,0001		
5	50,31		0,01	0,0001		
6	50,32		0,02	0,0004		
7	50,29		-0,01	0,0001		
8	50,29		-0,01	0,0001		
9	50,29		-0,01	0,0001		
10	50,32		0,02	0,0004		
DURAL, tloušťka 5 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	y_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	60,22	60,26	-0,04	0,0014	0,0003	0,0000
2	60,26		0,00	0,0000		
3	60,26		0,00	0,0000		
4	60,27		0,01	0,0001		
5	60,27		0,01	0,0001		
6	60,24		-0,02	0,0003		
7	60,26		0,00	0,0000		
8	60,28		0,02	0,0005		
9	60,27		0,01	0,0001		
10	60,25		-0,01	0,0001		

Ocel 20 mm

Tab. 33: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 20 mm

OCEL, tloušťka 20 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	50,03	50,07	-0,04	0,0013	0,0002	0,0000
2	50,06		-0,01	0,0000		
3	50,08		0,01	0,0002		
4	50,07		0,00	0,0000		
5	50,06		-0,01	0,0000		
6	50,07		0,00	0,0000		
7	50,06		-0,01	0,0000		
8	50,07		0,00	0,0000		
9	50,08		0,01	0,0002		
10	50,08		0,01	0,0002		
OCEL, tloušťka 20 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	y_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	59,95	59,91	0,04	0,0014	0,0004	0,0000
2	59,91		0,00	0,0000		
3	59,89		-0,02	0,0005		
4	59,92		0,01	0,0000		
5	59,91		0,00	0,0000		
6	59,89		-0,02	0,0005		
7	59,94		0,03	0,0007		
8	59,89		-0,02	0,0005		
9	59,92		0,01	0,0000		
10	59,91		0,00	0,0000		

Ocel 10 mm

Tab. 34: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 10 mm

OCEL, tloušťka 10 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	50,09	50,11	-0,02	0,0004	0,0004	0,0000
2	50,13		0,02	0,0004		
3	50,13		0,02	0,0004		
4	50,10		-0,01	0,0001		
5	50,14		0,03	0,0010		
6	50,11		0,00	0,0000		
7	50,08		-0,03	0,0008		
8	50,10		-0,01	0,0001		
9	50,12		0,01	0,0001		
10	50,09		-0,02	0,0004		
OCEL, tloušťka 10 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	y_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	60,03	60,00	0,03	0,0007	0,0008	0,0000
2	60,06		0,06	0,0032		
3	59,98		-0,02	0,0005		
4	59,99		-0,01	0,0002		
5	60,02		0,02	0,0003		
6	59,98		-0,02	0,0005		
7	59,97		-0,03	0,0011		
8	60,01		0,01	0,0000		
9	59,99		-0,01	0,0002		
10	60,00		0,00	0,0000		

Ocel 1,5 mm

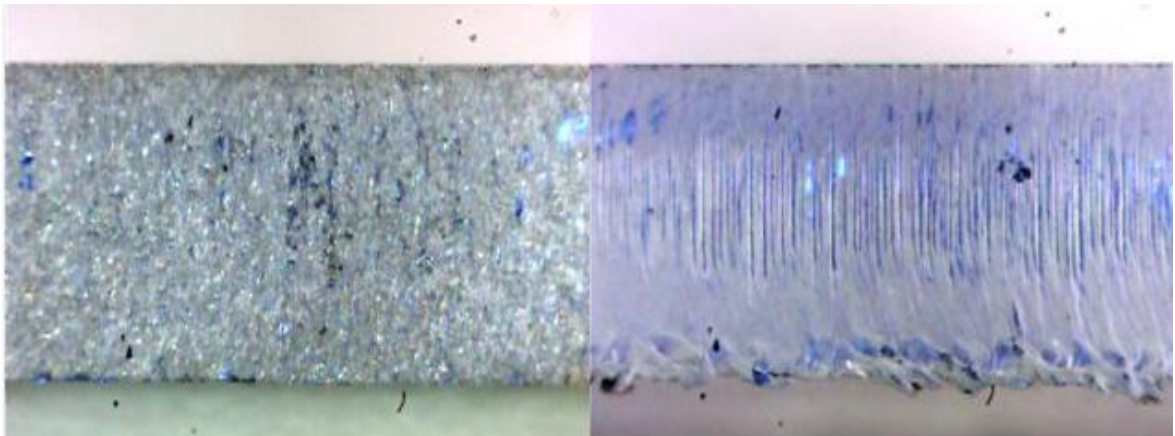
Tab. 35: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 1,5 mm

OCEL, tloušťka 1,5 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	x_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	50,32	50,34	-0,02	0,0003	0,0002	0,0000
2	50,34		0,00	0,0000		
3	50,34		0,00	0,0000		
4	50,35		0,01	0,0002		
5	50,36		0,02	0,0005		
6	50,33		-0,01	0,0000		
7	50,34		0,00	0,0000		
8	50,34		0,00	0,0000		
9	50,32		-0,02	0,0003		
10	50,33		-0,01	0,0000		
OCEL, tloušťka 1,5 mm, rovina C, VODA						
Č.měření	y_C [mm]	\bar{x}	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm ²]	s [mm]	V_x [%]
1	60,25	60,23	0,02	0,0005	0,0006	0,0000
2	60,21		-0,02	0,0003		
3	60,23		0,00	0,0000		
4	60,28		0,05	0,0028		
5	60,24		0,01	0,0002		
6	60,21		-0,02	0,0003		
7	60,19		-0,04	0,0014		
8	60,22		-0,01	0,0000		
9	60,23		0,00	0,0000		
10	60,21		-0,02	0,0003		

7.5.3 Zhodnocení

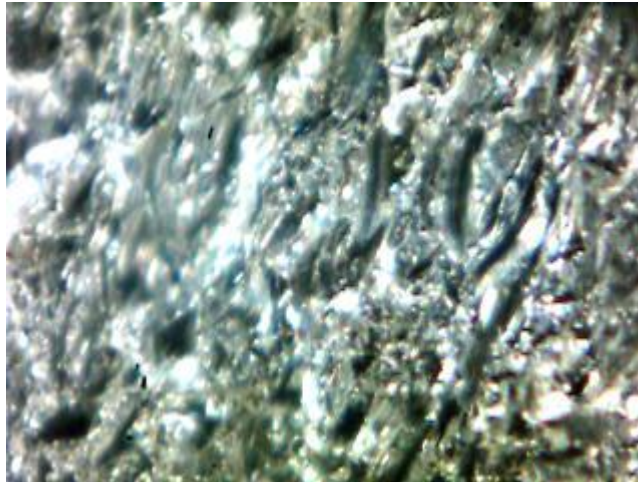
Z výše uvedeného můžeme vyčíst, že vodní paprsek vyrábí výrobky spíše větší, kdežto naopak laser výrobku menší než je zadaná hodnota. Výrobky z laseru jsou rozměrově blíže ke jmenovitému rozměru, který byl zadán. U laseru je obrábění v ose x přesnější, než v ose y. V ose y jsou u většiny výrobků výrazně větší od zadaného rozměru než v ose x. Větší rozdíly od zadaného rozměru u laserového obrábění jsou u silnějších obrobků. U obrábění vodním paprskem je přesnější obrábění v ose y. Nejméně přesné je obrábění tenkého 1,5 mm plechu z oceli a z 5 mm plechu duralu. U silnějších materiálů se přesnost zvyšuje. Ovšem tyto data jsou pouze orientační, vzhledem ke kuželovitosti výrobků.

7.6 Hodnocení kvality opracovaného povrchu

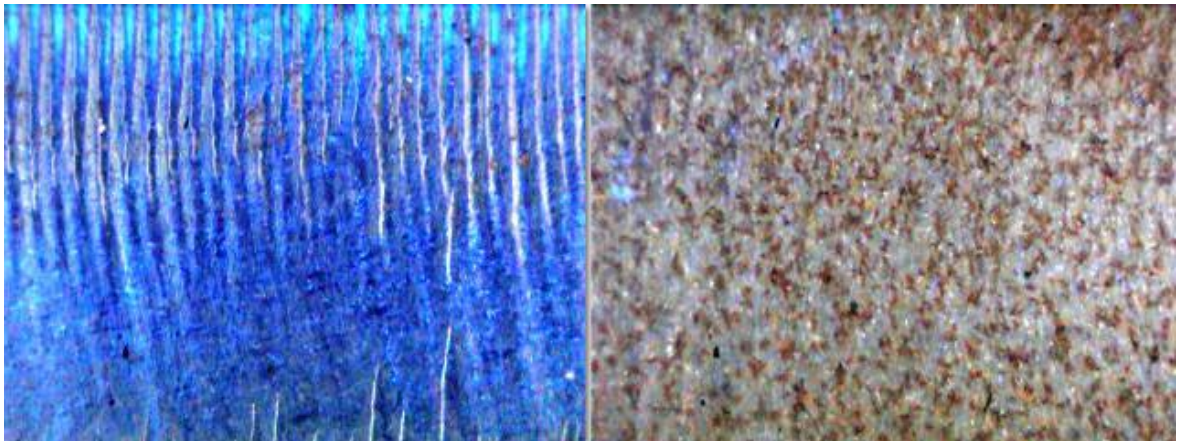


Obr. 118: Struktura duralu 5 mm

Na snímcích 30x zvětšených vidíme materiál dural 5 mm, vlevo opracovaný vodním paprskem a vpravo laserem. Rozdíl ve struktuře povrchu je vidět na první pohled. Zatímco vlevo jsou vidět nepravidelné neuspořádané stopy po abrazivu, vpravo je jasně patrná stopa laseru. Za zmínku stojí také značný otřep na spodní straně dílu z laseru.

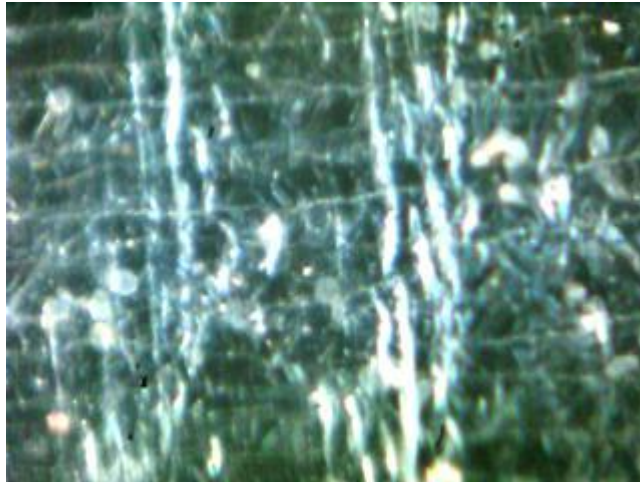


Obr. 119: Povrch po opracování vodním paprskem zvětšený 400x



Obr. 120: Struktura oceli 10 mm

Opět na první pohled patrné rozdíly. Vlevo opracování laserem, viditelné stopy laseru a tepelné zbarvení. Vpravo po opracování vodním paprskem neuspořádané stopy po abrazi-
vu a viditelná koroze.



Obr. 121: Povrchu oceli 10 mm po opracování laserem a zvětšení 400x

7.7 Hodnocení tvrdosti

Byl proveden pokus o měření tvrdosti povrchu se zvětšující se vzdáleností od řezu směrem do materiálu, ale výsledky měření nebyly relevantní, proto nebylo možné jejich další zpracování.

ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce byly rozebrány nekonvenční technologie obecně. Technologie byly rozděleny do kategorií a z každé kategorie byly ty nejpoužívanější vyjmenovány a krátce popsány. Dále se teoretická část zabývala podrobnějším popisem technologií týkajících diplomové práce, tedy obrábění vodním paprskem a obrábění paprskem laseru.

Cílem praktické části bylo porovnat obě technologie z hlediska rozměrové přesnosti a jakosti povrchu. K tomu bylo pro lepší popis přidáno měření kuželovitosti obrobku.

Při měření rozměrové přesnosti jsme zjistili, že obrábění laserem je přesnější než obrábění vodním paprskem. Při obrábění laserem je přesnější obrábění v ose x. Jak u duralu, tak i u oceli platí, že čím je obrobek silnější, tím se jeho přesnost zhoršuje. U vodního paprsku je přesnější obrábění v ose y. Zde platí opačné pravidlo než u laseru, čili s rostoucí tloušťkou materiálu se zlepšuje přesnost výrobků. Toto platí pro ocel i pro dural. Ovšem tyto poznatky jsou znehodnoceny kuželovitostí řezu, tedy možností nepřesnosti měření.

Při vyhodnocení kuželovitosti řezu bylo zjištěno, že u laseru se kuželovitost pohybuje maximálně do 0,25 mm. S rostoucí tloušťkou materiálu roste rozšiřování kuželovitosti obrobku, což je dáno odklonem paprsku vlivem ztráty energie. Tento odklon je ovlivnitelný zejména řeznými podmínkami jako ohnisko, řezný plyn, řezná rychlost, výkon laseru apod. U vodního paprsku byla kuželovitost u silných materiálů velmi malá, zvětšovala se u tenkých materiálů. I na tuto skutečnost má vliv mnoho ovlivňujících faktorů jako typ dýzy, pracovní tlak a druh brusiva – jeho velikost a typ. Při vnikání a průchodem paprsku skrz materiál ztrácí paprsek svou kinetickou energii a vychyluje se, tedy se zvětšující se hloubkou řezu by měla kuželovitost narůstat. To se ovšem našim experimentem nepotvrdilo.

Při zkoumání jakosti povrchu byla změřena drsnost povrchu vždy ve 3 rovinách na každém obrobku vyjma 1,5 mm ocelového, který byl měřen pouze v jedné rovině kvůli malým rozměrům. Povrch každého řezu byl zkoumán pod kamerou se zvětšením 30x, 100x a 400x. U drsnosti povrchu bylo znát zejména tepelné ovlivnění povrchu u laserového obrábění, kdy hlavně u měkkého duralu byl povrch velmi ovlivněn. Dochází na něm k zanechání hlubokých stop po obrábění, což je také dobře vidět na fotografiích z kamery. Vlivem tavení a tečení materiálu vzniká také nepříjemný otřep. U tenkého 1,5 mm silného ocelového plechu je řez velmi dobrý, vzhledem k tomu, že laser nedosáhl ještě fokusačního bodu a také díky vysoké řezné rychlosti. Naopak při obrábění vodním paprskem je povrch čistý, rovnoměrný bez tepelného ovlivnění a strukturálních změn. Horší povrch je pouze u

tenkého 1,5 mm silného plechu z oceli, kde vznikl poměrně velký otřep. Nevýhodou u obrábění vodním paprskem je vznik koroze u ocelových výrobků jak na řezné ploše tak i na zbytku výrobku.

Práce měla obsahovat také zkoumání tepelného ovlivnění povrchu měřením tvrdosti, ovšem výsledky měření nebyly relevantní, proto nebylo možné je vyhodnotit.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó.: *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] MORÁVEK, Rudolf.: *Nekonvenční metody obrábění*. 2. Vyd. Plzeň: Západočeská univerzita Plzeň – Vydavatelství 1999, 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
- [3] KOČMAN, Karel.: *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [4] DILLINGER, J.: *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [5] DRÁBEK, F.-ONDRA, J.-VAVŘÍK, I.: *Obrábění*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technologické literatury, 1974, 352 s. 04-231-74.
- [6] HLUCHÝ, M.-KOLOUCH, J.-PAŇÁK, R.: *Strojírenská technologie 2. 2.*, upr. vyd. Praha: Scientia, 2001, 316 s. ISBN 80-718-3244-8.
- [7] STRUMBAN, E.: *Lasery a optoelektronika*. 1. vyd. Praha: Panorama, 1989, 248 s.
- [8] ENGST, P.-HORÁK, M.: *Aplikace laserů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 204 s.
- [9] ŠESTÁK, J.-Strnad, Z.-Tříška, A. a kol.: *Speciální technologie a materiály*. 1. vyd. Praha: Academia, 1993, 688 s. ISBN 80-200-0148-4.
- [10] HÁBOVČÍK, Peter. *Lasery a fotodetektory*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 318 s. ISBN 80-050-0526-1.
- [11] http://www.lao.cz/laoinfo/serial2011/hlavni_prumyslove_lasery.php
- [12] <http://waterjet-cutting.blogspot.com/2011/02/water-jet-machining.html>
- [13] [http://www.mechanicaldesignforum.com/content.php?13-Ultrasonic-machining-\(USM\)](http://www.mechanicaldesignforum.com/content.php?13-Ultrasonic-machining-(USM))
- [14] Přednášky doc. Ing. Libuše Sýkorové Ph.D.
- [15] http://www.themetallurgist.co.uk/articles/the_role_of_electrochemical_machining_eem_in_industrial_metallurgy.shtml

- [16] OBR, Lukáš. *Analýza nekonvenčních technologií se zaměřením na řezání plasmou a laserem*. Zlín. 2012
- [17] http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php, (cit:5.5.2013)
- [18] ŽÍDEK, David. *Studium vlivu polymerního materiálu na výsledky laserového mikroobrábění při konstantních vstupních parametrech*. Zlín.
- [19] PODOLA, Milan. *Analýza nekonvenčních technologií*. Zlín. 2010

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

apod	A podobně.
atd	A tak dále.
AWJM	Abrasive water jet machining.
CO ₂	Oxid uhličitý.
např	Například.
tl	Tloušťka.
WJM	Water jet machining.
X _A	Rozměr x, měřený v rovině A.
X _B	Rozměr x, měřený v rovině B.
X _C	Rozměr x, měřený v rovině C.
Y _C	Rozměr y, měřený v rovině C.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [2]</i>	14
<i>Obr. 2: Princip obrábění ultrazvukem[14]</i>	15
<i>Obr. 3: Zařízení pro řezání vodním paprskem [14]</i>	16
<i>Obr. 4: Obrábění abrazivním paprskem[14]</i>	17
<i>Obr. 5: Zařízení pro obrábění abrazivním paprskem [2]</i>	17
<i>Obr. 6: Podřezání při chemickém obrábění [14]</i>	18
<i>Obr. 7: Elektrochemické broušení [3]</i>	19
<i>Obr. 8: Řezání laserem [4]</i>	20
<i>Obr. 9: Obrábění paprskem elektronů [2]</i>	21
<i>Obr. 10: Obrábění paprskem iontů [14]</i>	21
<i>Obr. 11: Elektroerozivní obrábění [4]</i>	22
<i>Obr. 12: Řezání plazmovým paprskem [2]</i>	23
<i>Obr. 13: Zařízení pro řezání vodním paprskem [1]</i>	24
<i>Obr. 14: Tryska pro čistý vodní paprsek [1]</i>	25
<i>Obr. 15: Různé typy trysky pro paprsek s abrazivem [1]</i>	26
<i>Obr. 16: Soustružení vodním paprskem[1]</i>	27
<i>Obr. 17: Příklady frézování vodním paprskem [1]</i>	28
<i>Obr. 18: Vrtání vodním paprskem [1]</i>	28
<i>Obr. 19: Tryska pro obrábění vodním paprskem[1]</i>	29
<i>Obr. 20: Laser s rubínovým krystalem [15]</i>	30
<i>Obr. 21: Zdroje vybuzení atomů [1]</i>	32
<i>Obr. 22: Zaostrění laserového paprsku [1]</i>	32
<i>Obr. 23: LPSS Nd-YAG – laser buzený výbojkami [11]</i>	35
<i>Obr. 24: DPSS Nd-YAG - laser buzený diodami [11]</i>	36
<i>Obr. 25: Vláknový laser [11]</i>	36
<i>Obr. 26: CO₂ laser [11]</i>	37
<i>Obr. 27: Polovodičový laser [15]</i>	38
<i>Obr. 28: Působení laseru na materiál [1]</i>	39
<i>Obr. 29: Řezání materiálu laserem [15]</i>	40
<i>Obr. 30: Typický tvar laserem vrtaného otvoru [1]</i>	41
<i>Obr. 31: Soustružení laserem[1]</i>	42
<i>Obr. 32: Laserový interferometr [15]</i>	43

<i>Obr. 33: Rozměry vzorku</i>	46
<i>Obr. 34: Laserový řezací stroj TRUMPF</i>	48
<i>Obr. 35: Řezná tryska laseru</i>	48
<i>Obr. 36: Zařízení pro řezání vodním paprskem</i>	49
<i>Obr. 37: Dilenský drsnoměr Mitutoyo SJ 301</i>	50
<i>Obr. 38: Třmenový mikrometr Mitutoyo.....</i>	50
<i>Obr. 39: Posuvné měřidlo Mitutoyo</i>	51
<i>Obr. 40: Snímací kamera ProScope HR.....</i>	51
<i>Obr. 41: Roviny měření drsnosti povrchu</i>	52
<i>Obr. 42: Boxplot pro drsnost povrchu duralu tl. 10 mm, obrobeného laserem</i>	54
<i>Obr. 43: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině A</i>	54
<i>Obr. 44: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině B</i>	55
<i>Obr. 45: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině C</i>	55
<i>Obr. 46: Boxplot pro drsnost povrchu duralu tl. 5 mm, obrobeného laserem</i>	57
<i>Obr. 47: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině A</i>	57
<i>Obr. 48: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině B</i>	58
<i>Obr. 49: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině C</i>	58
<i>Obr. 50: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 20 mm, obrobeného laserem</i>	60
<i>Obr. 51: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině A</i>	60
<i>Obr. 52: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině B</i>	61
<i>Obr. 53: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině C</i>	61
<i>Obr. 54: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 10 mm, obrobeného laserem</i>	63
<i>Obr. 55: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině A</i>	63
<i>Obr. 56: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině B</i>	64
<i>Obr. 57: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině C</i>	64
<i>Obr. 58: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 1,5 mm, obrobeného laserem</i>	65
<i>Obr. 59: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 1,5 v rovině B</i>	66
<i>Obr. 60: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené laserem, měřeno v rovině A.....</i>	68
<i>Obr. 61: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené laserem, měřeno v rovině B.....</i>	69
<i>Obr. 62: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené laserem, měřeno v rovině C</i>	70
<i>Obr. 63: Boxplot pro drsnost povrchu duralu tl. 10 mm, obrobeného vodním paprskem</i>	73
<i>Obr. 64: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině A</i>	73

<i>Obr. 65: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině B</i>	74
<i>Obr. 66: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 10 v rovině C</i>	74
<i>Obr. 67: Boxplot pro drsnost povrchu duralu tl. 5 mm, obrobeného vodním paprskem</i>	76
<i>Obr. 68: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině A</i>	76
<i>Obr. 69: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině B</i>	77
<i>Obr. 70: Sumář výsledků pro drsnost duralu tloušťky 5 v rovině C</i>	77
<i>Obr. 71: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 20 mm, obrobeného vodním paprskem</i>	79
<i>Obr. 72: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině A</i>	79
<i>Obr. 73: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině B</i>	80
<i>Obr. 74: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 20 v rovině C</i>	80
<i>Obr. 75: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 10 mm, obrobeného vodním paprskem</i>	82
<i>Obr. 76: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině A</i>	82
<i>Obr. 77: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině B</i>	83
<i>Obr. 78: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 10 v rovině C</i>	83
<i>Obr. 79: Boxplot pro drsnost povrchu oceli tl. 1,5 mm, obrobeného vodním paprskem</i>	84
<i>Obr. 80: Sumář výsledků pro drsnost oceli tloušťky 1,5 v rovině B</i>	85
<i>Obr. 81: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené vodním paprskem, měřeno v rovině A</i>	86
<i>Obr. 82: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené vodním paprskem, měřeno v rovině B</i>	87
<i>Obr. 83: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené vodním paprskem, měřeno v rovině C</i>	88
<i>Obr. 84: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu duralu tl. 10</i>	90
<i>Obr. 85: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 10 v rovině A</i>	91
<i>Obr. 86: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 10 v rovině C</i>	91
<i>Obr. 87: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu duralu tl. 5</i>	92
<i>Obr. 88: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 5 v rovině A</i>	93
<i>Obr. 89: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 5 v rovině C</i>	93
<i>Obr. 90: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 20</i>	94
<i>Obr. 91: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 20 v rovině A</i>	95
<i>Obr. 92: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 20 v rovině C</i>	95
<i>Obr. 93: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 10</i>	96
<i>Obr. 94: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 10 v rovině A</i>	97

<i>Obr. 95: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 10 v rovině C</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 96: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 1,5</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 97: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 1,5 v rovině A.....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 98: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 1,5 v rovině C</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 99: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené laserem, měřeno v rovině A.....</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 100: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené laserem, měřeno v rovině C</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 101: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu duralu tl. 10</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 102: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 10 v rovině A.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 103: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 10 v rovině C.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 104: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu duralu tl. 5</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 105: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 5 v rovině A.....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 106: Sumář výsledků měření vzorku z duralu tl. 5 v rovině C.....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 107: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 20</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 108: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 20 v rovině A.....</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 109: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 20 v rovině C</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 110: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 10</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 111: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 10 v rovině A.....</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 112: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 10 v rovině C</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 113: Boxplot rozměrů kuželovitosti řezu oceli tl. 1,5</i>	<i>110</i>
<i>Obr. 114: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 1,5 v rovině A.....</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 115: Sumář výsledků měření vzorku z oceli tl. 1,5 v rovině C</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 116: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené vodním paprskem, měřeno v rovině A.....</i>	<i>112</i>
<i>Obr. 117: Konfidenční intervaly pro vzorky obrobené vodním paprskem, měřeno v rovině C</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 118: Struktura duralu 5 mm</i>	<i>120</i>
<i>Obr. 119: Povrch po opracování vodním paprskem zvětšený 400x</i>	<i>121</i>
<i>Obr. 120: Struktura oceli 10 mm</i>	<i>121</i>
<i>Obr. 121: Povrchu oceli 10 mm po opracování laserem a zvětšení 400x</i>	<i>122</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Hustota energie z různých zdrojů [1]</i>	34
<i>Tab. 2: Řezné podmínky pro řezání laserem</i>	47
<i>Tab. 3: Řezné rychlosti pro řezání vodním paprskem</i>	49
<i>Tab. 4: Hodnoty drsnosti pro dural tl. 10 mm</i>	53
<i>Tab. 5: Hodnoty drsnosti pro dural tl. 5 mm</i>	56
<i>Tab. 6: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 20 mm</i>	59
<i>Tab. 7: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 10 mm</i>	62
<i>Tab. 8: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 1,5 mm</i>	65
<i>Tab. 9: Hodnoty drsnosti pro dural tl. 10 mm</i>	72
<i>Tab. 10: Hodnoty drsnosti pro dural tl. 5 mm</i>	75
<i>Tab. 11: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 20 mm</i>	78
<i>Tab. 12: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 10 mm</i>	81
<i>Tab. 13: Hodnoty drsnosti pro ocel tl. 1,5 mm</i>	84
<i>Tab. 14: Kuželovitost vzorku z duralu tl. 10, laser</i>	90
<i>Tab. 15: Kuželovitost vzorku z duralu tl. 5, laser</i>	92
<i>Tab. 16: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 20, laser</i>	94
<i>Tab. 17: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 10, laser</i>	96
<i>Tab. 18: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 1,5, laser</i>	98
<i>Tab. 19: Tabulka kuželovitosti</i>	101
<i>Tab. 20: Kuželovitost vzorku z duralu tl.10, vodní paprsek</i>	102
<i>Tab. 21: Kuželovitost vzorku z duralu tl. 5, vodní paprsek</i>	104
<i>Tab. 22: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 20, vodní paprsek</i>	106
<i>Tab. 23: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 10, vodní paprsek</i>	108
<i>Tab. 24: Kuželovitost vzorku z oceli tl. 1,5, vodní paprsek</i>	110
<i>Tab. 25: Tabulka kuželovitosti</i>	113
<i>Tab. 26: Rozměry vzorku z duralu tloušťky 10 mm</i>	114
<i>Tab. 27: Rozměry vzorku z duralu tloušťky 5 mm</i>	115
<i>Tab. 28: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 20 mm</i>	115
<i>Tab. 29: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 10 mm</i>	116
<i>Tab. 30: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 1,5 mm</i>	116
<i>Tab. 31: Rozměry vzorku z duralu tloušťky 10 mm</i>	117
<i>Tab. 32: Rozměry vzorku z duralu tloušťky 5 mm</i>	118

<i>Tab. 33: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 20 mm</i>	118
<i>Tab. 34: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 10 mm</i>	119
<i>Tab. 35: Rozměry vzorku z oceli tloušťky 1,5 mm</i>	119