

Problematika laserového dělení plechů

Bc. Filip Větršíšek

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip Větršíšek**
Osobní číslo: **T17580**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Problematika laserového dělení plechů**

Zásady pro vypracování:

1. Optimalizace technologických parametrů laseru
2. Experimentální obrábění různých kovových materiálů
3. Vyhodnocení řezných ploch (kvalita, změny struktury)
4. Statistické zpracování výsledků

Rozsah diplomové práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh: **dle pokynů VDP**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Maňková, I. Progresivní technologie. Viena, Košice 2000. ISBN 80-7099-430-4.**
2. **Kocman, K., Prokop, J. Technologie obrábění. Vyd. 2. Brno: CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.**
3. **Hendl, I. An overview of statistical methods for data processing. Portal, Praha 2008. ISBN 80-7178-820-1.**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o technologii laserového obrábění.

Teoretická část se v úvodu zabývá přehledem nekonvenčních metod obrábění, jako jsou například obrábění plasmovým paprskem, iontovým paprskem, elektronovým paprskem, elektroerozivní obrábění a další. Hlavním předmětem teoretické části práce je fyzikální podstata vzniku laserového paprsku a jeho vlastností, princip laseru, rozdělení laserů a jejich praktické využití. Součástí literární studie je také přehled jednotlivých metod použitých pro následné vyhodnocení naměřených veličin.

Praktická část zahrnuje výrobu vzorků z různých materiálů a popis experimentu. Cílem experimentální části je posouzení vlivu různých technologických parametrů zařízení na kvalitu povrchu řezné plochy a zabývá se také možným vznikem strukturálních změn v materiálu po průchodu laserového paprsku. Detailně je tato problematika testována na vybraných kovových materiálech a získaná data jsou statisticky vyhodnocena pomocí teorie hypotéz.

Klíčová slova: Laser, nekonvenční technologie, laserový paprsek, vláknový laser.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with laser cutting technology.

The theoretical part deals with an overview of unconventional machining methods, such as plasma arc machining, ion beam machining, electron beam machining, electrical discharge machining and others. The main subject of the theoretical part of the thesis is the physical basis of the laser beam formation and its properties, the principle of laser, the division of lasers and their practical use. The literary study also includes an overview of the individual methods used for the subsequent evaluation of the measured quantities.

The practical part includes the production of samples from various materials and the description of the experiment. The aim of the experimental part is to assess the influence of various technological parameters of the device on the surface quality of the cutting surface and also deals with the possible occurrence of structural changes in the material after passage of the laser beam. This issue is tested in detail on selected metal materials and the obtained data are statistically evaluated using hypothesis theory.

Keywords: Laser, unconventional technology, laser beam, fiber laser.

Na tomto místě chci poděkovat vedoucí mé práce doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za cenné rady, vedení a její trpělivost. Nemohu opomenout pana doc. Dr. Ing. Vladimíra Patu za jeho volný čas, pomoc s měřením a statistickým zpracováním. Dále panu prof. Ing. Zdeňkovi Jonštovi CSc. za pomoc s měřením a firmě NERA DISPLAYS s. r. o. za umožnění výroby vzorků. Za pevnou důvěru chci poděkovat svým rodičům a v neposlední řadě své přítelkyni za psychickou podporu.

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

Ve Zlíně, 17. 5. 2019

.....

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ.....	12
1.1 VÝHODY NT	12
1.2 NEVÝHODY NT	12
1.3 KLASIFIKACE NT	13
1.3.1 Podle hlavního energetického zdroje	13
1.3.2 Podle převládajícího mechanismu.....	13
1.4 CHARAKTERISTIKA NT	14
1.4.1 Obrábění ultrazvukem – USM	14
1.4.2 Obrábění proudem brusiva – AJM, AFM.....	15
1.4.3 Obrábění vodním paprskem – WJM, AWJM	16
1.4.4 Chemické obrábění – CM	16
1.4.5 Fotochemické obrábění – PCM.....	17
1.4.6 Elektrochemické obrábění – ECM	17
1.4.7 Elektrojiskrové obrábění – EDM	18
1.4.8 Obrábění elektronovým paprskem – EBM	18
1.4.9 Obrábění iontovým paprskem – IBM	19
1.4.10 Obrábění plazmovým paprskem – PAM.....	20
2 TECHNOLOGIE LASERU	21
2.1 PRINCIP LASERU	21
2.2 VLASTNOSTI LASEROVÉHO SVAZKU	22
2.3 METODY ŘEZÁNÍ LASEREM.....	22
2.3.1 Tavné laserové řezání.....	22
2.3.2 Sublimační laserové řezání	22
2.3.3 Oxidační laserové řezání	23
2.4 INTERAKCE LASEROVÉHO PAPRSKU A MATERIÁLU	23
2.5 ROZDĚLENÍ LASERŮ	24
2.6 VÝHODY LASEROVÉHO DĚLENÍ MATERIÁLŮ	25
2.7 NEVÝHODY LASEROVÉHO DĚLENÍ MATERIÁLŮ.....	25
3 ZKOUMANÉ PARAMETRY	26
3.1 JAKOST POVRCHU	26
3.2 MIKROTVRDOST	27
3.2.1 Mikrotvrdość podle Vickerse.....	28
4 TEORIE HYPOTÉZ.....	29
II PRAKTICKÁ ČÁST	31
5 POPIS EXPERIMENTU	32

5.1	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	32
5.2	POPIS LASEROVÉHO ZAŘÍZENÍ.....	32
5.3	POUŽITÉ MATERIÁLY	33
5.3.1	Konstrukční ocel – 11 375	33
5.3.2	Nerezová ocel – 17 240.....	33
5.3.3	Slitina hliníku – EN AW 1050 H24	33
5.4	VÝROBA VZORKŮ	34
5.4.1	Vzorky z konstrukční oceli 11 375	35
5.4.2	Vzorky z nerezové oceli 17 240.....	36
5.4.3	Vzorky ze slitiny hliníku AW 1050 H24	37
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	39
6.1	DRSNOST POVRCHU	39
6.1.1	Drsnost povrchu – konstrukční ocel 11 375.....	40
6.1.2	Drsnost povrchu – nerezová ocel 17 240	49
6.1.3	Drsnost povrchu – slitina hliníku AW 1050 H24.....	55
6.1.4	Srovnání vlivu paprsku na různé materiály.....	64
6.2	STANOVENÍ HYPOTÉZ	66
6.2.1	Testovací hypotéza pro vzorek K-A1	66
6.2.2	Testovací hypotéza pro vzorek K-A5	69
6.2.3	Testovací hypotéza pro vzorek N-A1	72
6.2.4	Testovací hypotéza pro vzorek N-A5	75
6.2.5	Testovací hypotéza pro vzorek H-A1	78
6.2.6	Testovací hypotéza pro vzorek H-A5	81
6.3	TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ MATERIÁLU	84
6.3.1	Tepelné ovlivnění materiálu 11 375.....	85
6.3.2	Tepelné ovlivnění materiálu 17 240.....	88
	ZÁVĚR	91
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	93
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	95
	SEZNAM OBRÁZKŮ	97
	SEZNAM TABULEK.....	101
	SEZNAM PŘÍLOH.....	102

ÚVOD

Vývoj nových materiálů přispěl ke vzniku nekonvenčních technologií obrábění. Tyto nové materiály disponují vysokou tvrdostí, pevností a především těžkou obrobiteľností, proto musely vzniknout nové metody pro jejich zpracování.

Nekonvenční metody obrábění nevyužívají pro odebrání materiálu mechanickou práci, ale dochází k úběru pomocí fyzikálních, chemických a elektrických principů. Na rozdíl od konvenčních metod nedochází ke kontaktu nástroje s obrobkem a v místě oddělování částic materiálu nevzniká řezný odpor a obrobek se nedeformuje mechanickým zatížením. Nekonvenční metody se využívají hlavně pro materiály, které jsou běžným mechanickým způsobem těžce obrobiteľné nebo jsou neobrobiteľné, a proto dochází v současné době k nahrazování běžných metod obrábění metodami nekonvenčními.

Mezi jednu z nejrozšířenějších NT současnosti patří technologie laserového paprsku. Tato technologie se rozšířila téměř do všech oblastí lidského života. Můžeme ji najít v strojírenském průmyslu, lékařství, kosmickém průmyslu, vojenství, zábavním průmyslu, měřicí technice, kosmetice a ve výpočetní technice. V současné době je použití laserové technologie ve strojírenství naprosto běžné, přičemž nejčastější použití je pro řezání, svařování nebo značení výrobků. Laser se využívá pro dělení velkého množství materiálů.

V této práci se zabývám problematikou laserového dělení plechů z různých materiálů na vláknovém laseru. Dále je v práci zkoumán vliv laserového paprsku na kvalitu povrchu řezné plochy při různém nastavení technologických parametrů laserového zařízení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

S vývojem nových materiálů hlavně v kosmickém, leteckém a zbrojním průmyslu, kde jsou kladeny vysoké požadavky na jejich pevnost a tvrdost, se musely vyvinout i nové technologie pro zpracování těchto materiálů. Pomocí konvenčních metod bylo zpracování těchto materiálů technicky a ekonomicky velmi náročné nebo dokonce nemožné. Proto byly vyvinuty nekonvenční metody obrábění.

Tyto technologie nevyužívají k úběru materiálu mechanické práce a nedochází k tvorbě třísky. K úběru materiálu dochází za použití fyzikálních, chemických a elektrických principů nebo jejich kombinací. Při obrábění nekonvenčními metodami nedochází ke kontaktu nástroje s obrobkem a není nutné, aby nástroj byl tvrdší než obráběný materiál, tak jako tomu je u konvenčních způsobů obrábění.

Nekonvenční technologie nejsou na rozdíl od klasických způsobů třískového obrábění limitovány mechanickými vlastnostmi materiálu, jako je tvrdost nebo pevnost. Obrobitelnost materiálu je především limitována jeho fyzikálními vlastnostmi a chemickým složením, např. teplota tavení, tepelná vodivost, elektrická vodivost apod. [1], [2]

1.1 Výhody NT

- Rychlost a výkonnost obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu
- Materiál nástroje nemusí být tvrdší a pevnější než obráběný materiál
- Možnost obrábění složitých tvarů součástí
- Malá nebo žádná deformace obrobku
- Dobrá automatizace [2]

1.2 Nevýhody NT

- Vysoká pořizovací cena
- Vysoké náklady na údržbu a servis
- Vyšší energetická náročnost [2]

1.3 Klasifikace NT

1.3.1 Podle hlavního energetického zdroje

- a) Mechanické procesy:
 - Obrábění ultrazvukem (USM – Ultrasonic machining)
 - Obrábění proudem brusiva (AJM – Abrasive jet machining, AFM – Abrasive flow machining)
 - Obrábění vodním paprskem (WJM – Water jet machining, AWJM – Abrasive water jet machining)
- b) Chemické procesy:
 - Chemické obrábění (CM – Chemical machining)
 - Fotochemické obrábění (PCM – Photochemical machining)
- c) Elektrochemické procesy:
 - Elektrochemické obrábění (ECM – Electrochemical machining)
 - Elektrochemické broušení (ECG – Electrochemical grinding)
- d) Elektrotepelné procesy:
 - Elektrojiskrové obrábění (EDM – Electrical discharge machining)
 - Obrábění laserem (LBM – Laser beam machining)
 - Obrábění elektronovým paprskem (EBM – Electron beam machining)
 - Obrábění iontovým paprskem (IBM – Ion beam machining)
 - Obrábění plazmovým paprskem (PAM – Plasma arc machining) [2]

1.3.2 Podle převládajícího mechanismu

- a) Procesy s brusným účinkem
- b) Procesy s erozivním účinkem
- c) Procesy chemického rozpouštění materiálu
- d) Procesy s tepelným účinkem [2]

1.4 Charakteristika NT

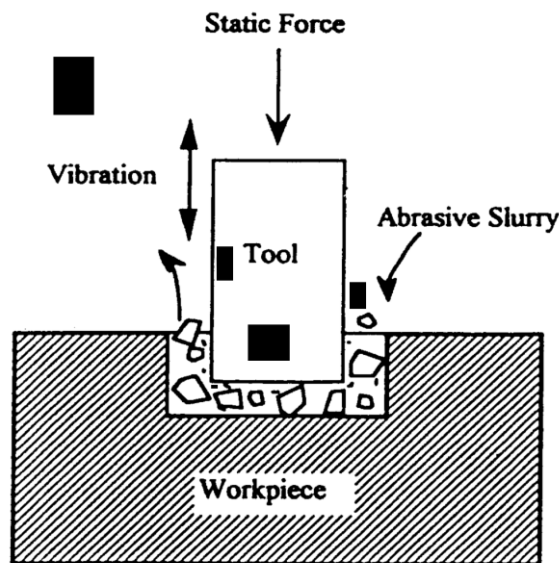
1.4.1 Obrábění ultrazvukem – USM

Ultrazvuk – kmitavá mechanicko-akustická energie o frekvenci nad slyšitelností lidského ucha.

Jedná se o proces, který využívá ultrazvukové vlny s frekvencí okolo 20 kHz na úběr materiálu. Dochází k rozbrušování povrchu nárazovým účinkem rozkmitaného brusiva a působením kavitační eroze.

Jedná se o technologii vyvinutou v 50. letech pro opracování keramických materiálů a křehkých materiálů (diamant, keramika, sklo), ale i pórovitých materiálů (grafit).

V současnosti se obrábění ultrazvukem používá u běžných postupů obrábění tvrdých, křehkých, nevodivých a nekovových materiálů. [1], [2]



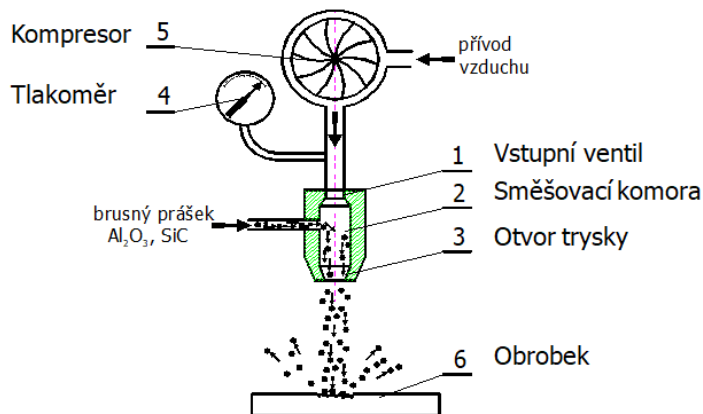
Obr. 1: Obrábění ultrazvukem [2]

1.4.2 Obrábění proudem brusiva – AJM, AFM

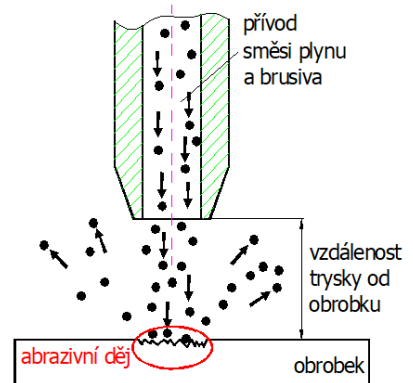
AJM – opracování paprskem abraziva obsaženým v proudu stlačeného plynu

AFM – tvarování povrchu a hran přetlačováním polotuhého abrazivního média přes zúžený průchod tvořený kombinací přípravek/obrobek

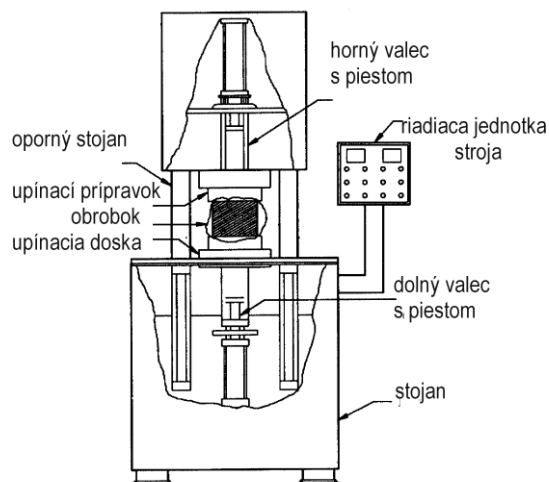
Jde o opracování povrchu mechanickým nárazem částice, kde k úběru materiálu dochází dopadem vysokorychlostního proudu abrazivních částic s vysokou kinetickou energií. Při této metodě je materiál odstraňován mechanickým působením směsi stlačeného vzduchu nebo jiného průmyslového plynu s velmi jemnými brusnými částicemi ve formě brusného prášku. [1], [2]



Obr. 2: Zařízení AJM [2]



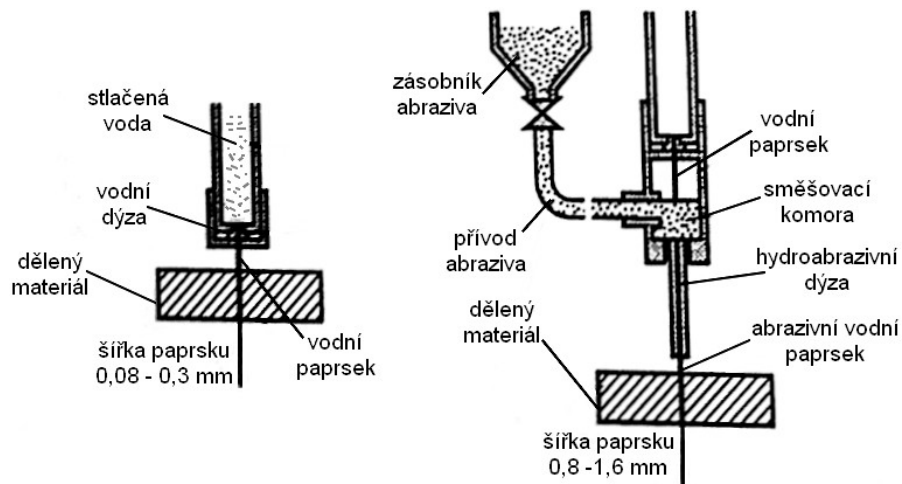
Obr. 3: Detail procesu AJM [2]



Obr. 4: Zařízení AFM [2]

1.4.3 Obrábění vodním paprskem – WJM, AWJM

Využívá k oddělování materiálu kinetickou energii vysokorychlostního a vysokotlakého proudění vody, kombinovanou s kinetickou energií abrazivních částic. Při této metodě je materiál odebrán erozivním procesem v důsledku působení rezného média usměrněného do úzkého paprsku, který prochází přes trysku do obrobku. [1], [2]

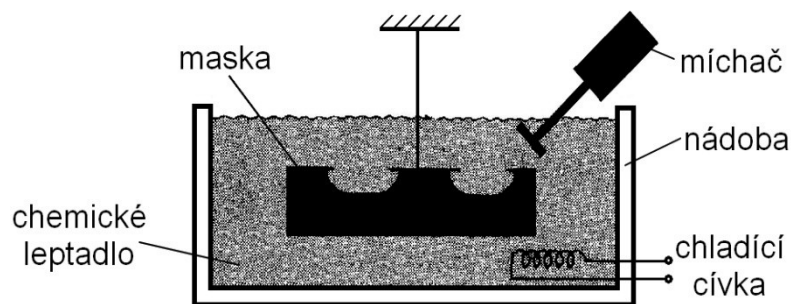


Obr. 5: Obrábění vodním paprskem [2]

1.4.4 Chemické obrábění – CM

Patří k nejstarším procesům tvarování povrchu. Je to proces leptání povrchu kovových materiálů postupným rozpouštěním vrstev materiálů do hloubky několika milimetrů.

Využívá se chemických reakcí mezi materiálem obrobku a chemickou látkou (nástrojem), nejčastěji kyselinou nebo hydroxidem. Leptací roztok je chemická sloučenina se speciálními přísadami, které se přidávají pro zvýšení smáčivosti. Místa, které nechceme obrábět, zakrýváme tzv. maskami. [1], [2]



Obr. 6: Chemické obrábění [2]

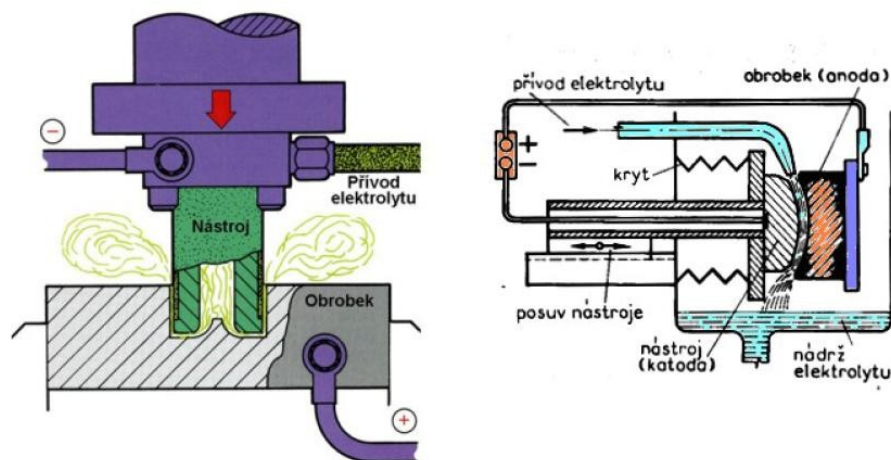
1.4.5 Fotochemické obrábění – PCM

Kromě chemických dějů využívá na tvarování dílců poznatky z fotografické techniky - tvarové odleptávání otvorů do velmi tenkých materiálů a fólií.

Jde o modifikaci chemického frézování, při kterém je z povrchu obrobku materiál odebírán fotografickou technikou. Tato metoda se také označuje jako chemické vystřihování. Jedná se o metodu, která je vhodná především pro přesné obrábění součástí, pro použití v elektrotechnice. [1], [2]

1.4.6 Elektrochemické obrábění – ECM

Tato metoda obrábění využívá elektrochemického jevu, zvaného řízená elektrolyza. Jde o řízený úběr materiálu jeho anodickým rozpouštěním v elektrolytu. Obrobek zapojen do obvodu stejnosměrného proudu má kladný pól (anoda) a obráběcí nástroj je napojen na záporný pól, tvoří anodu daného elektrického obvodu. Mezi nástrojem a obrobkem musí být udržována mezera, která umožňuje proudění elektrolytu mezi anodou a katodou. Tvar nástroje (katody) se kopíruje do obrobku (anody). [1], [2]

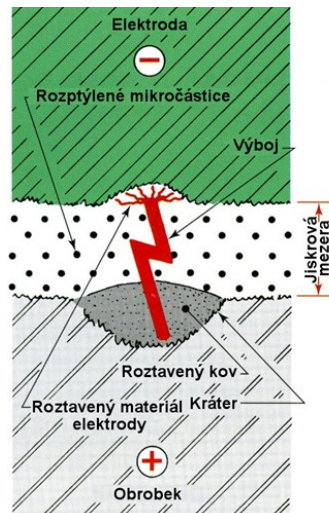


Obr. 7: Elektrochemické obrábění [2]

1.4.7 Elektrojiskrové obrábění – EDM

Elektroerozivní obrábění je nejrozšířenější metodou progresivního obrábění. K úběru materiálu je využíván elektrický výboj. Elektrický výboj nastává mezi dvěma elektrodami ponořenými do kapalného média s vysokým odporem tzv. dielektrika.

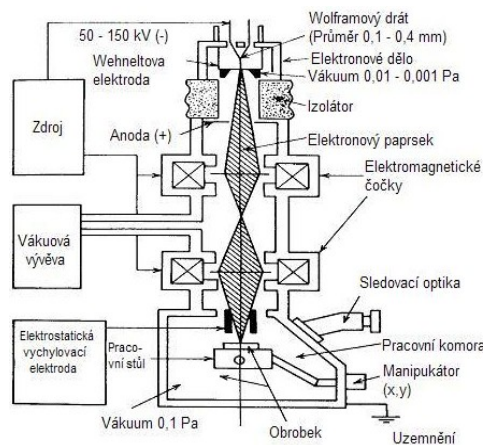
Vlivem vysoké koncentrace energie dochází k tavení materiálu a jeho odpařování. Touto metodou lze obrábět pouze vodivé materiály. [1], [2]



Obr. 8: Elektrojiskrové obrábění [2]

1.4.8 Obrábění elektronovým paprskem – EBM

EBM využívá kinetickou energii urychlených elektronů, která se při srážce s materiálem přemění na tepelnou energii schopnou tavit a odpařit materiál v místě dopadu. Tato metoda využívá pro vznik toku elektronů jev termoemise. Vzniká v dostatečně zahřátém kovu, kdy mají elektrony dostatečnou energii k tomu, aby mohly vylézt z kovu a volně se pohybovat v prostoru. [1], [2]



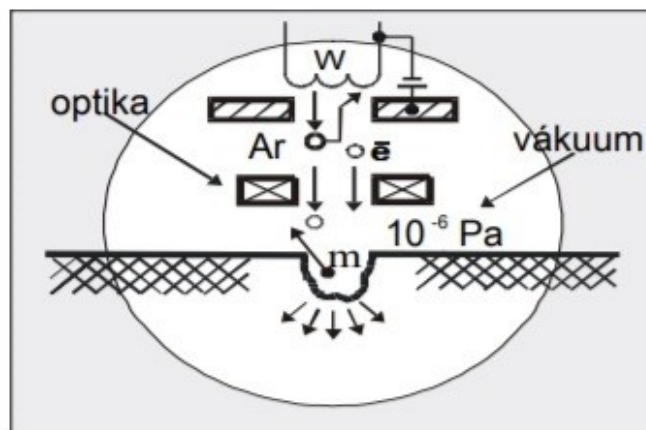
Obr. 9: Elektronové dělo [2]

1.4.9 Obrábění iontovým paprskem – IBM

Ionty vznikají ionizací plynu. Pro ionizaci se používají inertní plyny, jako jsou xenon, argon, krypton. Inertní plyn je urychlován působením elektrického pole a vzniká svazek vysokoenergetických iontů – iontový paprsek. Intenzita úběru materiálu je úměrná hustotě proudu iontů, úhlu dopadu iontového paprsku na povrch obrobku, poměru hmotnosti iontů a atomů materiálu obrobku a na energii dopadajících iontů.

Proces obrábění iontovým paprskem je dynamický proces. Při dynamickém procesu obrábění iontovým paprskem dochází k vyražení atomů cíle (obrobku) pomocí elektrostatické kolize, ke které dochází při dopadu iontů na povrch materiálu.

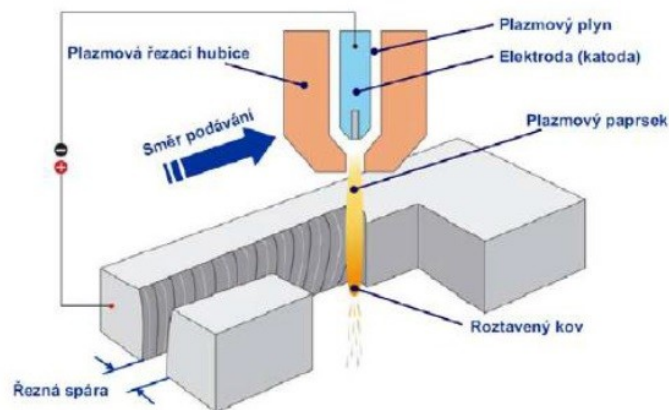
Obráběcí zařízení, které se používá pro obrábění iontovým paprskem, se skládá ze zdroje iontů, iontového separátoru a pracovního stolu pro ukládání vzorků. [1], [2]



Obr. 10: Zařízení pro IBM [2]

1.4.10 Obrábění plazmovým paprskem – PAM

Plazma je stav plynů, které se ionizací stávají vodivé. Teplota zcela zionizované plazmy se pohybuje okolo 100 000 K. Plazma vzniká, buď ohřevem látky na velmi vysokou teplotu, nebo elektrickým výbojem mezi dvěma elektrodami. Technologie obrábění plazmou využívá tavení materiálu v elektrickém oblouku, který hoří mezi netavící se katodou (nástrojem) a tavící se anodou (řezaným obrobkem). Dochází k rozložení molekul plynu, při kterém dochází k vysokému vývinu tepla. Z hořáku vychází paprsek plazmy, ten je zionizován a tím je dobře vodivý pro elektrický proud. Roztavený materiál je pak kinetickou energií proudu plazmy vytlačován z místa řezu. [1], [2]



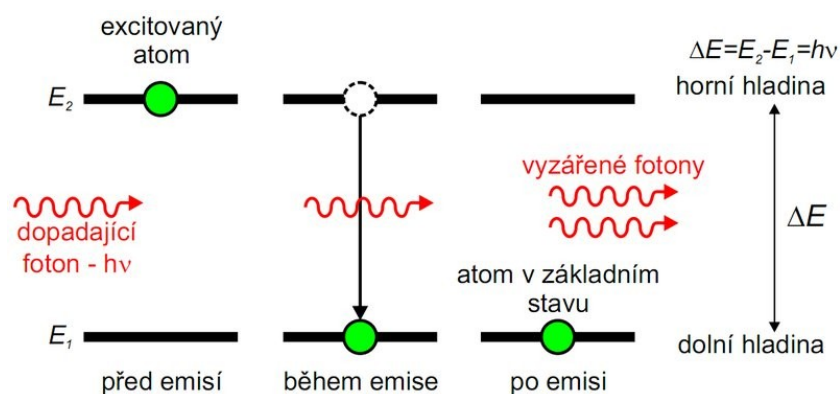
Obr. 11: Obrábění plazmou [2]

2 TECHNOLOGIE LASERU

Laserová technologie byla objevena ve 20. století a patří mezi největší objevy tohoto století. Název LASER vznikl spojením prvních písmen z anglického názvu *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, což znamená zesilování světla stimulovanou emisí záření. Už v roce 1917 princip laseru popsal Albert Einstein v kvantové teorii záření. V roce 1960 vynikl první laser, který sestrojil fyzik Theodore H. Maiman, jednalo se o rubínový laser. Laser lze zjednodušeně popsat jako optický zdroj elektromagnetického záření, tedy světla, kdy má světlo vyzařované laserem formu úzkého svazku na rozdíl od přirozených světelných zdrojů. Předchůdcem laseru je tzv. maser. Technologie laseru našla uplatnění v mnoha oblastech lidského života. [3]

2.1 Princip laseru

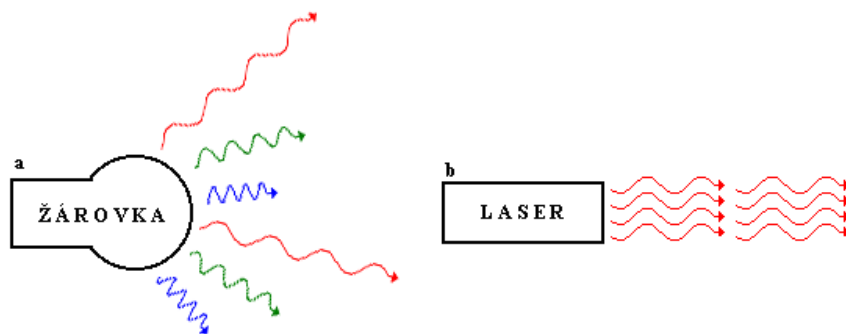
Laserový paprsek vzniká zesilováním světla stimulovanou emisí záření. Ta je vyvolána dopadem elektromagnetického záření (fotonu) na atom prvku. Elektron, který obíhá jádro atomu, pohltí energii záření a excituje na vyšší energetickou hladinu. Záření musí mít energii potřebnou k přesunu elektronu na vyšší energetickou hladinu. V atomu vznikne nerovnovážený stav a elektron je přinucen rovnováhou sil vyzářit energii a vrátit se na původní oběžnou dráhu. Tato vyzářená energie ve formě fotonů má jednu vlnovou délku, záření je monochromatické a fotony se pohybují ve svazku jedním směrem a jsou pravidelně uspořádány. Zesílením je vytvořen úzký svazek fotonů. [4]



Obr. 12: Stimulovaná emise [5]

2.2 Vlastnosti laserového svazku

Světelné záření je definováno jako vlnění, které se homogenním prostředím šíří všemi směry stejnou rychlostí a tvoří rozbíhavý svazek paprsků. Na rozdíl od běžného světelného záření vzniká stimulovanou emisí úzký svazek fotonů. Laserový svazek má jednu vlnovou délku, tzn. vzniklé záření je monochromatické. Dále je laserový paprsek koherentní, což znamená, že se fotony pohybují jedním směrem a paprsek má malou divergenci (rozbíhavost). [6]



Obr. 13: Nekoherentní záření (a), koherentní záření (b) [7]

2.3 Metody řezání laserem

2.3.1 Tavné laserové řezání

Laserový paprsek v kontinuálním režimu zahřívá materiál nad teplotu tavení a roztavený materiál je z místa řezu vyfukován inertním plynem. Jako inertní plyn se používá dusík pod tlakem až 20 barů. Tento způsob řezání se používá pro legované oceli, hliník a nekovové materiály. [8]

2.3.2 Sublimační laserové řezání

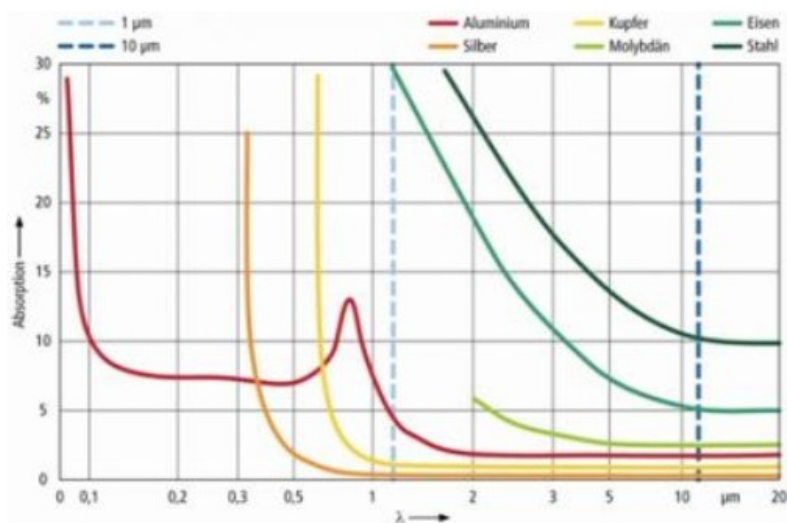
Sublimační řezání způsobuje přímé odpařování materiálu z místa řezu ohřevem materiálu na teplotu odpaření. Vzniklé páry se z místa řezu odstraňují vyfukováním inertním plynem. Výhodou sublimačního řezání je vysoká kvalita povrchu a úzká řezná spára. [8]

2.3.3 Oxidační laserové řezání

Při oxidačním řezání dochází k ohřevu materiálu na zápalnou teplotu a jeho následnému spálení v exotermické reakci s pracovním plynem. Jako pracovní plyn se volí kyslík o tlaku do 5 barů. Oxidační laserové řezání je vhodné pro nelegovanou až středně legovanou ocel, u ostatních kovů dochází k výrazné oxidaci řezných hran. Řezná plocha u nelegovaných ocelí se vyznačuje tenkou vrstvou oxidů. Při oxidačním řezání je možné použít vyšší řeznou rychlost a tloušťku řezu než u tavného řezání. [8]

2.4 Interakce laserového paprsku a materiálu

Schopnost materiálu absorbovat světelnou energii je základním předpokladem pro využití laserové technologie k obrábění. Při dopadu laserového paprsku na povrch materiálu dochází k přeměně světelné energie na energii tepelnou. V místě dopadu paprsku dochází k nárůstu teploty, tavení materiálu a k jeho následnému odpařování a vyfouknutí z místa řezu. Absorpce laserového paprsku nejvíce ovlivňuje vlnová délka záření, úhel dopadu paprsku, druh materiálu a také stav povrchu materiálu. Leštěné povrchy vykazují větší odrazivost než povrchy s vyšší drsností. Obrobitelnost materiálu laserem je tím lepší, čím větší je absorpce materiálu a menší jeho tepelná vodivost a odrazivost. Zvýšení absorpce lze dosáhnout vhodnou úpravou povrchu: speciální fólií, zdrsněním povrchu, vytvořením povlaku nebo mořením. Významný vliv na absorpci má také vlnová délka dopadajícího záření. S rostoucí vlnovou délkou, klesá absorpce záření materiálem. [9]



Obr. 14: Závislost absorpce laserového záření na vlnové délce záření [9]

2.5 Rozdělení laserů

Lasery můžeme rozdělit podle:

- a) Výkonu
 - b) Aktivního prostředí
 - c) Režimu paprsku
 - d) Způsobu čerpání energie
 - e) Vlnové délky
 - f) Použití
-
- a) Podle dosahovaného výkonu
 - Nízkovýkonové – desetiny W až stovky W
 - Vysokovýkonové – 1 kW až 30 kW
 - b) Podle aktivního prostředí
 - Plynové – atomární, iontové, excimerové
 - Kapalinové
 - Pevnolátkové – diskové, vláknové, polovodičové
 - c) Podle režimu paprsku
 - Kontinuální
 - Pulzní
 - Impulsní
 - d) Podle způsobu čerpání energie
 - Optické
 - Elektrické
 - Chemické
 - Termodynamické
 - e) Podle vlnové délky
 - Rentgenové
 - Ultrafialové
 - V oblasti viditelného pásma
 - Infračervené

f) Podle použití

- Technologické
- Lékařské
- Měřicí
- Výzkumné
- Vojenské
- Energetické [10]

2.6 Výhody laserového dělení materiálů

- Tenký řez
- Malá velikost tepelně ovlivněné oblasti
- Minimální opotřebení nástroje
- Čisté řezy
- Možnost řezání složitých tvarů [4]

2.7 Nevýhody laserového dělení materiálů

- Vznik tepelně ovlivněné oblasti
- Nutnost odsávání
- Možnost vzniku mikrotrhlin
- Změna struktury vzniklé plochy [4]

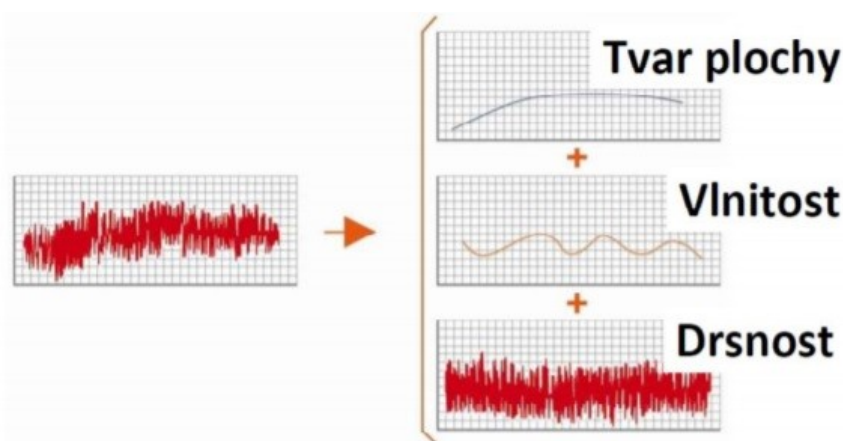
3 ZKOUMANÉ PARAMETRY

3.1 Jakost povrchu

Drsnost povrchu je definována jako nerovnost, která vzniká při výrobě součásti. Tuto nerovnost na součásti zanechává nástroj po určité technologické operaci. Jakost povrchu je velmi důležitá pro spolehlivost a dlouhou životnost součásti. [11], [12]

Strukturu povrchu vytvořeného na součásti, můžeme rozdělit na tři části, které se od sebe liší vlnovou délkou:

- P-profil – tvar plochy (základní profil)
- W-profil – profil vlnitosti
- R-profil – profil drsnosti



Obr. 15: Obecný povrch součásti [11]

V praxi se pro hodnocení kvality povrchu nejčastěji používají parametry Ra a Rz.

- Ra – Průměrná aritmetická úchylka profilu

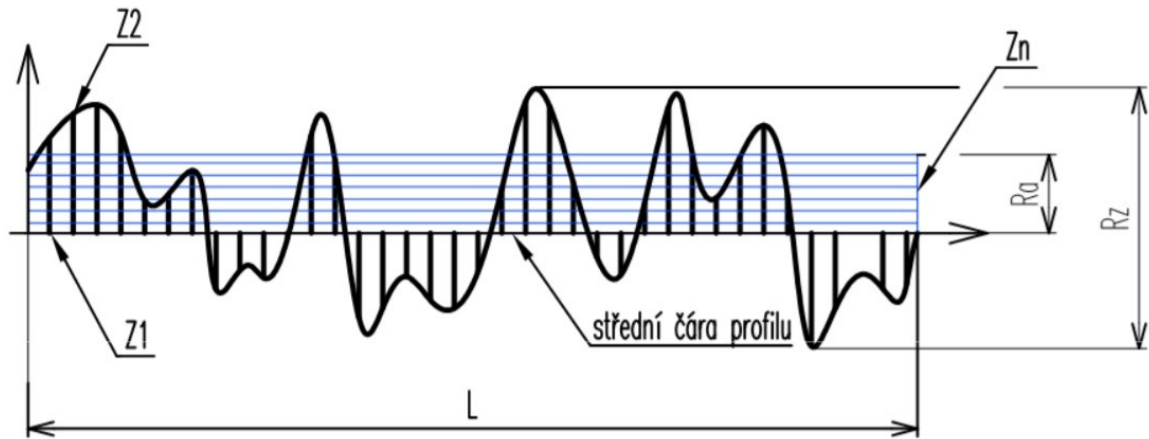
Jde o výškový parametr, který udává aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic v rozsahu základní délky. Nevýhodou parametru Ra je, že nereaguje citlivě na extrémní výstupky profilu a prohlubně profilu. [11], [12]

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| = \frac{|z_1| + |z_2| + |z_3| + \dots + |z_n|}{n}$$

- Rz – Největší výška profilu

Výškový parametr, který udává součet největší výšky výstupku a největší hloubky prohlubně profilu na základní délce. [11], [12]

$$Rz = z_{max} - (z_{min})$$



Obr. 16: Zobrazení Rz a Ra [12]

3.2 Mikrotvrдость

Zkoušky pro měření mikrotvrđosti jsou v principu stejné jako zkoušky pro měření makrotvrđosti. Oproti zkouškám makrotvrđosti se liší především velikostí zatížení. Mezi nejpoužívanější zkoušky mikrotvrđosti patří zkoušky podle Vickerse, podle Knoop a podle Berkoviče.

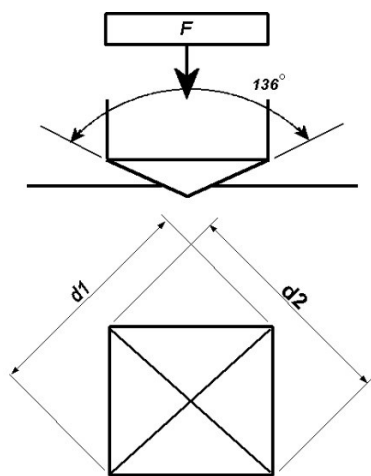
Zkoušky pro měření mikrotvrđosti jsou vhodné pro:

- měření tvrdosti tenkých povlaků
- malé, tenké nebo křehké součásti
- měření tvrdosti strukturních složek a fází
- hodnocení svarových spojů
- zjištění rozdílů tvrdosti mezi hranicemi a vnitřky zrn
- studium difúzních pochodů [13], [14]

3.2.1 Mikrotvrdotost podle Vickerse

Princip zkoušky spočívá ve vnikání tělesa (indentoru) do povrchu zkoušeného materiálu. Jako indenter slouží čtyřboký hranol s vrcholovým úhlem 136° , který je zatěžován silou F po určitou dobu. Po uplynutí této doby je indenter odlehčen, je změřena délka dvou na sebe kolmých úhlopříček vtisku a vypočítána tvrdost materiálu. V důsledku malé velikosti zatížení vznikají malé vtisky, které se obtížně měří. Z tohoto důvodu musí být zkoušený povrch dobře upraven např. metalografickými výbrusy. [13], [14]

Zkoušku upravuje norma ČSN EN ISO 6507 – 1.



Obr. 17: Princip zkoušky [15]

4 TEORIE HYPOTÉZ

K nejdůležitějším postupům statistického usuzování patří společně s metodami teorie odhadu také testování statistických hypotéz. Statistickou analýzou dat získaných sledováním měřené náhodné veličiny v experimentu jsme schopni rozhodnout o platnosti určitého obecného tvrzení. Statistickou hypotézou můžeme rozumět jakékoliv tvrzení, které se může týkat neznámých parametrů, daných funkcí parametrů, ale i dalších vlastností základního souboru.

V prvním kroku se při statistickém testování formuluje statistická hypotéza, tzn. stanovení nulové hypotézy H_0 a alternativní hypotézy H_A .

- Nulová hypotéza H_0 – jde o tvrzení, které obvykle vyjadřuje nulový rozdíl mezi testovanými soubory.
- Alternativní hypotéza H_A – popírá platnost nulové hypotézy. Jedná se o logický opak nulové hypotézy H_0 .

Druhým krokem je stanovení hladiny významnosti testu. Hladina významnosti stanovuje pravděpodobnost, že se zamítne nulová hypotéza.

Při testování hypotéz se můžeme dopustit dvou chyb:

- Chyba 1. druhu (α) – zamítneme nulovou hypotézu, když platí
- Chyba 2. druhu (β) – nezamítneme nulovou hypotézu, když neplatí

Pravděpodobnost $1 - \beta$ je definována také jako „síla testu“ a představuje pravděpodobnost, že správně zamítneme nulovou hypotézu H_0 , když neplatí.

Třetím krokem je výpočet testovacího kritéria, na jehož základě provádíme rozhodnutí o platnosti nulové hypotézy H_0 . Jako testovací kritérium mohou sloužit např.:

- t-test – testování rozdílu dvou středních hodnot
- F-test – testování rozdílu dvou rozptylů
- χ^2 -test – testování rozdílu četností souborů

Poslední krok při testování statistických hypotéz představuje formulace závěru testování. To můžeme provést převedením testovací statistiky do pravděpodobnostní škály.

Jestliže je P-hodnota menší než hladina významnosti α , zamítáme nulovou hypotézu H_0 ($p < 0,05$ statisticky významný rozdíl).

Jestliže je P-hodnota větší než hladina významnosti α , nulovou hypotézu H_0 nemůžeme zamítnout a tedy předpokládáme, že platí. [16]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 POPIS EXPERIMENTU

5.1 Cíle praktické části

- Výroba vzorků na laseru
- Vyhodnocení vlivu řezných podmínek na kvalitu řezné plochy
- Vyhodnocení strukturních změn na základě zkoušek mikrotvrlosti

5.2 Popis laserového zařízení

NESSAP GAMA 3015FL – CNC vláknový řezací laser



Obr. 18: CNC laser

Laserový řezací automat NESSAP GAMA je určený pro tvarové vyřezávání z tabulí plechu. Stroj využívá nejnovější technologie pro dělení materiálu laserovým paprskem. Jedná se o vláknový laser portálové konstrukce určený k dělení materiálu laserovým paprskem s maximálním výkonem 2000 W. Stroj je dodáván s výměnnými pracovními stoly, které umožňují rychlé zakládání materiálu a pohodlné vyložení výpalků v přední části stroje. Řezací hlava je během chodu stroje monitorována kamerou a obraz je přenášen na obrazovku řídicího panelu. [17]

Technické parametry:

Typ rezonátoru: Ytterbium Fiber Laser YLS

Výkon: 2000 W

Pracovní plocha stolu: 3000x1500 mm

Přesnost řezání: +/- 0,1 mm

Šířka spáry řezu: 0,1 - 0,6 mm dle materiálu

Max. tloušťka řezaného materiálu:

- konstrukční ocel 12 mm
- nerezová ocel 6 mm
- mosaz 4 mm
- měděné slitiny 3 mm
- hliníkové slitiny 5 mm [17]

5.3 Použité materiály

5.3.1 Konstrukční ocel – 11 375

Jedná se o neušlechtilou konstrukční ocel obvyklé jakosti. Tato ocel je vhodná na součásti konstrukcí a strojů středních tlouštěk, namáhané staticky i dynamicky. Vhodná ke svařování a součásti vyráběné z plechů a součásti kované pro tepelná energetická zařízení podle a tlakové nádoby. Značení: 1.0038. [18]

5.3.2 Nerezová ocel – 17 240

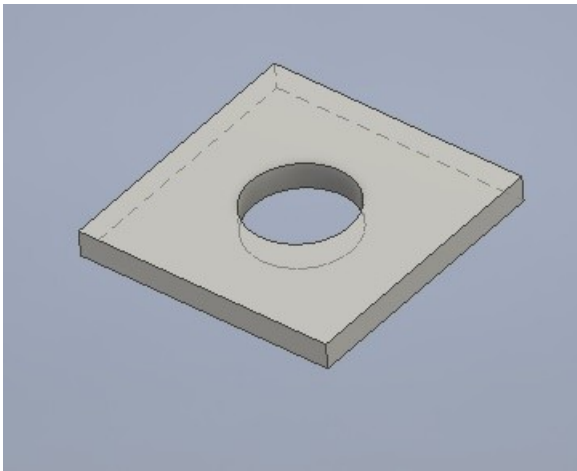
Nerezavějící austenitická ocel obsahující 18% chromu a 10% niklu. Odolnost proti korozi v prostředí běžného typu. Jde o ocel se zaručenou svařitelností s náchylností k mezikrystalové korozi. Vhodná pro gastronomická zařízení, vnější konstrukce, vodárny. Značení: 1.4301. [19]

5.3.3 Slitina hliníku – EN AW 1050 H24

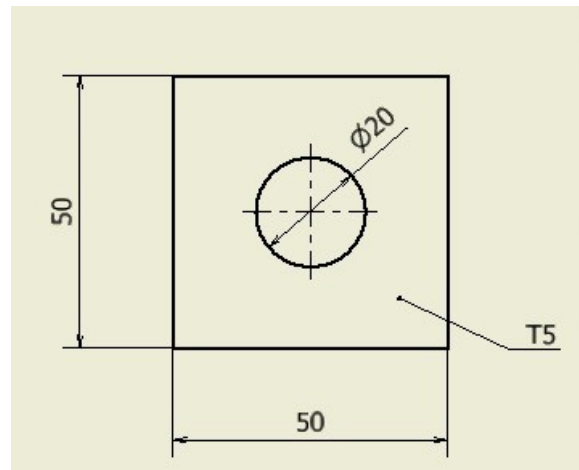
Jde o nelegovaný hliník s maximálním podílem nečistot 0,5 %. Materiál je tepelně nevytvrditelný. Používá se pro výrobu zásobních nádrží, výměníků tepla, reflektorů, obalových materiálů. [20]

5.4 Výroba vzorků

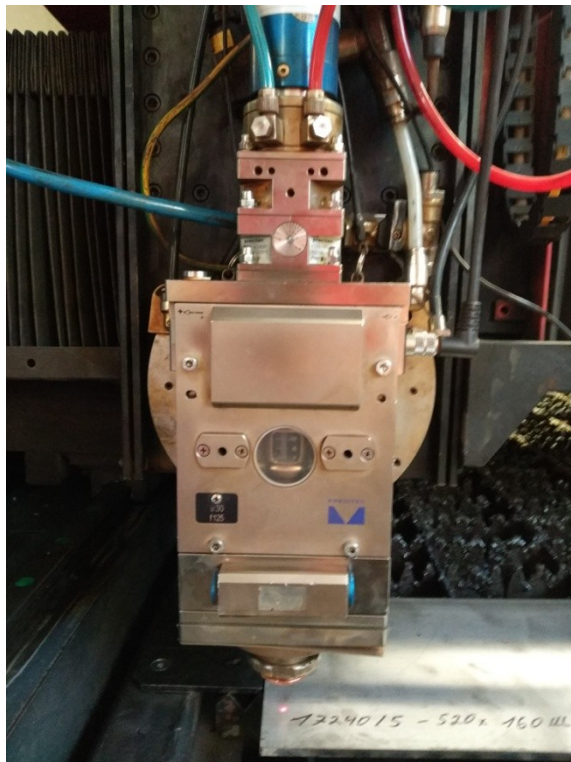
Pro měření bylo nutné vyhotovit vzorky. V první řadě byl vymodelován tvar vzorku v programu AutoCAD a poté nářezový plán pomocí nestovacího programu Wrykrys. Vzorky byly vyrobeny ze tří materiálů: konstrukční ocel 11 375, nerezová ocel 17 240 a slitina hliníku AW 1050 H24. Rozměry vzorků byly 50x50x5 mm. Vzorky byly vyrobeny ve třech sériích a v každé sérii byl měněn jeden parametr.



Obr. 20: Vzorek



Obr. 19: Rozměry vzorku



Obr. 21: Řezací hlava

5.4.1 Vzorky z konstrukční oceli 11 375

Technologické parametry laseru pro obrábění oceli 11 375:

Výkon v řezu:	2000	W
Výkon v propalu:	2000	W
Řezná rychlost:	2000	mm/min
Typ plynu:	O ₂	-
Tlak plynu v řezu:	1,1	bar
Tlak plynu v propalu:	1	bar
Počet propalů:	120	-
Vzdálenost ohniska:	1,6	mm
Průměr trysky:	0,8	mm

Tab. 1: Série A – změna výkonu laseru (11 375)

Označení vzorku	Výkon [W]
K-A1	2000
K-A2	1800
K-A3	1600
K-A4	1400
K-A5	1200

Tab. 2: Série B – změna řezné rychlosti (11 375)

Označení vzorku	Řezná rychlost [mm/min]
K-B1	650
K-B2	1100
K-B3	1550
K-B4	2000
K-B5	2450

Tab. 3: Série C – změna tlaku plynu (11 375)

Označení vzorku	Tlak plynu [bar]
K-C1	0,8
K-C2	1
K-C3	1,2
K-C4	1,4
K-C5	1,6

5.4.2 Vzorky z nerezové oceli 17 240

Technologické parametry laseru pro obrábění oceli 17 240:

Výkon v řezu:	2000	W
Výkon v propalu:	2000	W
Řezná rychlost:	2000	mm/min
Typ plynu:	N ₂	-
Tlak plynu v řezu:	15	bar
Tlak plynu v propalu:	15	bar
Počet propalů:	120	-
Vzdálenost ohniska:	-4,5	mm
Průměr trysky:	1,5	mm

Tab. 4: Série A – změna výkonu laseru (17 240)

Označení vzorku	Výkon [W]
N-A1	2000
N-A2	1900
N-A3	1800
N-A4	1700
N-A5	1600

Tab. 5: Série B – změna řezné rychlosti (17 240)

Označení vzorku	Řezná rychlost [mm/min]
N-B1	2000
N-B2	1550
N-B3	1100
N-B4	650
N-B5	200

5.4.3 Vzorky ze slitiny hliníku AW 1050 H24

Technologické parametry laseru pro obrábění slitiny hliníku AW 1050 H24:

Výkon v řezu:	2000	W
Výkon v propalu:	2000	W
Řezná rychlost:	200	mm/min
Typ plynu:	N ₂	-
Tlak plynu v řezu:	15	bar
Tlak plynu v propalu:	15	bar
Počet propalů:	120	-
Vzdálenost ohniska:	-4,5	mm
Průměr trysky:	1,5	mm

Tab. 6: Série A – změna výkonu laseru (AW 1050 H24)

Označení vzorku	Výkon [W]
H-A1	2000
H-A2	1800
H-A3	1600
H-A4	1400
H-A5	1200

Tab. 7: Série B – změna řezné rychlosti (AW 1050 H24)

Označení vzorku	Řezná rychlost [mm/min]
H-B1	500
H-B2	400
H-B3	300
H-B4	200
H-B5	100

Tab. 8: Série C – změna tlaku plynu (AW 1050 H24)

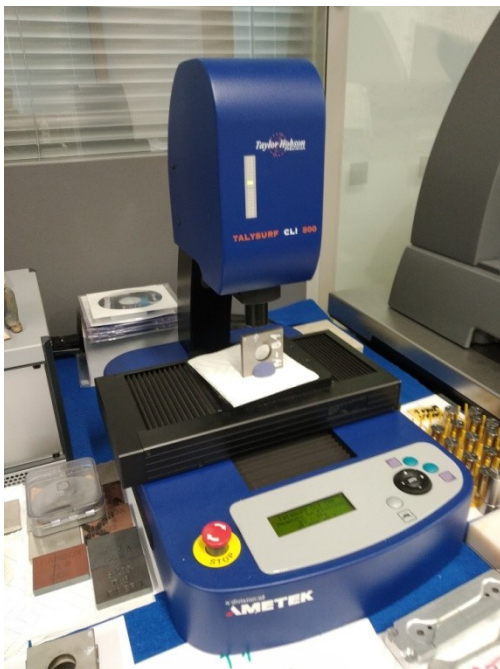
Označení vzorku	Tlak plynu [bar]
H-C1	20
H-C2	17
H-C3	14
H-C4	11
H-C5	8

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

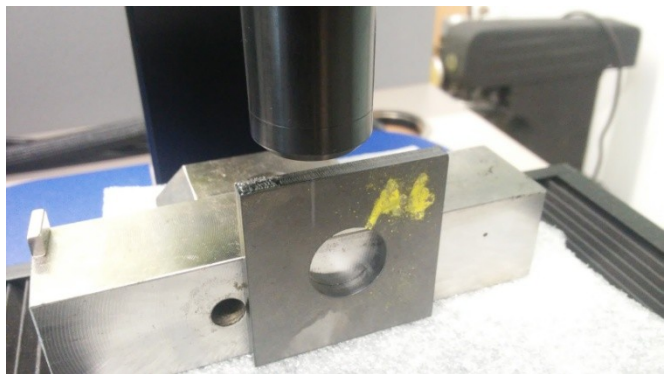
6.1 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu byla měřena za pomoci přístroje Taylor Hobson Talysurf CLI 500. Jde o univerzální přístroj pro měření textury povrchu, který umožňuje měření buď indukčním dotykovým způsobem, nebo bezdotykovým způsobem laserovou sondou. Vyniká mimořádnou rychlostí a přesností měření v režimu 2D a 3D.

Zařízení je navrženo pro měření méně rozměrných součástí a je účinným měřicím prostředkem k provádění rychlého prostorového měření a hodnocení povrchu s vysokým rozlišením.



Obr. 23. Talysurf CLI 500



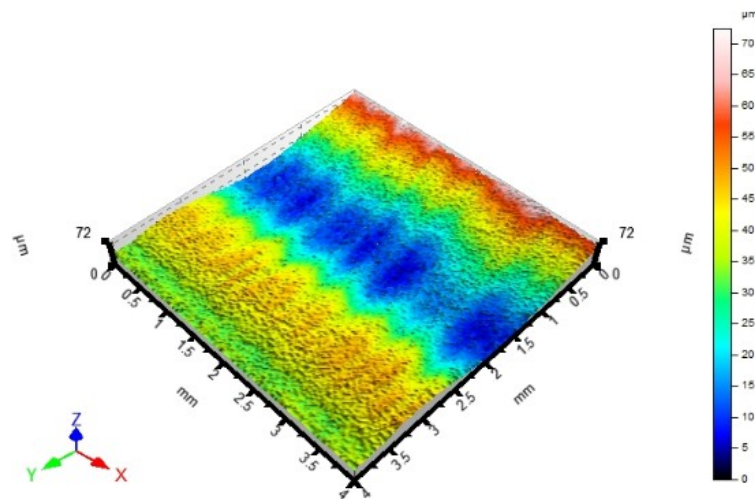
Obr. 22. Měření drsnosti

6.1.1 Drsnost povrchu – konstrukční ocel 11 375

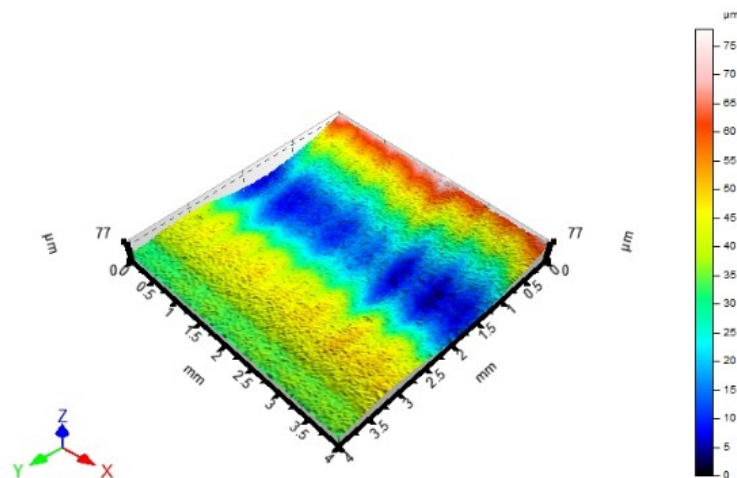
Série A – změna výkonu laseru, konstantní řezná rychlost a tlak plynu

Tab. 9: Výsledky měření změny výkonu laseru (11 375)

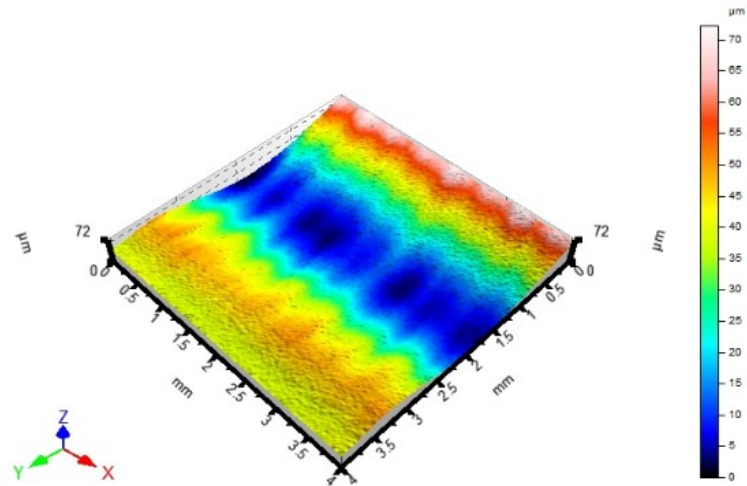
Vzorek	Výkon [W]	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka
K-A1	2000	Ra	μm	1,329	0,271
		Rz	μm	6,314	1,071
K-A2	1800	Ra	μm	1,269	0,374
		Rz	μm	5,690	1,507
K-A3	1600	Ra	μm	1,060	0,324
		Rz	μm	4,600	1,246
K-A4	1400	Ra	μm	1,143	0,366
		Rz	μm	5,147	1,329
K-A5	1200	Ra	μm	0,993	0,414
		Rz	μm	4,981	2,024



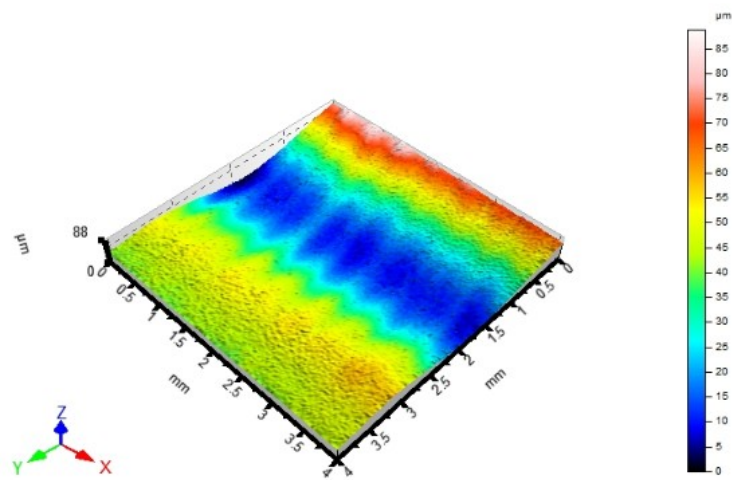
Obr. 24: Povrch K-A1



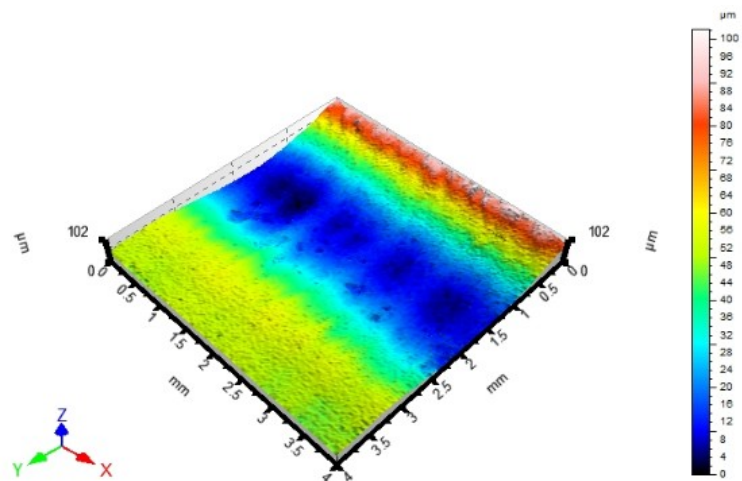
Obr. 25: Povrch K-A2



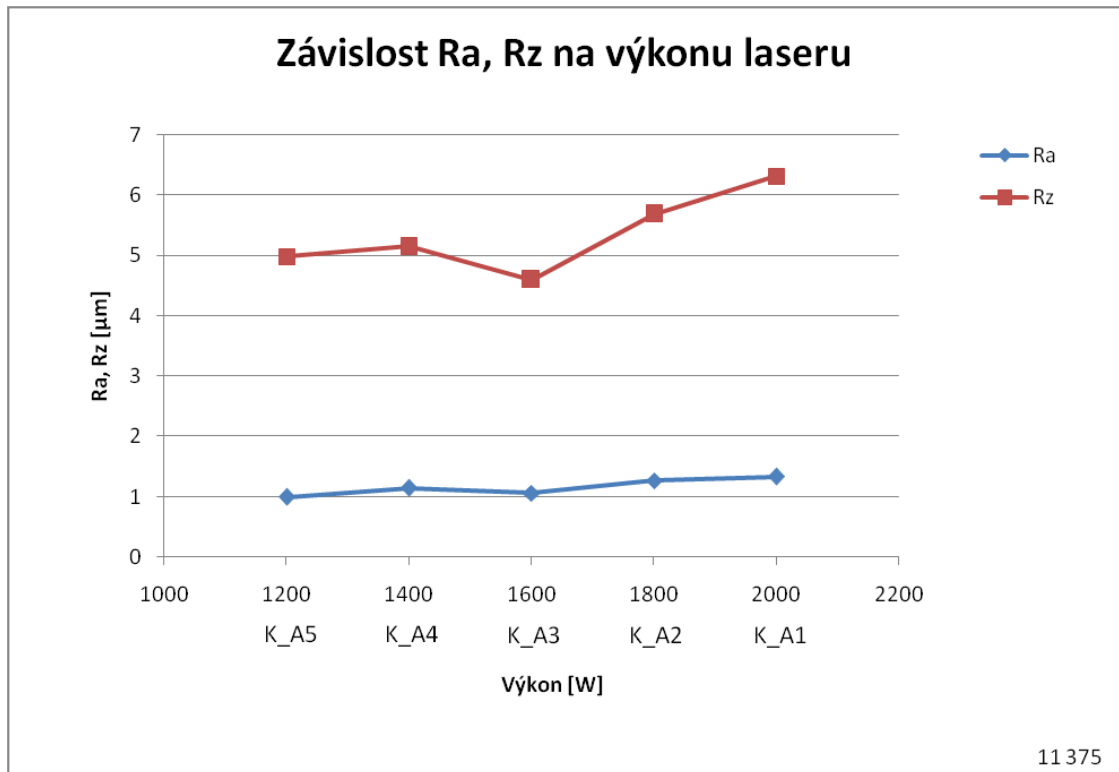
Obr. 26: Povrch K-A3



Obr. 27: Povrch K-A4



Obr. 28: Povrch K-A5



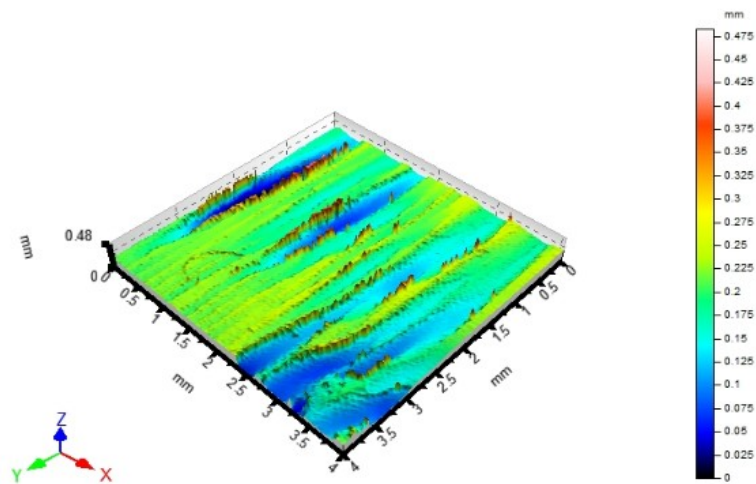
Obr. 29: Závislost Ra, Rz na výkonu laseru (11 375)

Z výsledků měření vyplývá, že výkon laseru výrazně neovlivňuje drsnost povrchu při obrábění konstrukční oceli. Při nastavení výkonu pod hranici 1200 W již docházelo k zapékání vzorků a nebylo možné je vyjmout z tabule plechu. Při nízkých výkonech nebude mít paprskem dostatečnou energii na proniknutí materiálem.

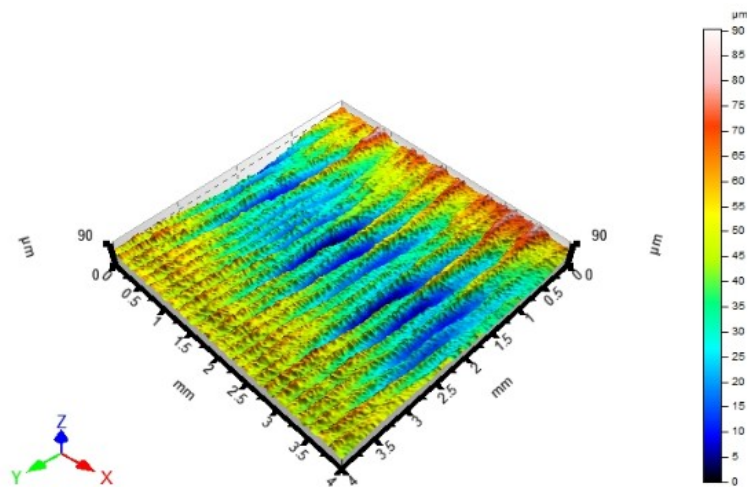
Série B – změna řezné rychlosti, konstantní výkon a tlak plynu

Tab. 10: Výsledky měření změny řezné rychlosti (11 375)

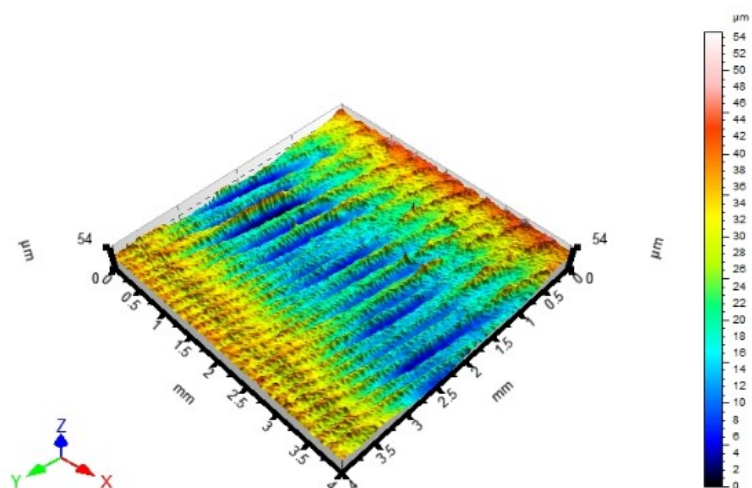
Vzorek	Řezná rychlost [mm/min]	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka
K-B1	650	Ra	μm	23,149	7,513
		Rz	μm	123,149	48,489
K-B2	1100	Ra	μm	6,186	1,206
		Rz	μm	27,176	4,854
K-B3	1550	Ra	μm	3,036	1,112
		Rz	μm	13,512	4,699
K-B4	2000	Ra	μm	2,119	1,166
		Rz	μm	9,272	4,825
K-B5	2450	Ra	μm	0,908	0,162
		Rz	μm	4,673	1,414



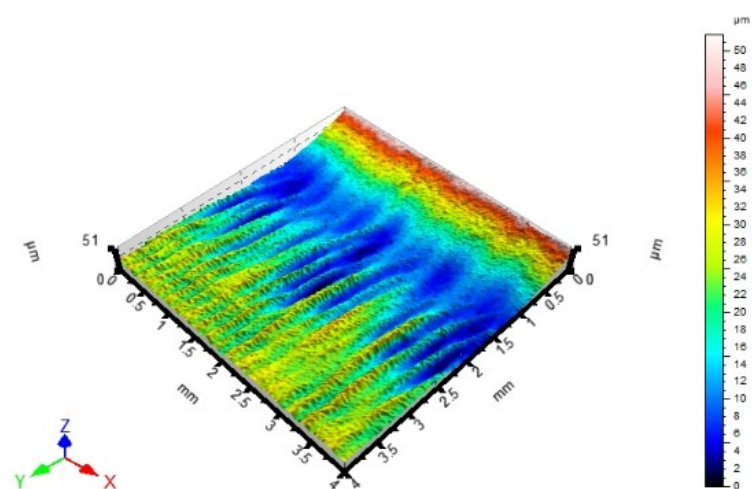
Obr. 30: Povrch K-B1



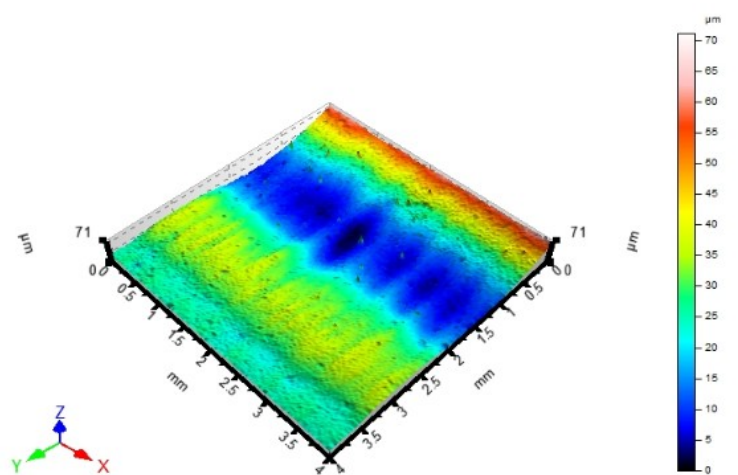
Obr. 31: Povrch K-B2



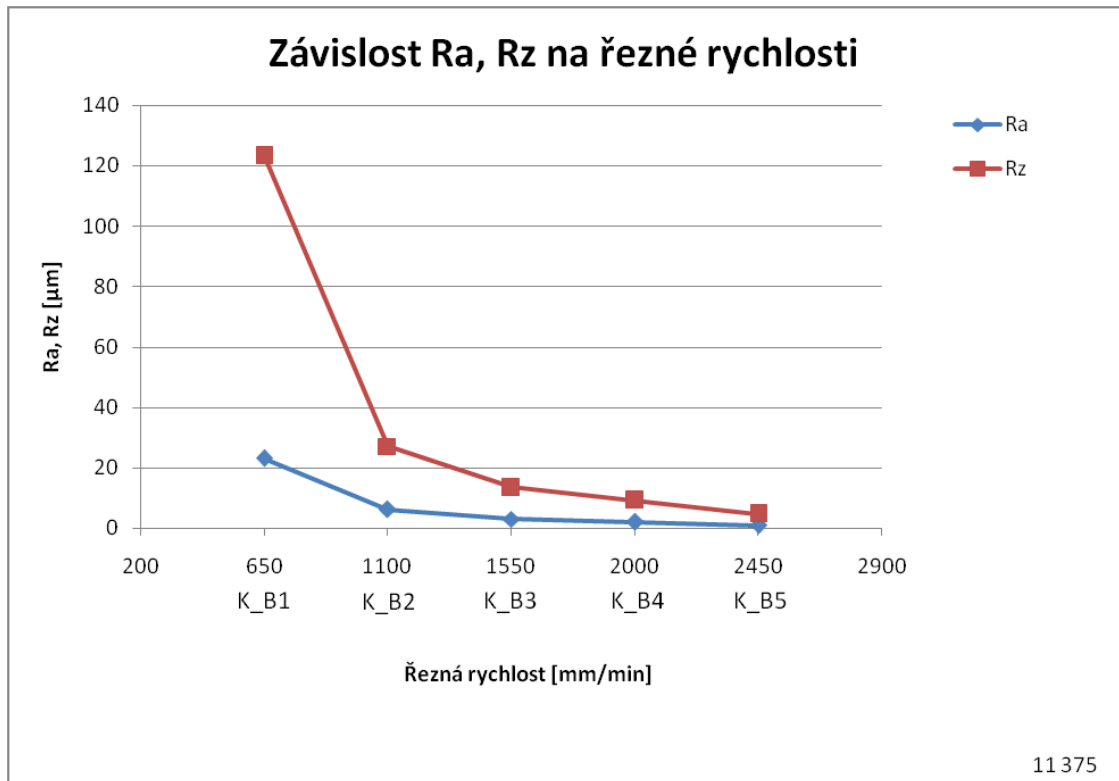
Obr. 32: Povrch K-B3



Obr. 33: Povrch K-B4



Obr. 34: Povrch K-B5



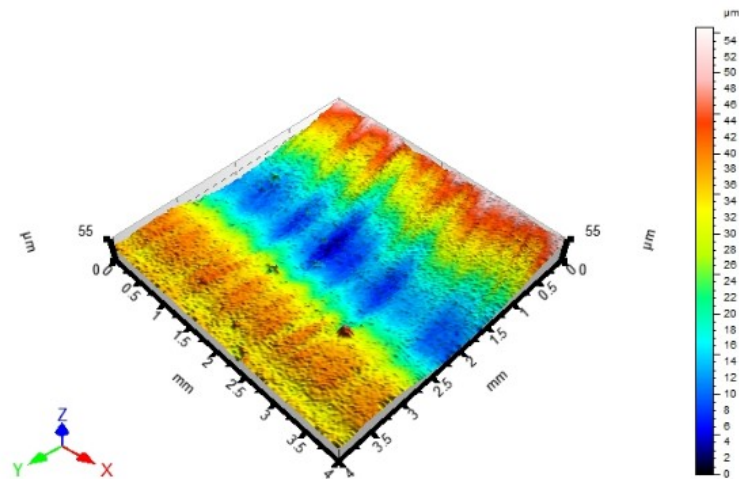
Obr. 35: Závislost Ra, Rz na řezné rychlosti (11 375)

V této sérii vzorků byl zkoumán vliv řezné rychlosti na kvalitu povrchu u konstrukční oceli. Obecně platí, že s rostoucí řeznou rychlostí se zlepšuje drsnost řezné plochy. Z grafu naměřených hodnot vyplývá, že se toto tvrzení potvrdilo u obou měřených parametrů. Avšak při určité velikosti řezné rychlosti toto tvrzení přestane platit, protože rychlost bude příliš velká na to, aby paprsek pronikl celou tloušťkou materiálu.

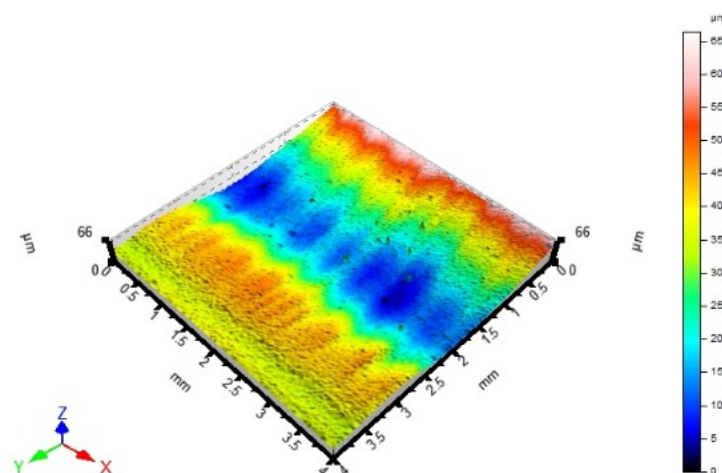
Série C – změna tlaku plynu, konstantní výkon a řezná rychlost

Tab. 11: Výsledky měření změny tlaku plynu (11 375)

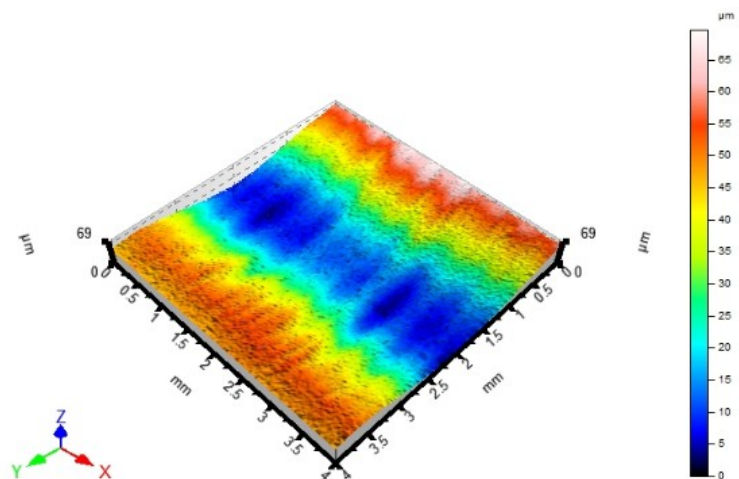
Vzorek	Tlak plynu [bar]	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka
K-C1	0,8	Ra	μm	1,258	0,386
		Rz	μm	6,039	1,582
K-C2	1,0	Ra	μm	1,114	0,328
		Rz	μm	4,996	1,388
K-C3	1,2	Ra	μm	1,137	0,227
		Rz	μm	5,181	0,868
K-C4	1,4	Ra	μm	1,367	0,371
		Rz	μm	6,240	1,572
K-C5	1,6	Ra	μm	-	-
		Rz	μm	-	-



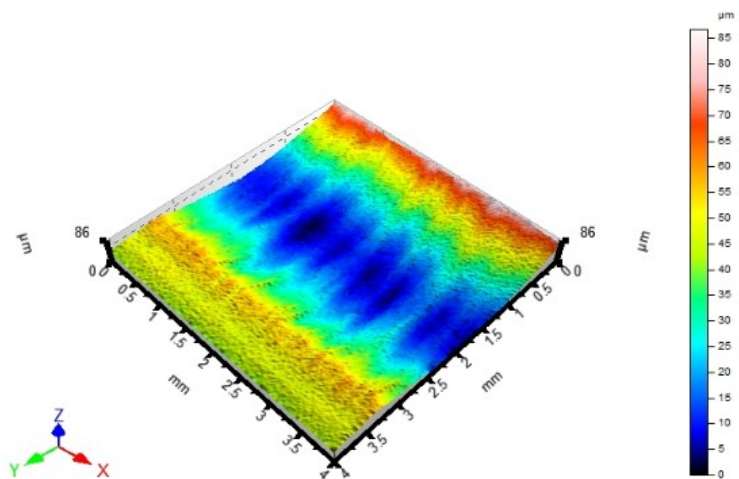
Obr. 36: Povrch K-C1



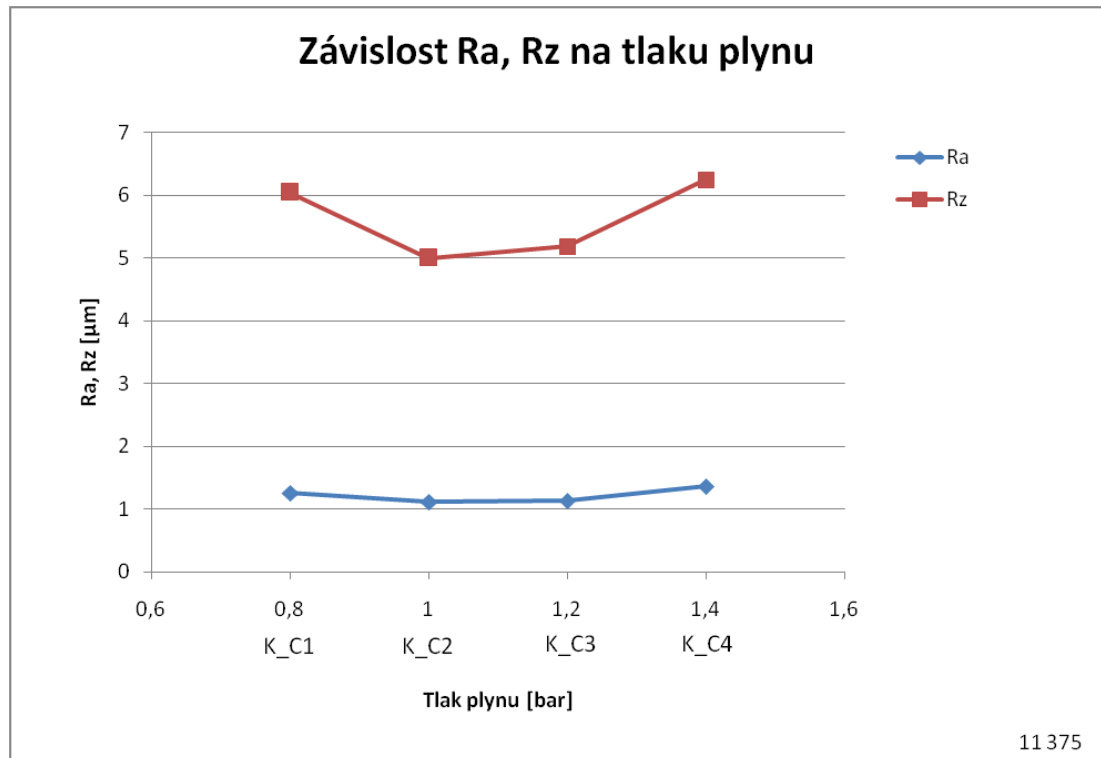
Obr. 37: Povrch K-C2



Obr. 38: Povrch K-C3



Obr. 39: Povrch K-C4



Obr. 40: Závislost Ra, Rz na tlaku plynu (11 375)

Vzorek K-C5 nebyl vhodný pro měření, z důvodu velmi nekvalitní plochy.

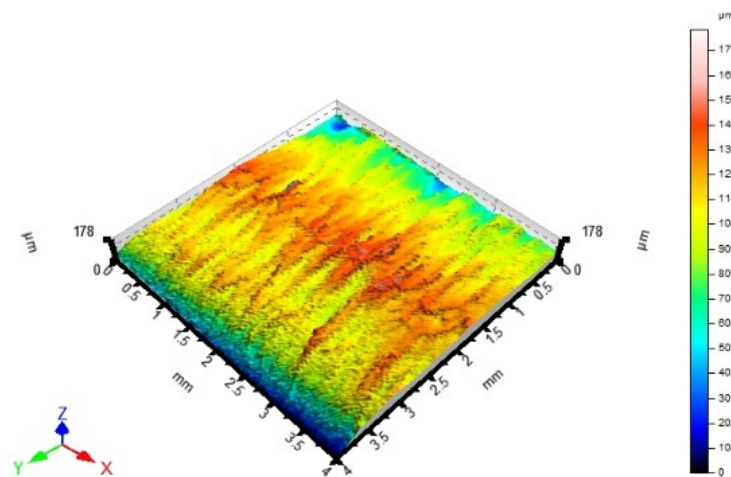
Vliv tlaku plynu oproti vlivu řezné rychlosti není tak podstatný. Na grafu je možné pozorovat mírné zhoršení kvality povrchu při nejnižším a také při nejvyšším nastaveném tlaku. Tlak plynu musí být vhodně zvolen, protože ovlivňuje proces hoření a vyfukování oxidů a taveniny z prostoru řezné spáry. Příliš nízký tlak může způsobovat špatné spalování materiálu a může docházet k zapékání výpalků.

6.1.2 Drsnost povrchu – nerezová ocel 17 240

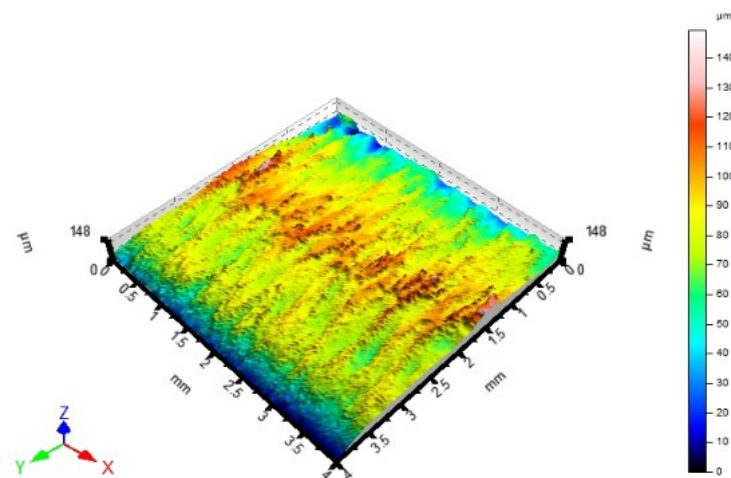
Série A – změna výkonu laseru, konstantní řezná rychlost a tlak plynu

Tab. 12: Výsledky měření změny výkonu laseru (17 240)

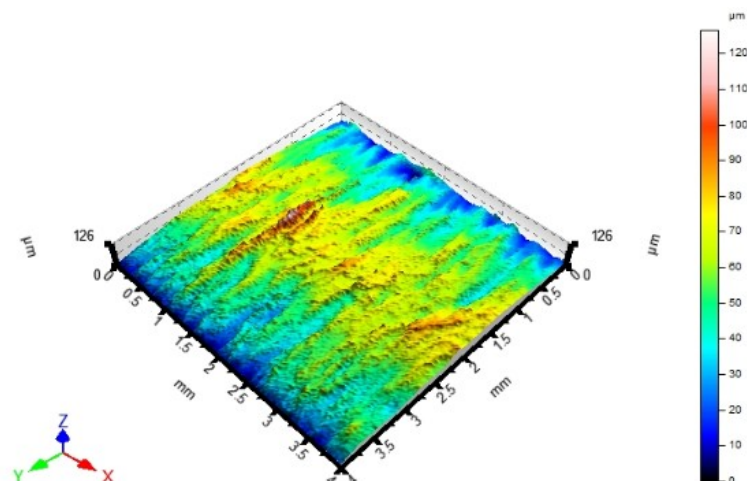
Vzorek	Výkon [W]	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka
N-A1	2000	Ra	μm	4,382	0,916
		Rz	μm	21,296	4,706
N-A2	1900	Ra	μm	4,498	0,783
		Rz	μm	21,196	4,142
N-A3	1800	Ra	μm	4,346	0,480
		Rz	μm	20,720	2,724
N-A4	1700	Ra	μm	4,130	0,685
		Rz	μm	20,190	3,629
N-A5	1600	Ra	μm	8,273	4,215
		Rz	μm	38,329	18,106



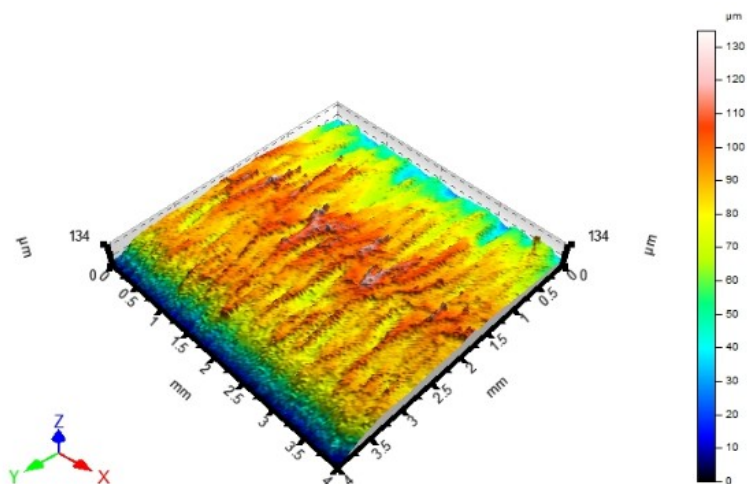
Obr. 41: Povrch N-A1



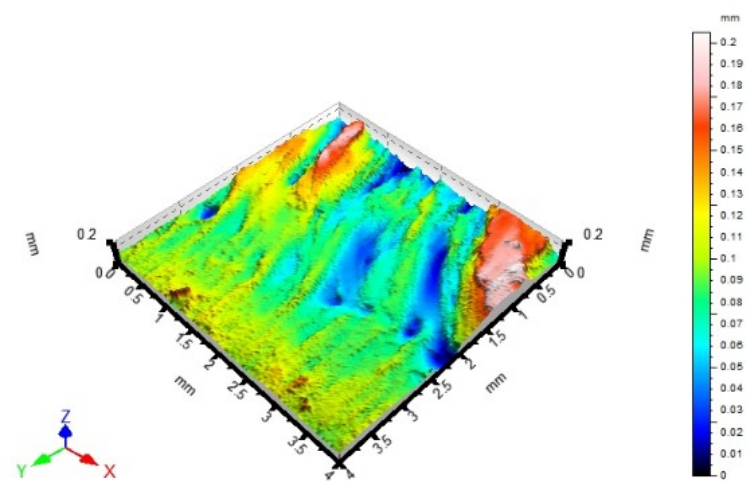
Obr. 42: Povrch N-A2



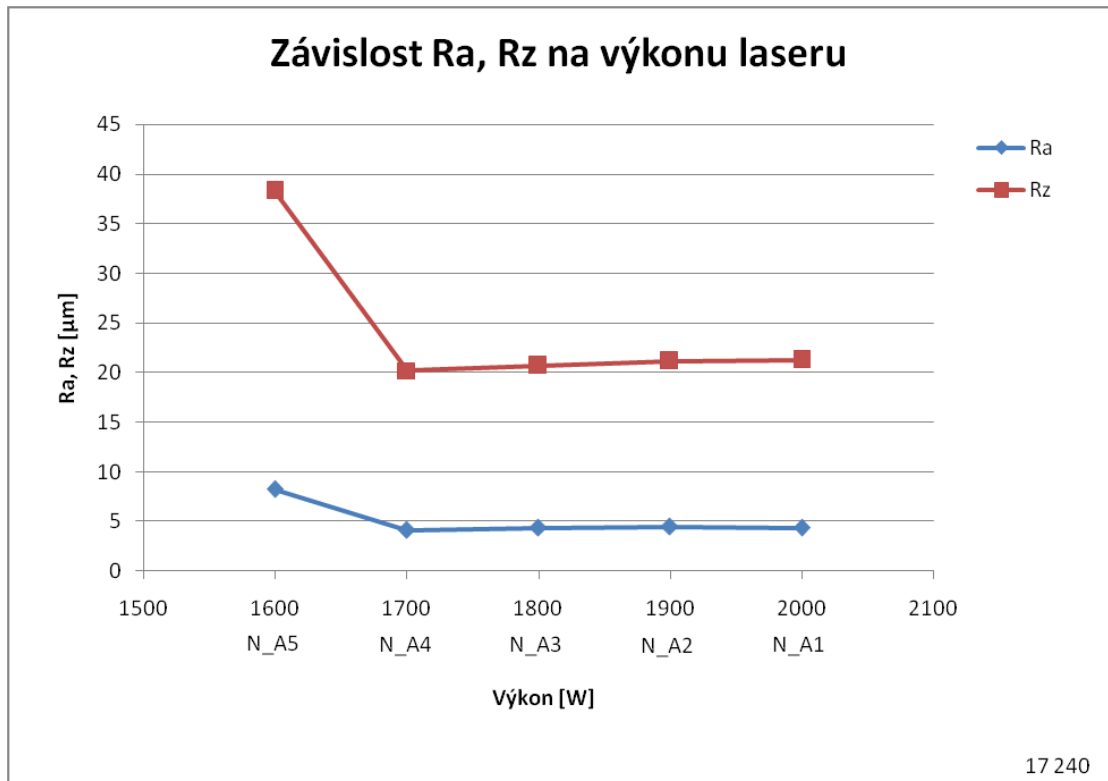
Obr. 43: Povrch N-A3



Obr. 44: Povrch N-A4



Obr. 45: Povrch N-A5



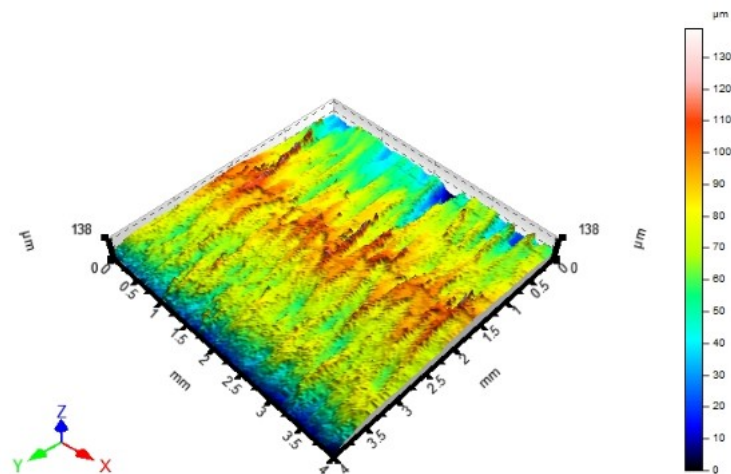
Obr. 46: Závislost Ra, Rz na výkonu laseru (17 240)

Kvalita povrchu při obrábění nerezové oceli s klesajícím výkonem je přibližně stejná až do hodnoty 1700 W. Při dalším snižování výkonu je patrné zhoršení kvality povrchu. S dalším snížením výkonu již paprsek neměl dostatečnou energii k proniknutí celé tloušťky materiálu.

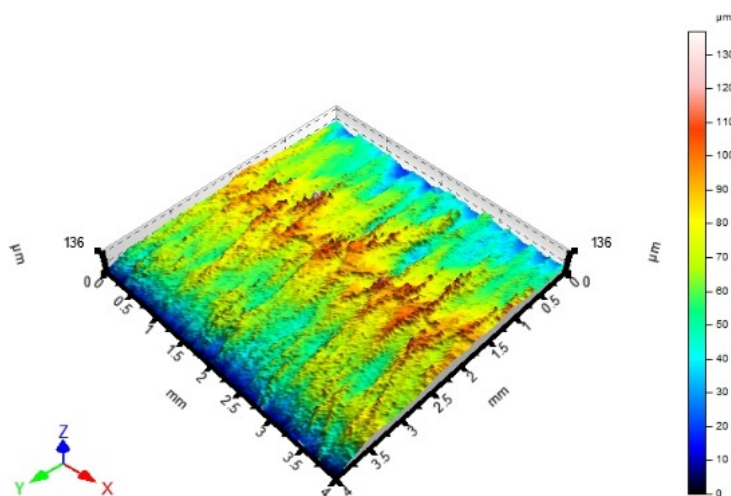
Série B – změna řezné rychlosti, konstantní výkon a tlak plynu

Tab. 13: Výsledky měření změny řezné rychlosti (17 240)

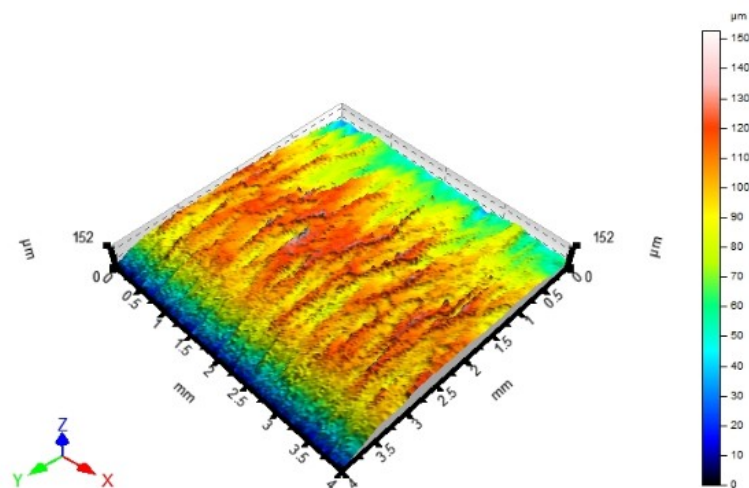
Vzorek	Řezná rychlost [mm/min]	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka
N-B1	2000	Ra	μm	4,805	0,792
		Rz	μm	24,318	5,106
N-B2	1550	Ra	μm	4,596	0,863
		Rz	μm	23,326	5,772
N-B3	1100	Ra	μm	4,680	1,073
		Rz	μm	22,488	4,794
N-B4	650	Ra	μm	5,098	0,775
		Rz	μm	25,661	5,527
N-B5	200	Ra	μm	6,987	2,786
		Rz	μm	37,074	14,137



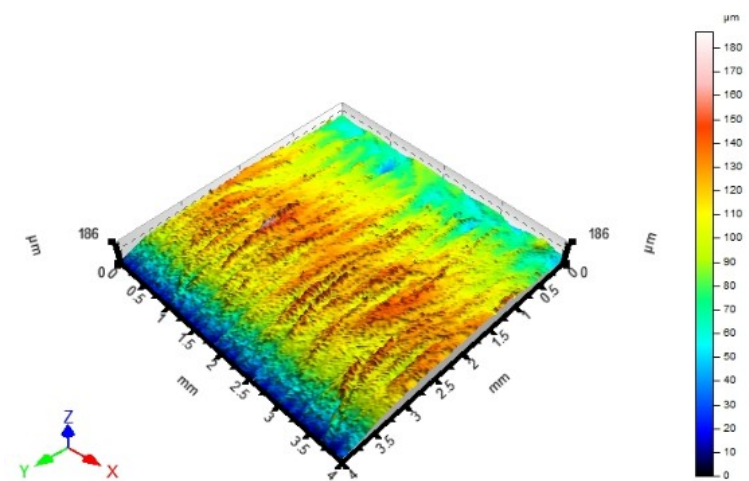
Obr. 47: Povrch N-B1



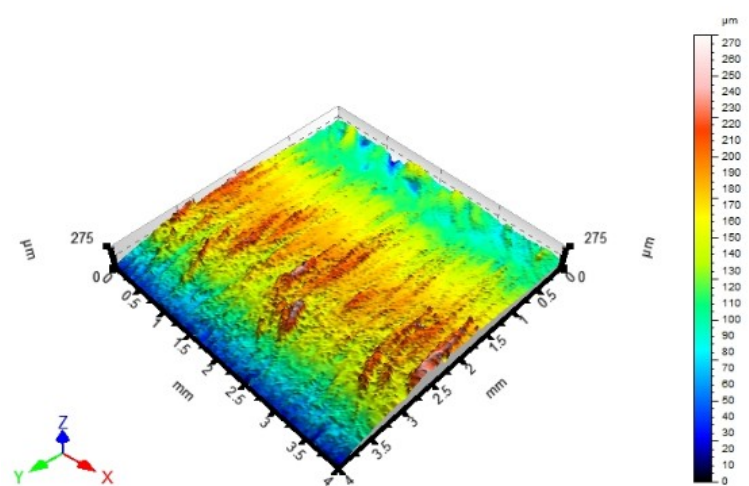
Obr. 48: Povrch N-B2



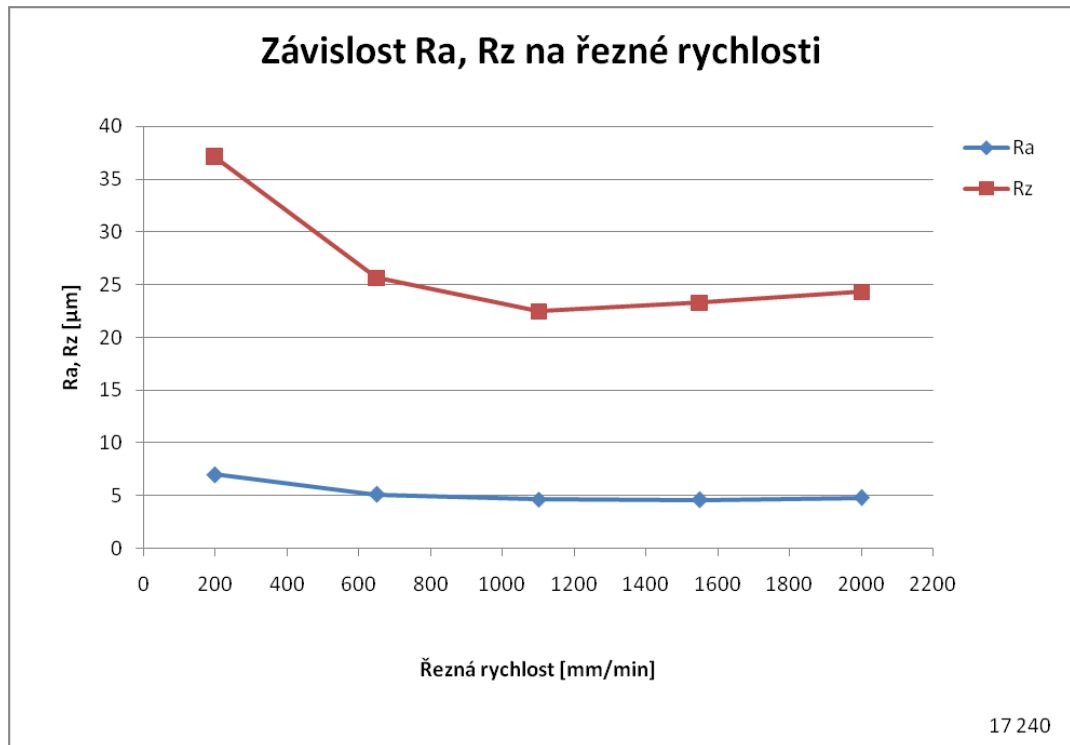
Obr. 49: Povrch N-B3



Obr. 50: Povrch N-B4



Obr. 51: Povrch N-B5



Obr. 52: Závislost Ra, Rz na řezné rychlosti (17 240)

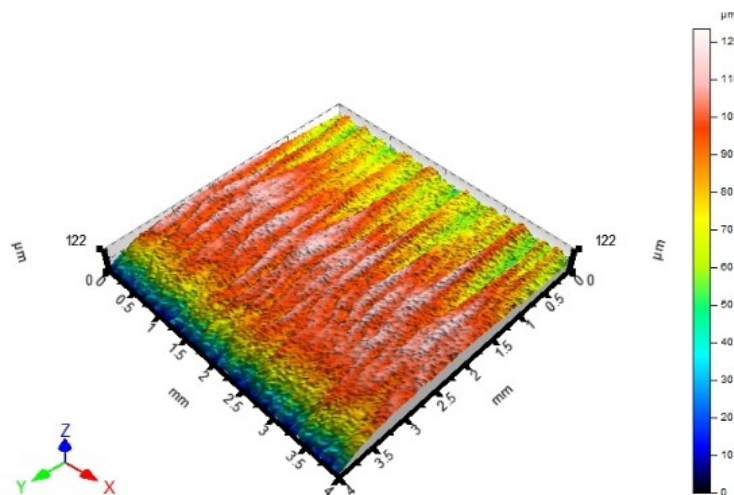
V sérii N-B byl zkoumán vliv řezné rychlosti na kvalitu povrchu u nerezové oceli 17 240. Z výsledků měření je patrné, že řezná rychlost nemá velký vliv na parametr Ra. Po snížení rychlosti pod 650 mm/min dochází k zhoršení kvality povrchu u obou parametrů.

6.1.3 Drsnost povrchu – slitina hliníku AW 1050 H24

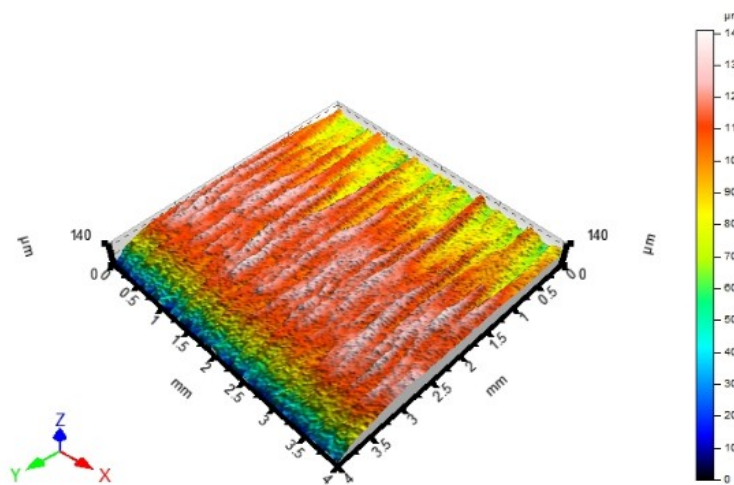
Série A – změna výkonu laseru, konstantní řezná rychlost a tlak plynu

Tab. 14: Výsledky měření změny výkonu laseru (AW 1050 H24)

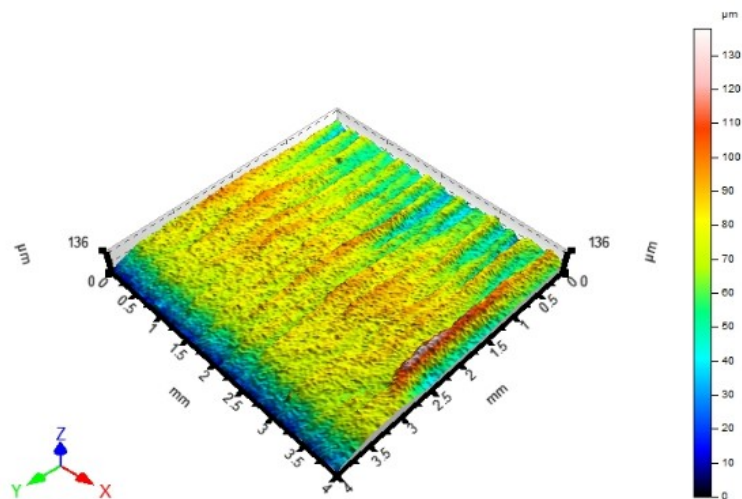
Vzorek	Výkon [W]	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka
H-A1	2000	Ra	μm	4,774	1,315
		Rz	μm	22,043	5,821
H-A2	1800	Ra	μm	5,165	1,463
		Rz	μm	23,809	6,060
H-A3	1600	Ra	μm	4,533	1,634
		Rz	μm	21,383	7,228
H-A4	1400	Ra	μm	4,892	1,998
		Rz	μm	23,440	9,505
H-A5	1200	Ra	μm	7,739	2,804
		Rz	μm	35,574	12,236



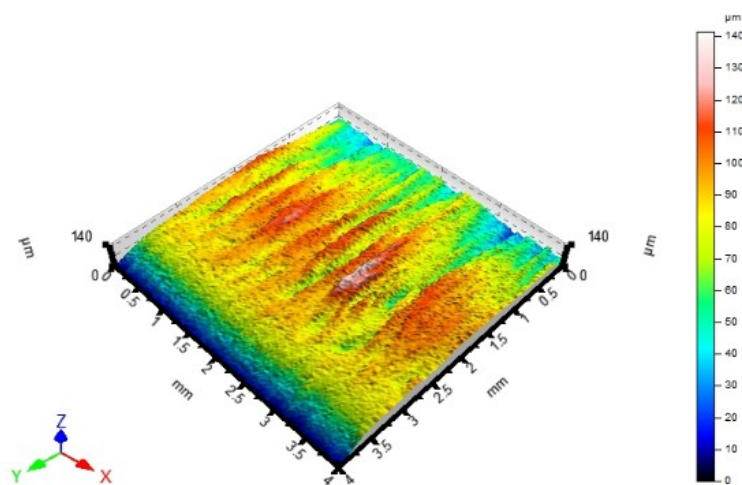
Obr. 53: Povrch H-A1



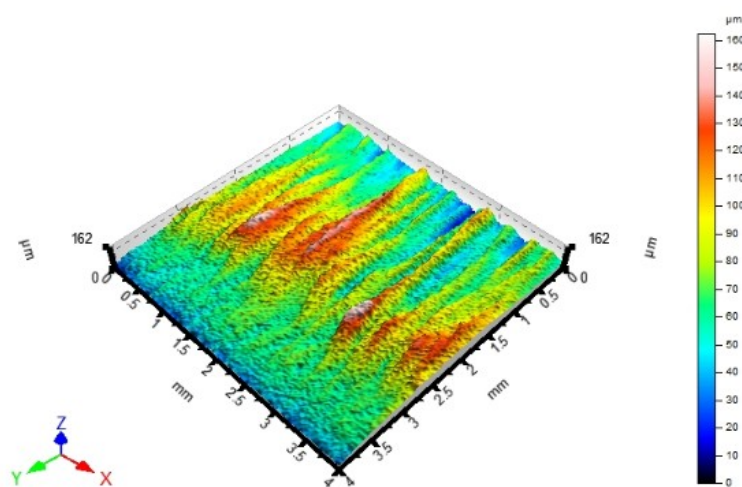
Obr. 54: Povrch H-A2



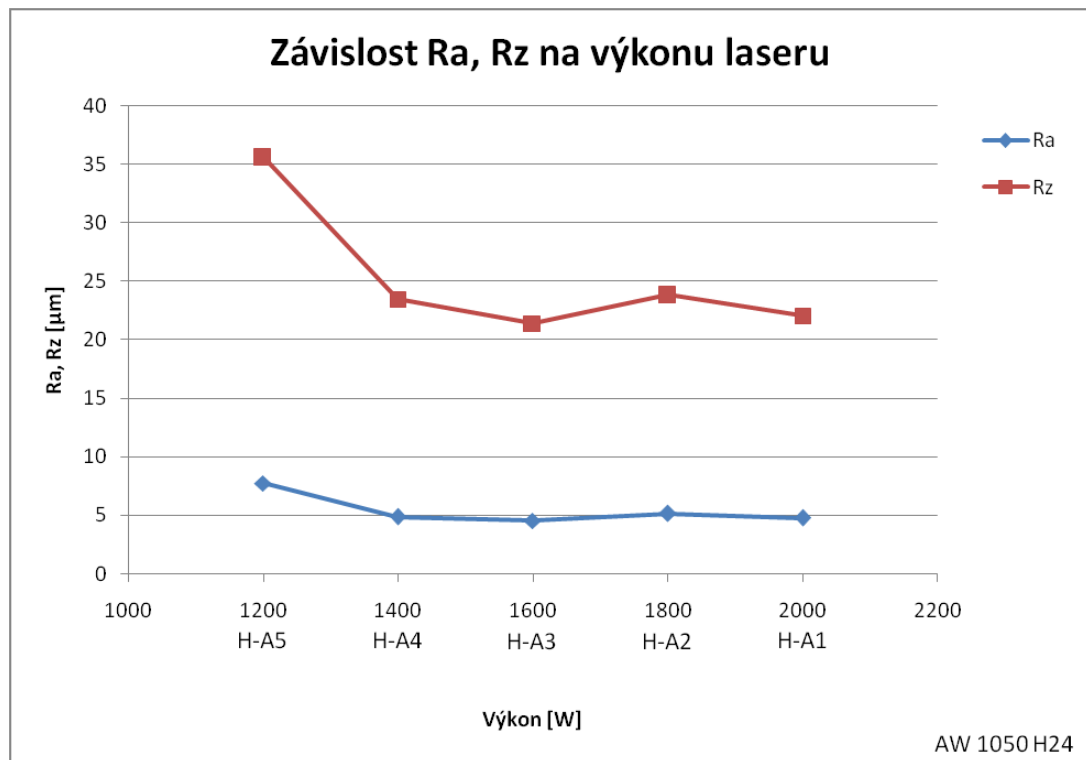
Obr. 55: Povrch H-A3



Obr. 56: Povrch H-A4



Obr. 57: Povrch H-A5



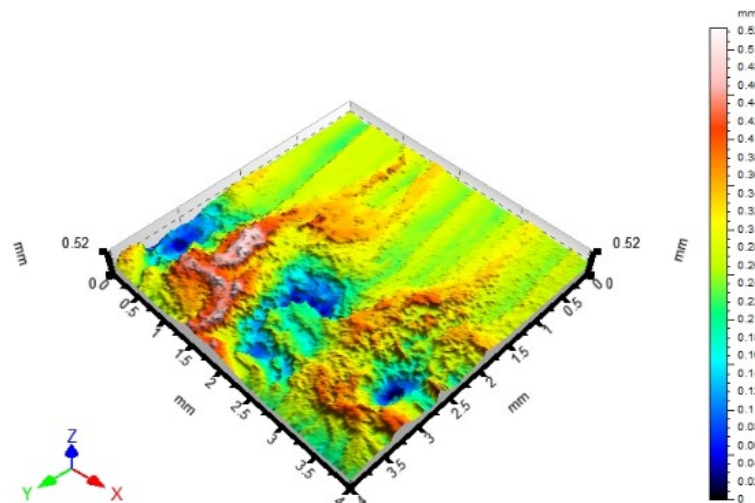
Obr. 58: Závislost Ra, Rz na výkonu laseru (AW 1050 H24)

U slitiny hliníku je možné pozorovat podobné zhoršování kvality povrchu jako u nerezové oceli při snižování výkonu laseru. Pod hodnotou 1400 W je patrná zhoršující se kvalita.

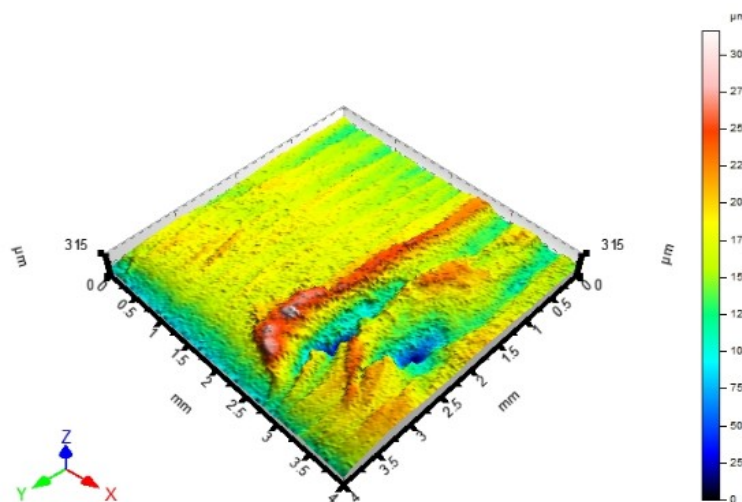
Série B – změna řezné rychlosti, konstantní výkon a tlak plynu

Tab. 15: Výsledky měření změny řezné rychlosti (AW 1050 H24)

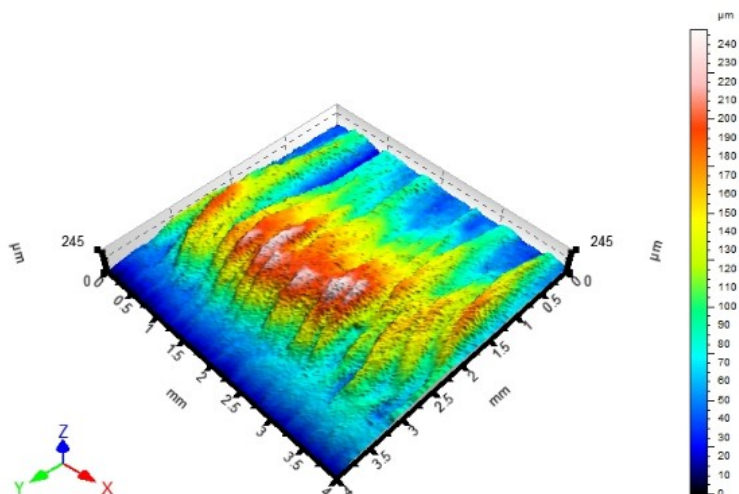
Vzorek	Řezná rychlost [mm/min]	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka
H-B1	500	Ra	μm	16,596	5,692
		Rz	μm	77,267	28,192
H-B2	400	Ra	μm	9,146	2,263
		Rz	μm	43,163	10,418
H-B3	300	Ra	μm	8,886	3,390
		Rz	μm	39,084	14,274
H-B4	200	Ra	μm	7,464	3,257
		Rz	μm	35,487	14,846
H-B5	100	Ra	μm	4,976	2,046
		Rz	μm	23,554	9,154



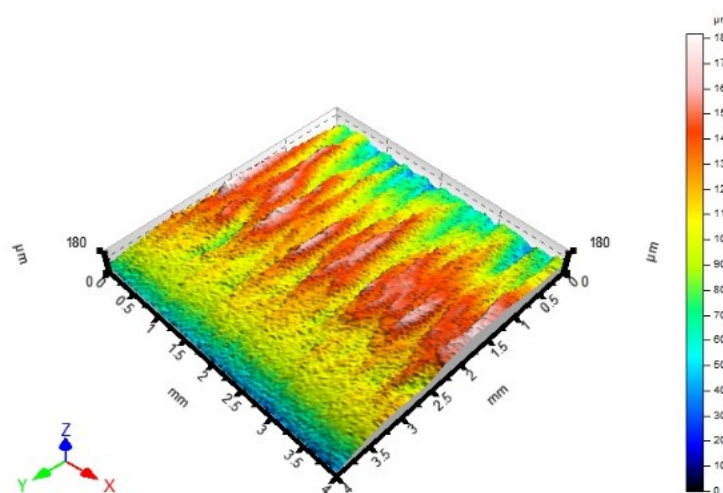
Obr. 59: Povrch H-B1



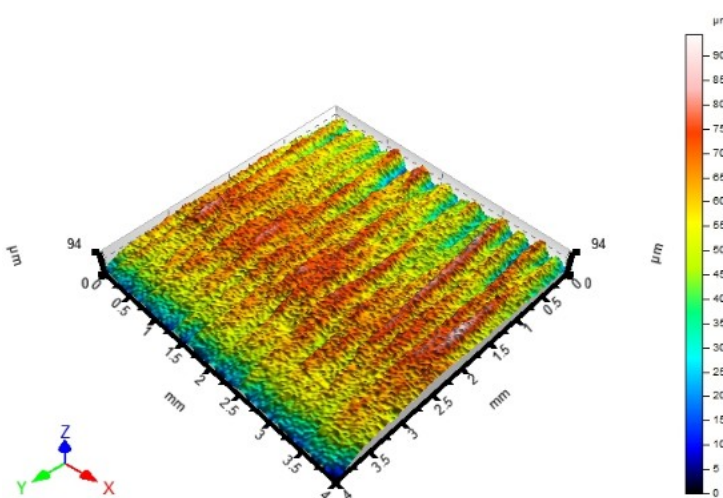
Obr. 60: Povrch H-B2



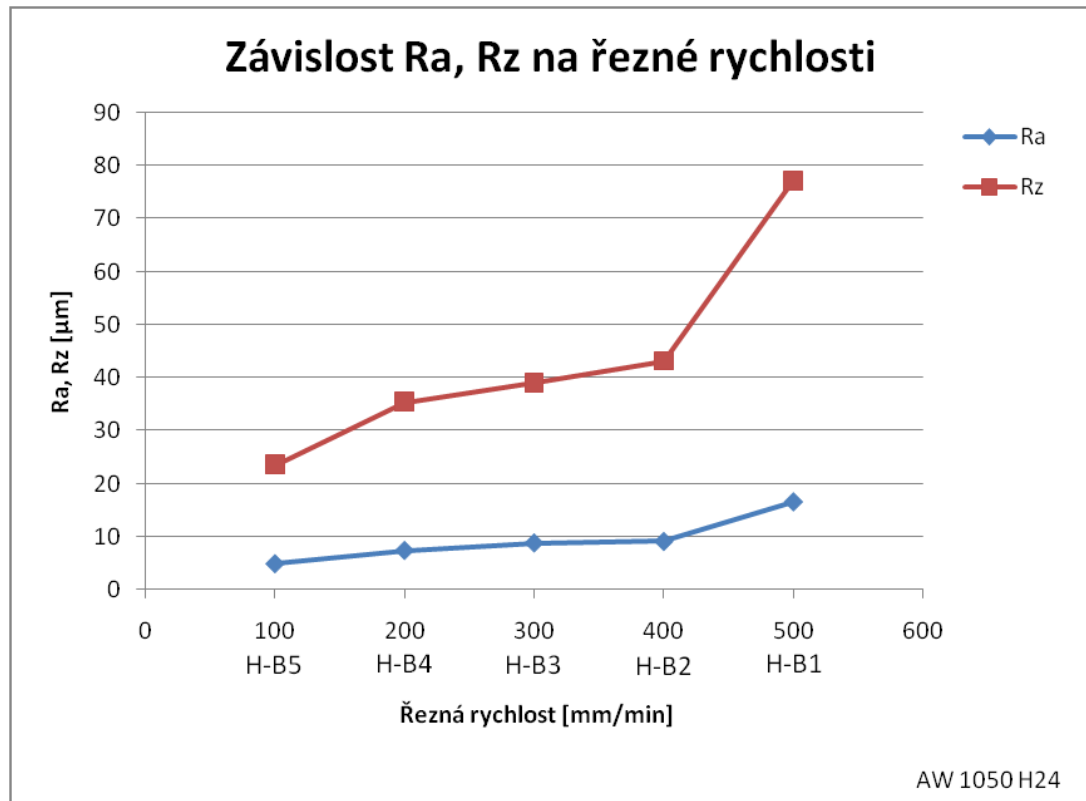
Obr. 61: Povrch H-B3



Obr. 62: Povrch H-B4



Obr. 63: Povrch H-B5



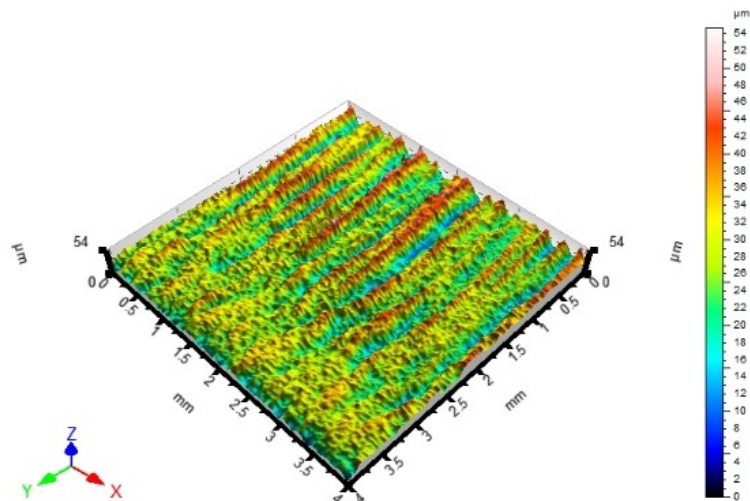
Obr. 64: Závislost Ra, Rz na řezné rychlosti (AW 1050 H24)

V sérii, kdy byl zkoumán vliv řezné rychlosti na kvalitu povrchu slitiny hliníku, je možné pozorovat úplně opačný trend než u konstrukční a nerezové oceli. S klesající rychlostí se zlepšuje kvalita povrchu.

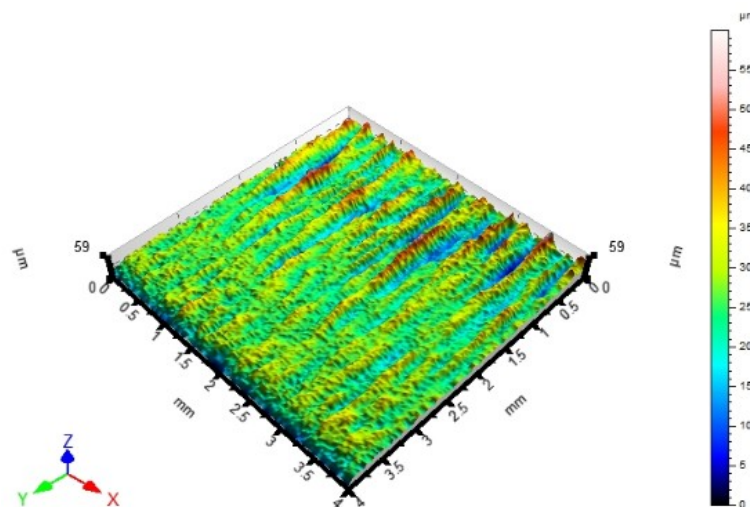
Série C – změna tlaku plynu, konstantní výkon a řezná rychlost

Tab. 16: Výsledky měření změny tlaku plynu (AW 1050 H24)

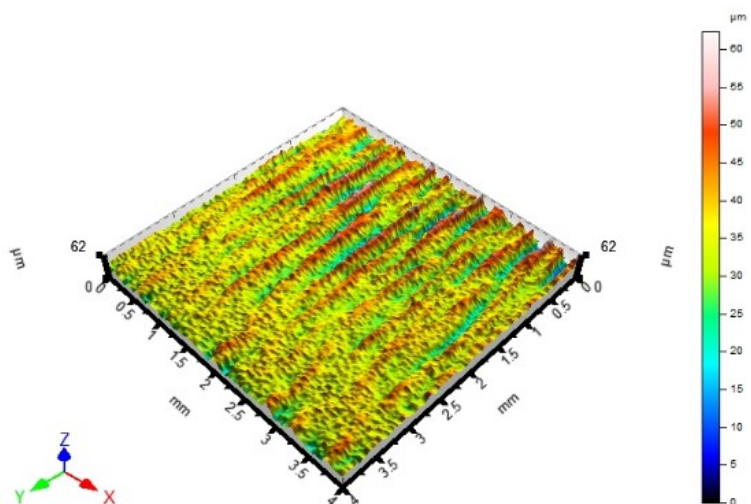
Vzorek	Tlak plynu [bar]	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka
H-C1	20	Ra	μm	5,042	1,635
		Rz	μm	22,907	6,745
H-C2	17	Ra	μm	4,018	1,815
		Rz	μm	19,355	8,237
H-C3	14	Ra	μm	4,574	1,725
		Rz	μm	21,194	7,840
H-C4	11	Ra	μm	3,995	1,670
		Rz	μm	18,719	7,497
H-C5	8	Ra	μm	14,784	3,647
		Rz	μm	65,274	15,082



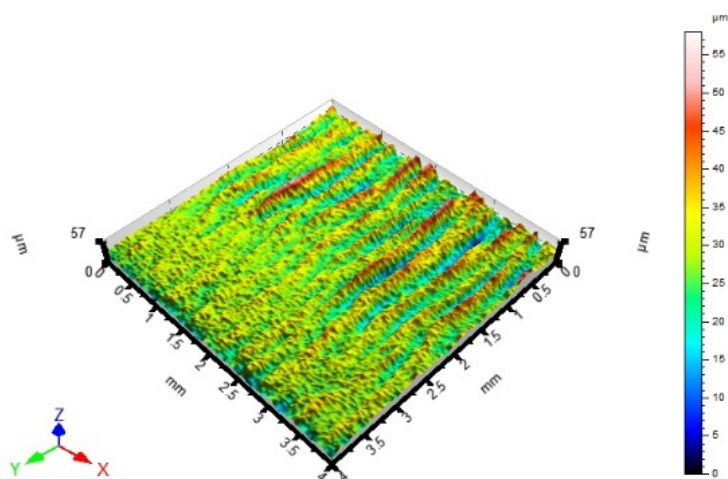
Obr. 65: Povrch H-C1



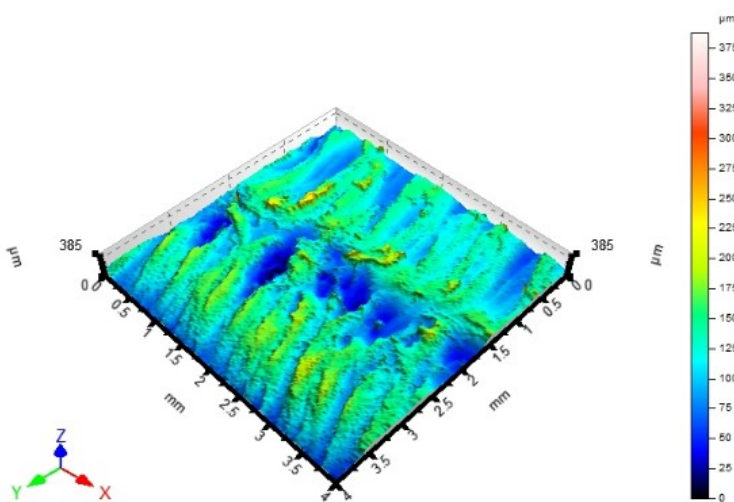
Obr. 66: Povrch H-C2



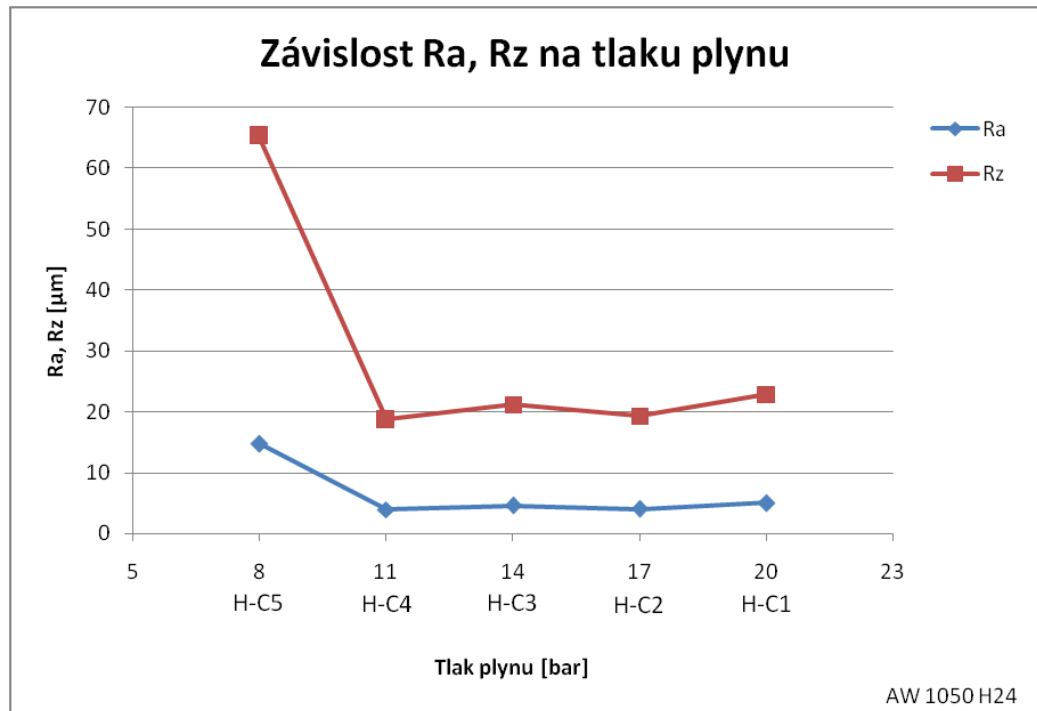
Obr. 67: Povrch H-C3



Obr. 68: Povrch H-C4



Obr. 69: Povrch H-C5

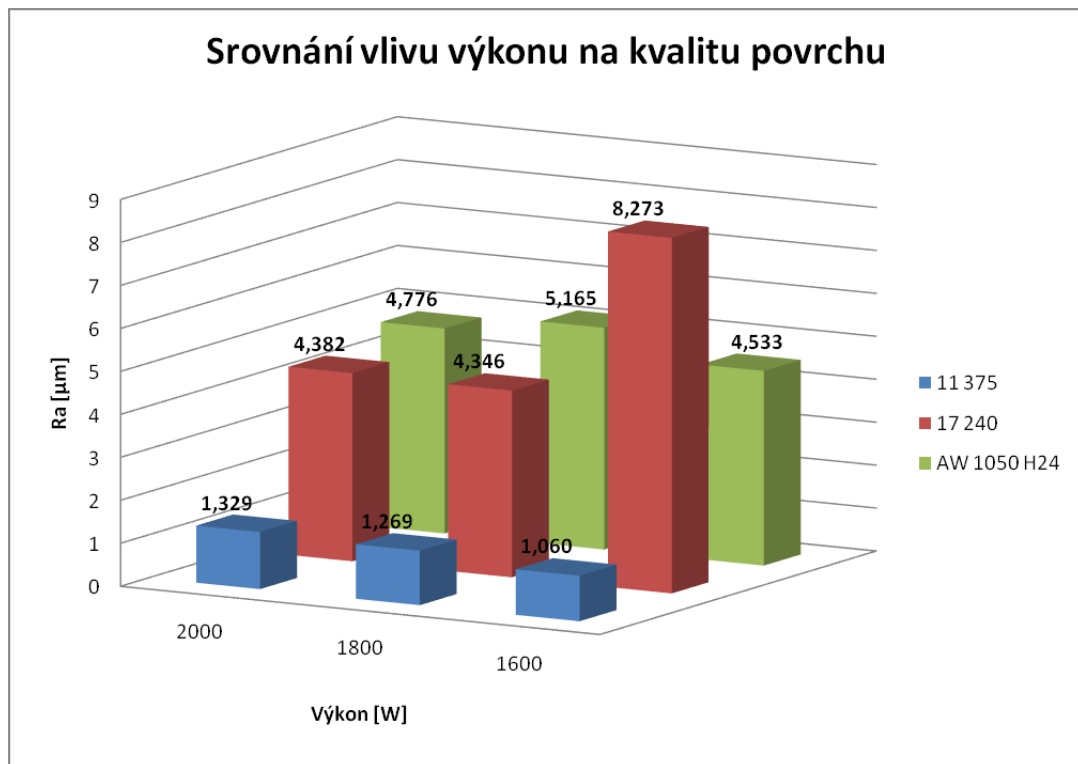


Obr. 70: Závislost Ra, Rz na tlaku plynu (AW 1050 H24)

Z měření vlivu tlaku plynu na kvalitu povrchu hliníkové slitiny je možné pozorovat výrazné zhoršení kvality až pod hodnotou tlaku 11 barů. Tlak plynu pod 11 barů již není dostatečný pro vyfukování roztaveného materiálu z řezné spáry.

6.1.4 Srovnání vlivu paprsku na různé materiály

a) Srovnání vlivu výkonu laseru na kvalitu povrchu

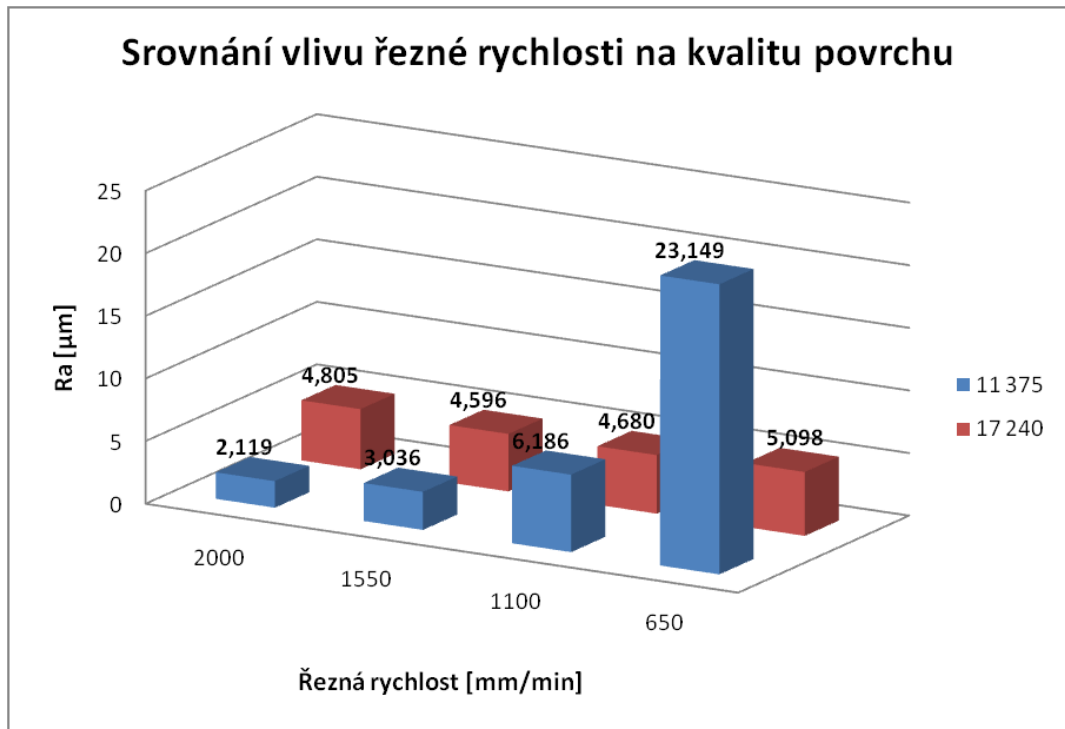


Obr. 71: Srovnání vlivu výkonu na kvalitu povrchu

Při zkoumání vlivu výkonu na kvalitu povrchu u všech použitých materiálů byl postupně snižován výkon laseru z maximální hodnoty až na minimální hodnotu, při které bylo možné ještě vzorky vyjmout z tabule plechu. Tato minimální hodnota výkonu je však pro každý materiál odlišná, a proto byl srovnáván vliv výkonu u vzorků se shodnou hodnotou výkonu.

Na první pohled je možné vidět, že při obrábění konstrukční oceli na vláknovém laseru se dosahuje výrazněji lepší kvality povrchu, než při obrábění nerezové oceli a slitiny hliníku. Tato skutečnost může být způsobena hlavně složením materiálů a různou odrazivostí materiálů. Kvalita povrchu u slitiny hliníku je nepatrně horší oproti nerezové oceli, avšak při hodnotě 1600 W se kvalita u nerezové oceli téměř dvojnásobně zhoršuje.

b) Srovnání vlivu řezné rychlosti na kvalitu povrchu



Obr. 72: Srovnání vlivu řezné rychlosti na kvalitu povrchu

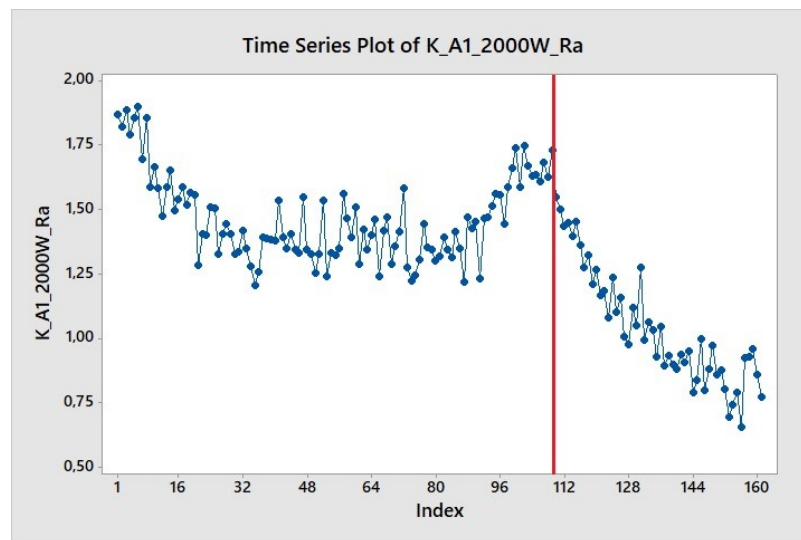
Při zkoumání vlivu řezné rychlosti na kvalitu povrchu u konstrukční a nerezové oceli byla postupně snižována rychlost z maximální hodnoty až na minimální hodnotu, při kterých bylo možné ještě vzorky vyjmout z tabule plechu. Byl zkoumán vliv řezné rychlosti u vzorků se shodnou hodnotou řezné rychlosti. Slitinu hliníku nebylo možné do srovnání zahrnout, protože řezná rychlost, kdy bylo možné vzorky vyjmout z tabule plechu, se pohybovala od 500 mm/min do 100 mm/min.

Zatím co výrazný vliv řezné rychlosti na kvalitu povrchu u nerezové oceli se neprojevil, u konstrukční oceli je možné pozorovat postupně se zhoršující kvalitu se snižováním řezné rychlosti.

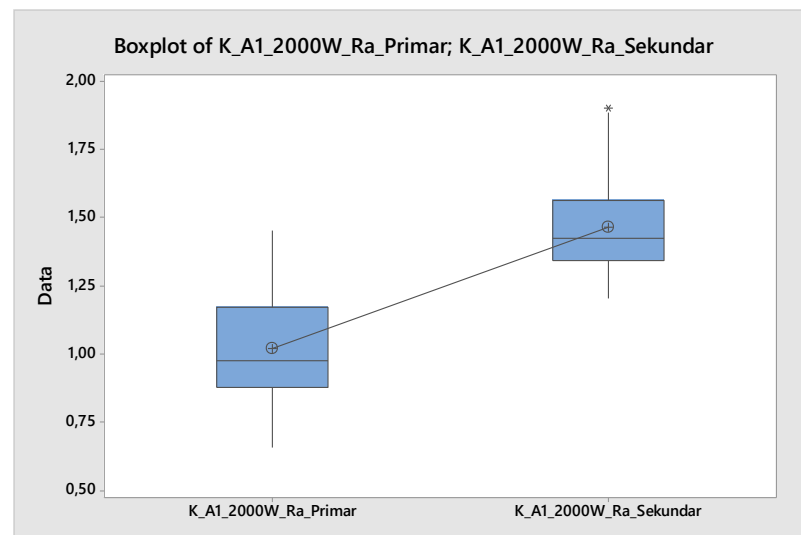
6.2 Stanovení hypotéz

Podle předpokladu byly na vzorcích zjištěny měřeními tři oblasti kvality povrchu, nicméně je obtížné rozlišit primární část povrchové oblasti od sekundární, proto byl vzorek rozdělen na dvě oblasti. Testování hypotéz bylo provedeno v softwaru Minitab 17.

6.2.1 Testovací hypotéza pro vzorek K-A1

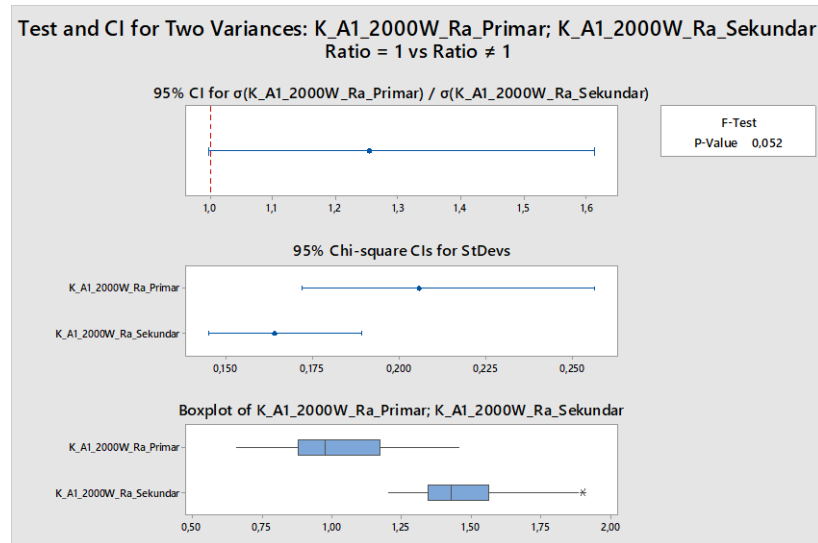


Obr. 73: K-A1 rozdělení



Obr. 74: Boxplot parametru Ra u vzorku K-A1

F-test



Obr. 75: F-test vzorku K-A1

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \sigma_{RaI}^2 = \sigma_{RaII}^2$$

$$H_A: \sigma_{RaI}^2 \neq \sigma_{RaII}^2$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$p = 0,052 > \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Nezamítám H_0 o rovnosti rozptylů parametru Ra při výkonu 2000W a řezání konstrukční oceli.

t-test**Two-Sample T-Test and CI: K_A1_2000W_Ra_Primar; K_A1_2000W_Ra_Sekundar**

Two-sample T for K_A1_2000W_Ra_Primar vs K_A1_2000W_Ra_Sekundar

	N	Mean	StDev	SE Mean
K_A1_2000W_Ra_Primar	50	1,023	0,206	0,029
K_A1_2000W_Ra_Sekundar	111	1,467	0,164	0,016

Difference = μ (K_A1_2000W_Ra_Primar) - μ (K_A1_2000W_Ra_Sekundar)
 Estimate for difference: -0,4440
 95% CI for difference: (-0,5038; -0,3841)
 T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -14,65 P-Value = 0,000 DF = 159
 Both use Pooled StDev = 0,1779

Obr. 76: t-test vzorku K-A1

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \mu_{RaI} = \mu_{RaII}$$

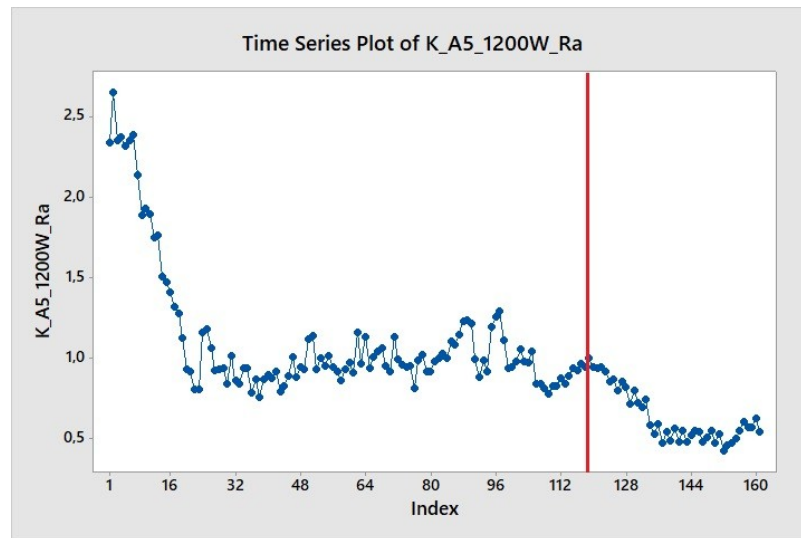
$$H_A: \mu_{RaI} \neq \mu_{RaII}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

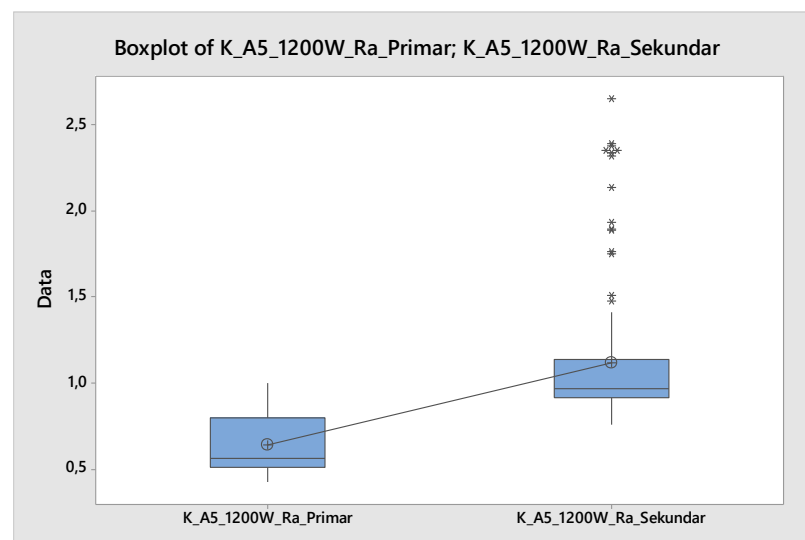
$$p = 0,000 < \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Zamítám H_0 o rovnosti aritmetických průměrů parametru Ra při výkonu 2000W a řezání konstrukční oceli. Aritmetický průměr parametru Ra v oblastech I a II se liší statisticky významně.

6.2.2 Testovací hypotéza pro vzorek K-A5

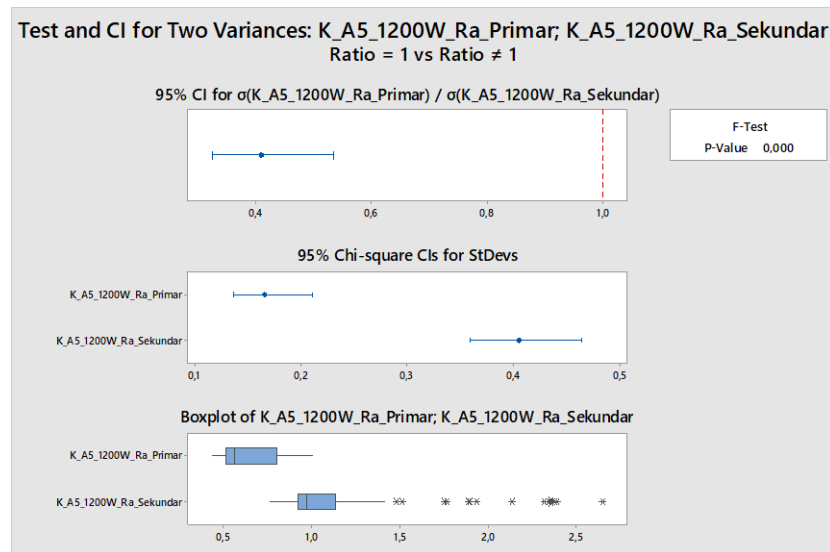


Obr. 77: K-A5 rozdělení



Obr. 78: Boxplot parametru Ra u vzorku K-A5

F-test



Obr. 79: F-test vzorku K-A5

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \sigma_{RaI}^2 = \sigma_{RaII}^2$$

$$H_A: \sigma_{RaI}^2 \neq \sigma_{RaII}^2$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$p = 0,000 < \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Zamítám H_0 o rovnosti rozptylů parametru Ra při výkonu 1200W a řezání konstrukční oceli.

t-test**Two-Sample T-Test and CI: K_A5_1200W_Ra_Primar; K_A5_1200W_Ra_Sekundar**

Two-sample T for K_A5_1200W_Ra_Primar vs K_A5_1200W_Ra_Sekundar

	N	Mean	StDev	SE Mean
K_A5_1200W_Ra_Primar	43	0,640	0,166	0,025
K_A5_1200W_Ra_Sekundar	118	1,121	0,405	0,037

Difference = μ (K_A5_1200W_Ra_Primar) - μ (K_A5_1200W_Ra_Sekundar)

Estimate for difference: -0,4810

95% CI for difference: (-0,6069; -0,3551)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -7,55 P-Value = 0,000 DF = 159*Obr. 80: t-test vzorku K-A5*

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \mu_{RaI} = \mu_{RaII}$$

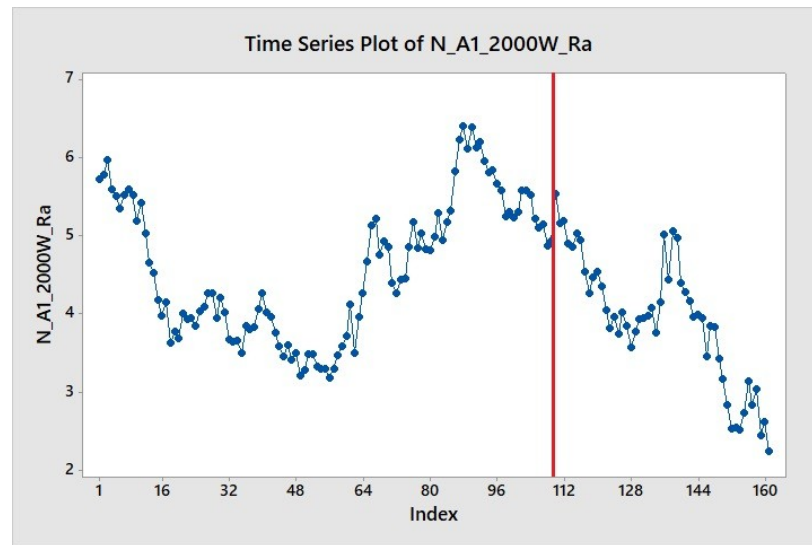
$$H_A: \mu_{RaI} \neq \mu_{RaII}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

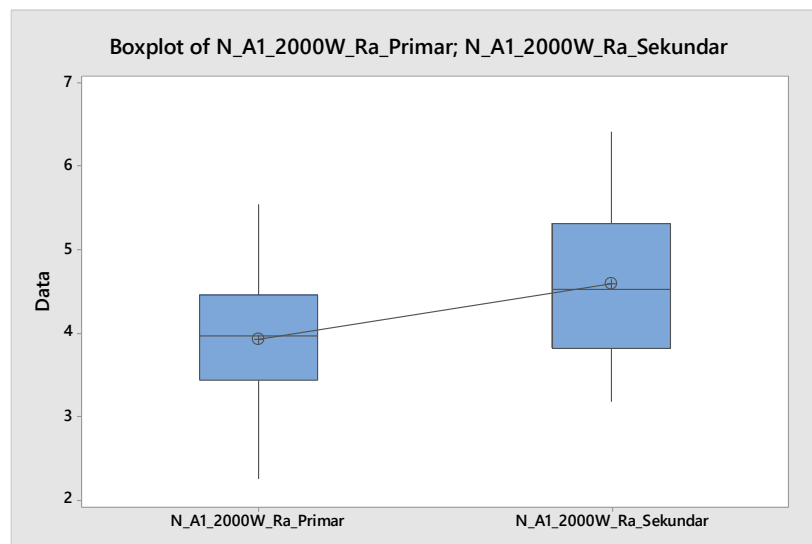
$$p = 0,000 < \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Zamítám H_0 o rovnosti aritmetických průměrů parametru Ra při výkonu 1200W a řezání konstrukční oceli. Aritmetický průměr parametru Ra v oblastech I a II se liší statisticky významně.

6.2.3 Testovací hypotéza pro vzorek N-A1

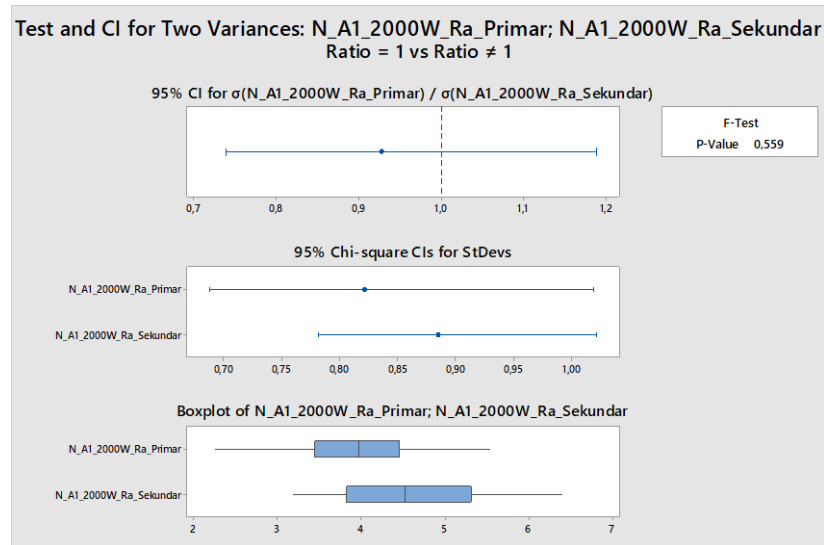


Obr. 81: N-A1 rozdělení



Obr. 82: Boxplot parametru Ra u vzorku N-A1

F-test



Obr. 83: F-test vzorku N-A1

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \sigma_{RaI}^2 = \sigma_{RaII}^2$$

$$H_A: \sigma_{RaI}^2 \neq \sigma_{RaII}^2$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$p = 0,559 > \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Nezamítám H_0 o rovnosti rozptylů parametru Ra při výkonu 2000W a řezání nerezové oceli.

t-test**Two-Sample T-Test and CI: N_A1_2000W_Ra_Primar; N_A1_2000W_Ra_Sekundar**

Two-sample T for N_A1_2000W_Ra_Primar vs N_A1_2000W_Ra_Sekundar

	N	Mean	StDev	SE Mean
N_A1_2000W_Ra_Primar	52	3,924	0,821	0,11
N_A1_2000W_Ra_Sekundar	109	4,600	0,885	0,085

Difference = μ (N_A1_2000W_Ra_Primar) - μ (N_A1_2000W_Ra_Sekundar)
 Estimate for difference: -0,676
 95% CI for difference: (-0,964; -0,388)
 T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -4,64 P-Value = 0,000 DF = 159
 Both use Pooled StDev = 0,8649

Obr. 84: t-test vzorku N-AI

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \mu_{RaI} = \mu_{RaII}$$

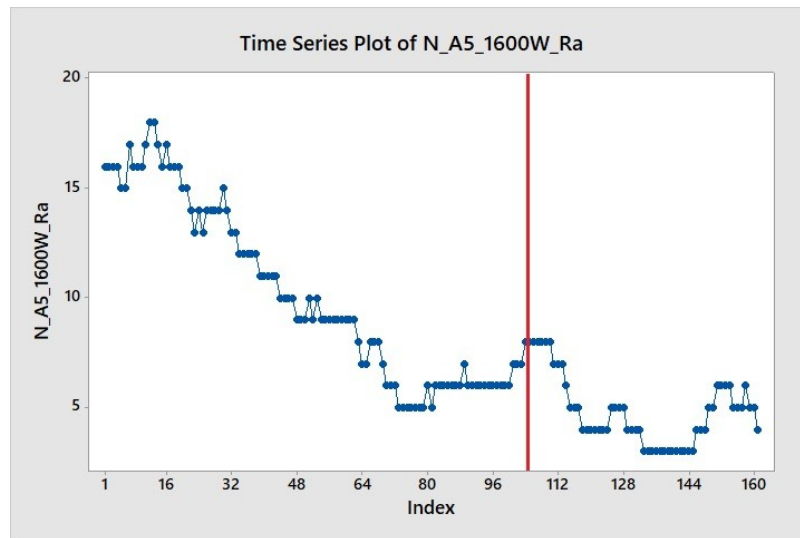
$$H_A: \mu_{RaI} \neq \mu_{RaII}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

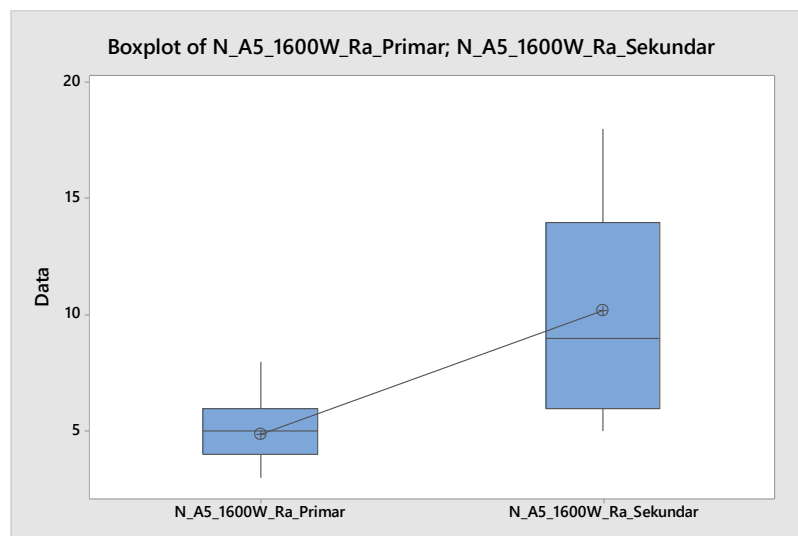
$$p = 0,000 < \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Zamítám H_0 o rovnosti aritmetických průměrů parametru Ra při výkonu 2000W a řezání nerezové oceli. Aritmetický průměr parametru Ra v oblastech I a II se liší statisticky významně.

6.2.4 Testovací hypotéza pro vzorek N-A5

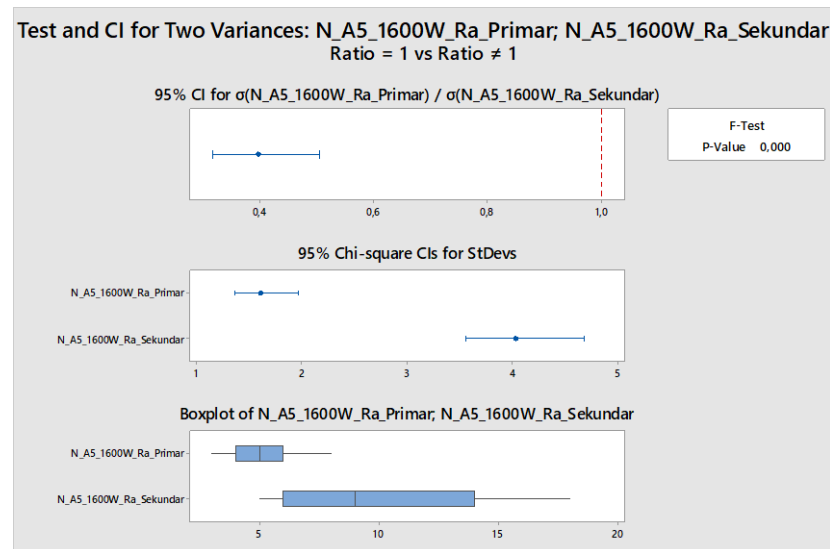


Obr. 85: N-A5 rozdělení



Obr. 86: Boxplot parametru Ra u vzorku N-A5

F-test



Obr. 87: F-test vzorku N-A5

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \sigma_{RaI}^2 = \sigma_{RaII}^2$$

$$H_A: \sigma_{RaI}^2 \neq \sigma_{RaII}^2$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$p = 0,000 > \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Zamítám H_0 o rovnosti rozptylů parametru Ra při výkonu 1600W a řezání nerezové oceli.

t-test**Two-Sample T-Test and CI: N_A5_1600W_Ra_Primar; N_A5_1600W_Ra_Sekundar**

Two-sample T for N_A5_1600W_Ra_Primar vs N_A5_1600W_Ra_Sekundar

	N	Mean	StDev	SE Mean
N_A5_1600W_Ra_Primar	58	4,86	1,61	0,21
N_A5_1600W_Ra_Sekundar	103	10,19	4,03	0,40

Difference = μ (N_A5_1600W_Ra_Primar) - μ (N_A5_1600W_Ra_Sekundar)

Estimate for difference: -5,332

95% CI for difference: (-6,425; -4,240)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -9,64 P-Value = 0,000 DF = 159

Both use Pooled StDev = 3,3693

Obr. 88: t-test vzorku N-A5

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \mu_{RaI} = \mu_{RaII}$$

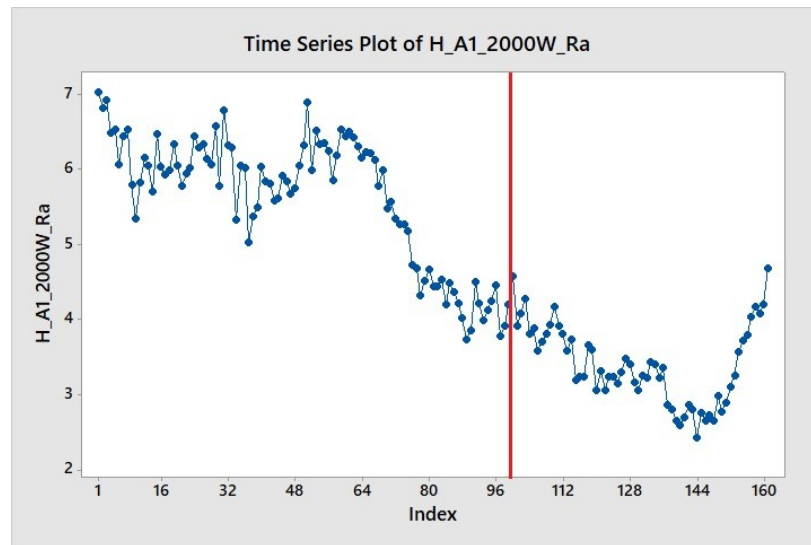
$$H_A: \mu_{RaI} \neq \mu_{RaII}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

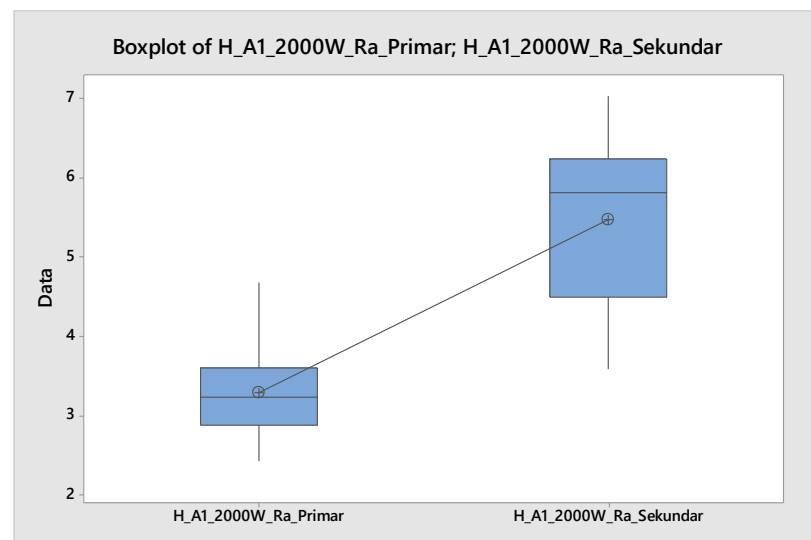
$$p = 0,000 < \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Zamítám H_0 o rovnosti aritmetických průměrů parametru Ra při výkonu 2000W a řezání nerezové oceli. Aritmetický průměr parametru Ra v oblastech I a II se liší statisticky významně.

6.2.5 Testovací hypotéza pro vzorek H-A1

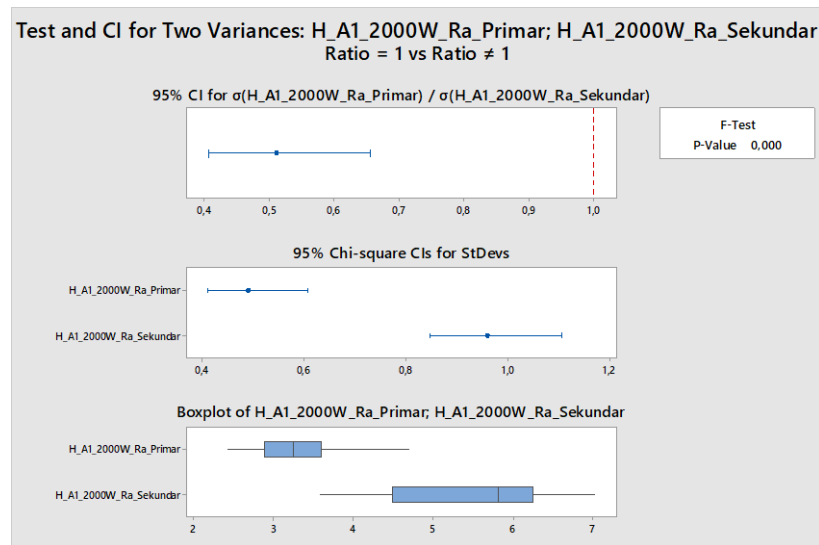


Obr. 89: H-A1 rozdělení



Obr. 90: Boxplot parametru Ra u vzorku H-A1

F-test



Obr. 91: F-test vzorku H-A1

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \sigma_{RaI}^2 = \sigma_{RaII}^2$$

$$H_A: \sigma_{RaI}^2 \neq \sigma_{RaII}^2$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$p = 0,000 > \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Zamítám H_0 o rovnosti rozptylů parametru Ra při výkonu 2000W a řezání hliníkové slitiny.

t-test**Two-Sample T-Test and CI: H_A1_2000W_Ra_Primar; H_A1_2000W_Ra_Sekundar**

Two-sample T for H_A1_2000W_Ra_Primar vs H_A1_2000W_Ra_Sekundar

	N	Mean	StDev	SE Mean
H_A1_2000W_Ra_Primar	52	3,300	0,490	0,068
H_A1_2000W_Ra_Sekundar	109	5,477	0,959	0,092

Difference = μ (H_A1_2000W_Ra_Primar) - μ (H_A1_2000W_Ra_Sekundar)

Estimate for difference: -2,177

95% CI for difference: (-2,456; -1,898)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -15,42 P-Value = 0,000 DF = 159

Both use Pooled StDev = 0,8377

Obr. 92: t-test vzorku H-AI

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \mu_{RaI} = \mu_{RaII}$$

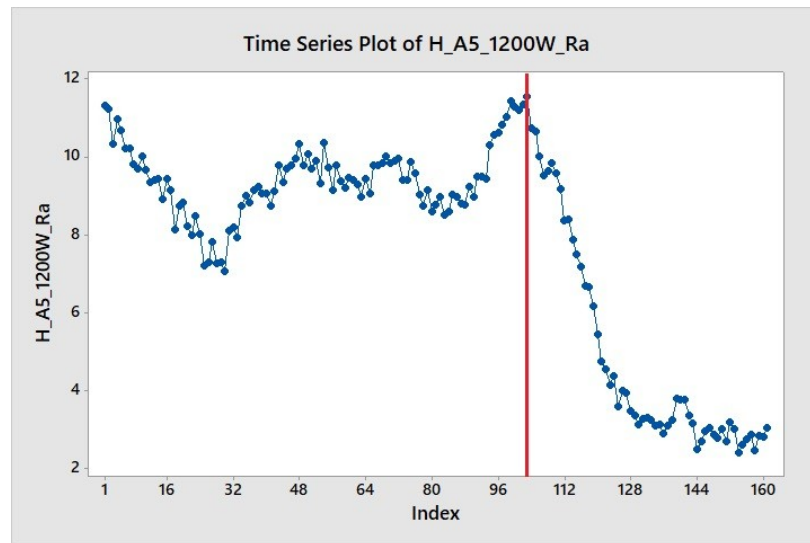
$$H_A: \mu_{RaI} \neq \mu_{RaII}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

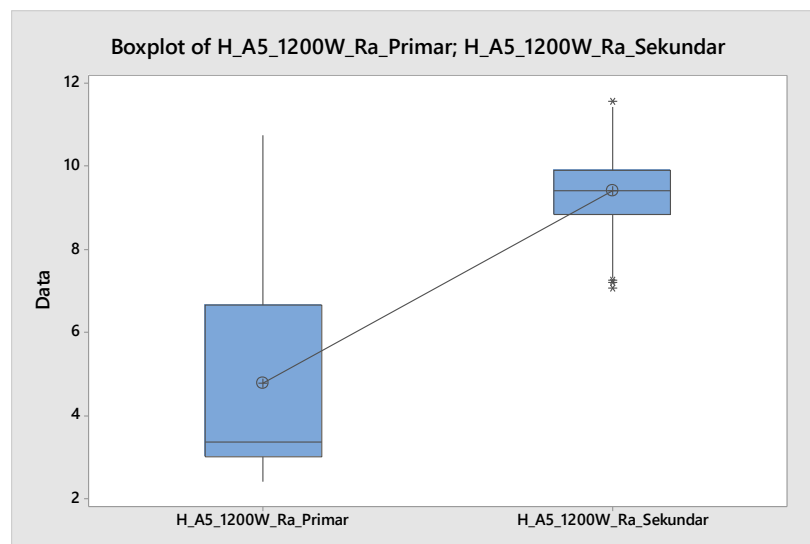
$$p = 0,000 < \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Zamítám H_0 o rovnosti aritmetických průměrů parametru Ra při výkonu 2000W a řezání slitiny hliníku. Aritmetický průměr parametru Ra v oblastech I a II se liší statisticky významně.

6.2.6 Testovací hypotéza pro vzorek H-A5

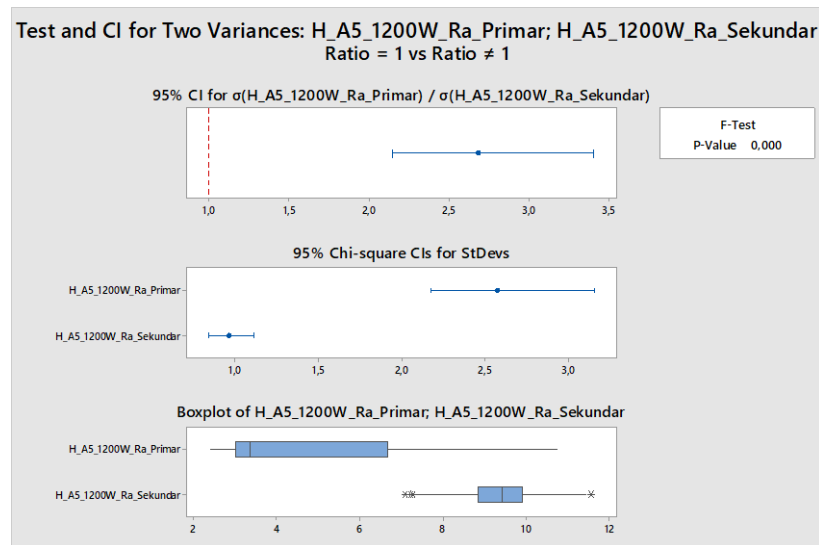


Obr. 93: H-A5 rozdělení



Obr. 94: Boxplot parametru Ra u vzorku H-A5

F-test



Obr. 95: F-test vzorku H-A5

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi rozptyly parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \sigma_{RaI}^2 = \sigma_{RaII}^2$$

$$H_A: \sigma_{RaI}^2 \neq \sigma_{RaII}^2$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$p = 0,000 > \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Zamítám H_0 o rovnosti rozptylů parametru Ra při výkonu 1200W a řezání hliníkové slitiny.

t-test**Two-Sample T-Test and CI: H_A5_1200W_Ra_Primar; H_A5_1200W_Ra_Sekundar**

Two-sample T for H_A5_1200W_Ra_Primar vs H_A5_1200W_Ra_Sekundar

	N	Mean	StDev	SE Mean
H_A5_1200W_Ra_Primar	58	4,78	2,57	0,34
H_A5_1200W_Ra_Sekundar	103	9,405	0,960	0,095

Difference = μ (H_A5_1200W_Ra_Primar) - μ (H_A5_1200W_Ra_Sekundar)

Estimate for difference: -4,627

95% CI for difference: (-5,185; -4,069)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -16,36 P-Value = 0,000 DF = 159

Both use Pooled StDev = 1,7225

Obr. 96: t-test vzorku H-A5

Stanovení nulové hypotézy:

H_0 : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky nevýznamný.

Stanovení alternativní hypotézy:

H_A : Rozdíl mezi aritmetickými průměry parametru Ra primární a sekundární oblasti je statisticky významný.

$$H_0: \mu_{RaI} = \mu_{RaII}$$

$$H_A: \mu_{RaI} \neq \mu_{RaII}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$p = 0,000 < \alpha = 0,050 \rightarrow$$

Zamítám H_0 o rovnosti aritmetických průměrů parametru Ra při výkonu 1200W a řezání slitiny hliníku. Aritmetický průměr parametru Ra v oblastech I a II se liší statisticky významně.

6.3 Tepelné ovlivnění materiálu

Pro zjištění tepelného ovlivnění materiálu byla měřena mikrotvrдость podle Vickerse. Mikrotvrдость byla měřena na ploše kolmé k řezné ploše, vzdálenost vpichů byla odečítána pomocí posuvného stolu zařízení. Největší měřená vzdálenost od řezné spáry byla 3,5 mm.

Parametry měření mikrotvrđosti:

Rychlost zatížení – 2 N/min,

Maximální zatížení – 1 N

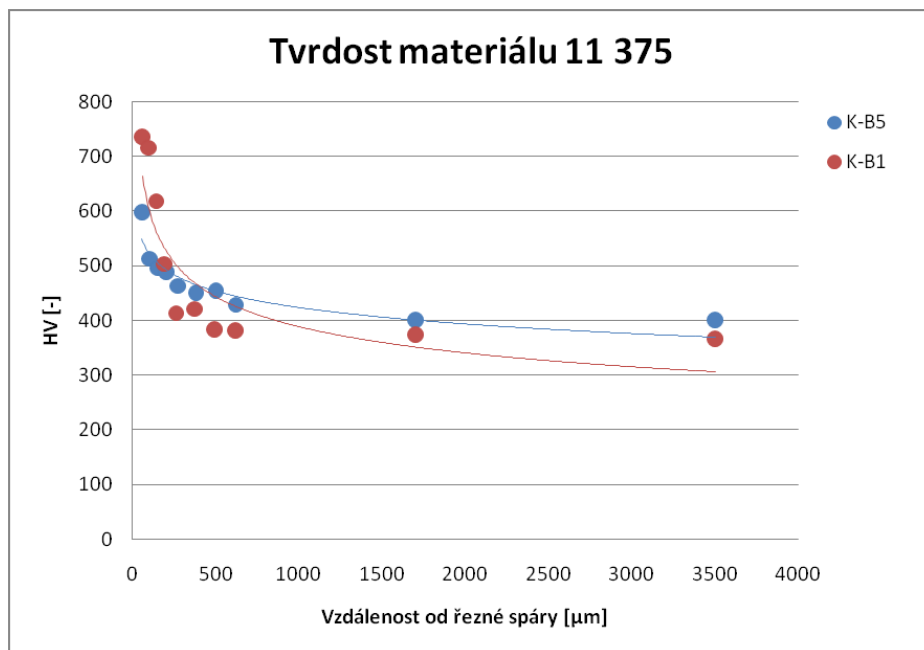
Rychlost odlehčení – 2 N/min

Prodleva mezi měřeními – 10 s.

6.3.1 Tepelné ovlivnění materiálu 11 375

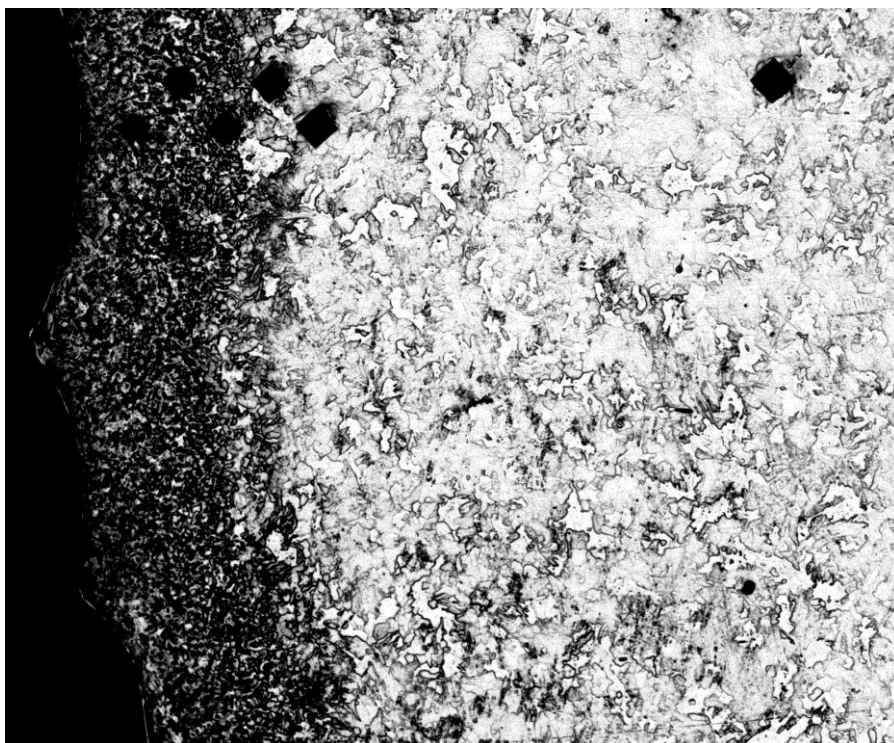
Tab. 17: Technologické parametry pro obrábění oceli 11 375

Vzorek	Materiál	Plyn	Řezná rychlost [mm/min]	Výkon [W]
K-B1	11 375	O ₂	650	2000
K-B5	11 375	O ₂	2450	2000

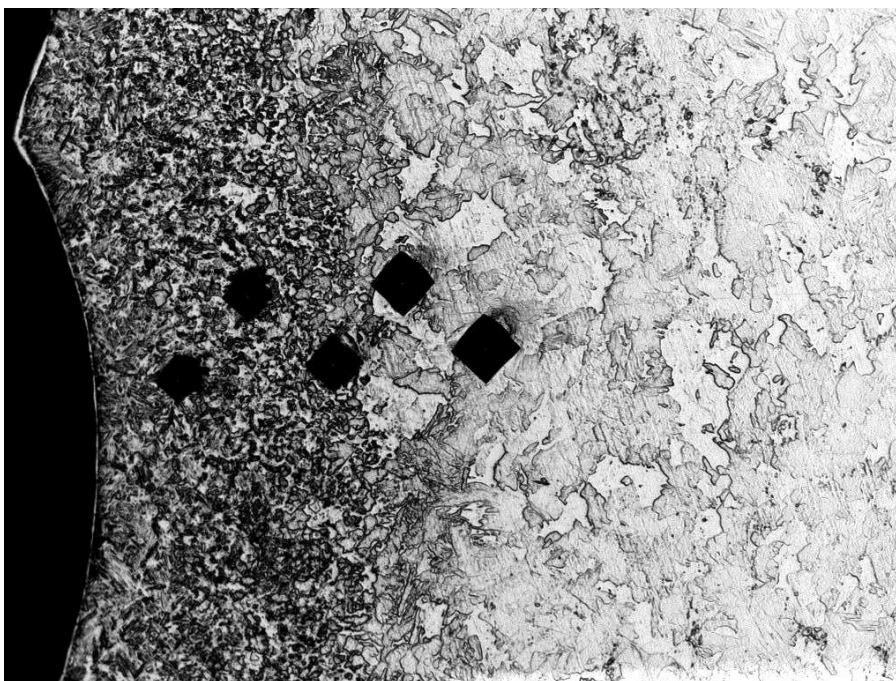


Obr. 97: Tvrdość materiálu 11 375

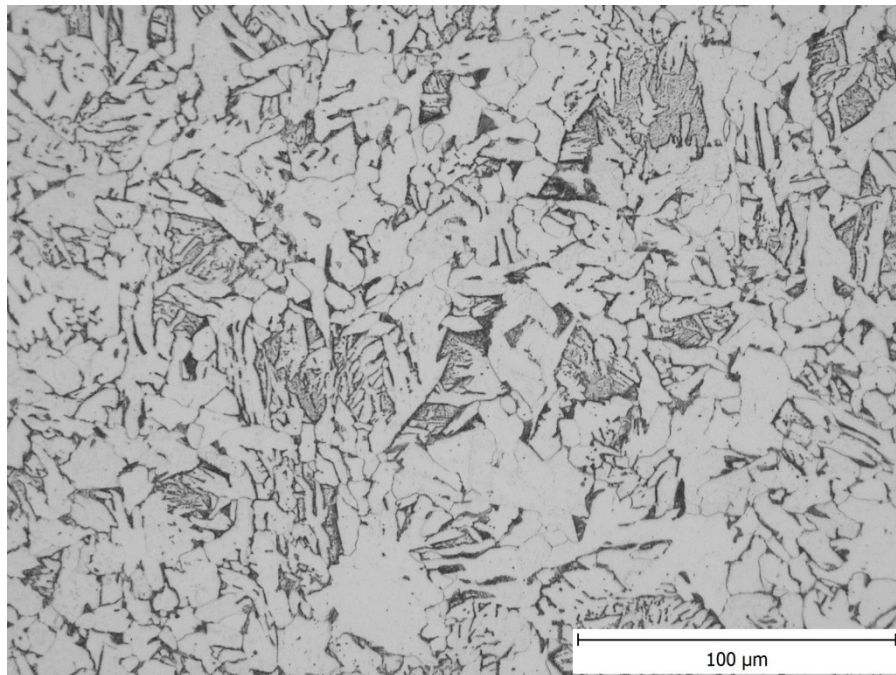
Z výsledků měření tvrdosti materiálu 11 375 při různých řezných rychlostech laseru vyplývá, že prokazatelně došlo k ovlivnění vlastností materiálu. U obou vzorků byla naměřena největší tvrdost v blízkosti řezné spáry. S rostoucí vzdáleností od řezné spáry tvrdost strmě klesá a poté dochází k postupnému zvolnění. Hranice tepelně ovlivněné oblasti je přibližně 1,5 – 1,7 mm od řezné spáry. Největší tvrdost 735,8 HV byla naměřena u vzorku K-B1 s nejmenší řeznou rychlostí. Tato skutečnost může být způsobena delší interakcí paprsku s materiálem. U tohoto vzorku byl naměřen dvojnásobný nárůst tvrdosti, oproti neovlivněné oblasti.



Obr. 98: Struktura materiálu 11 375; zvětšení 150x



Obr. 99: Struktura materiálu 11 375; zvětšení 300x



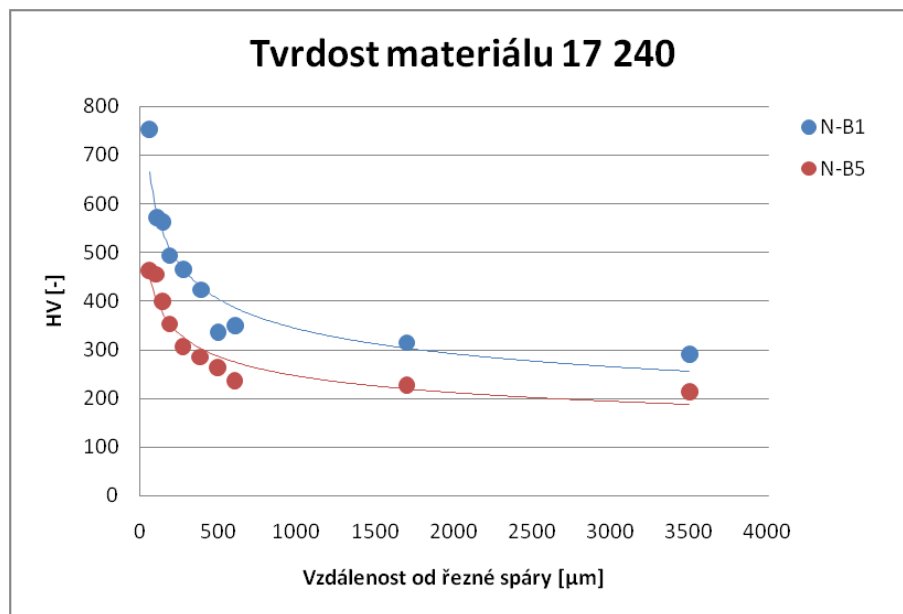
Obr. 100: Struktura materiálu 11 375; zvětšení 500x

Na mikroskopickém pozorování struktury materiálu 11 375 je možné vidět, že skutečně došlo k ovlivnění struktury materiálu po obrábění paprskem laseru. Na mikroskopických fotografiích lze pozorovat feriticko-bainitickou strukturu a v blízkosti řezné spáry martenzickou strukturu.

6.3.2 Tepelné ovlivnění materiálu 17 240

Tab. 18: Technologické parametry pro obrábění oceli 17 240

Vzorek	Materiál	Plyn	Řezná rychlost [mm/min]	Výkon [W]
N-B1	17 240	N ₂	2000	2000
N-B5	17 240	N ₂	200	2000



Obr. 101: Tvrdość materiálu 17 240

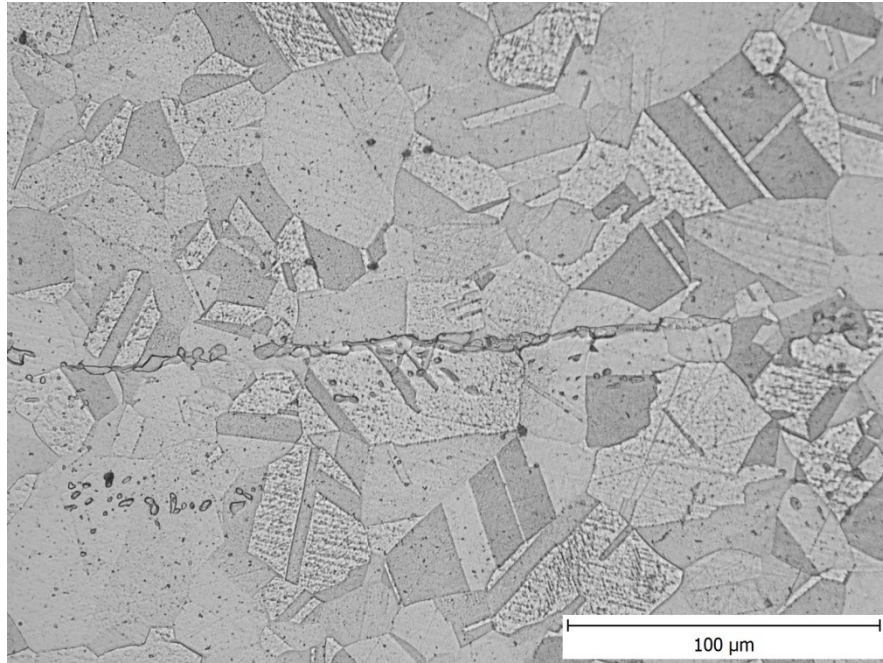
I při měření tvrdosti materiálu 17 240 byl zjištěn podobný vývoj tvrdosti s rostoucí vzdáleností od řezné spáry. U obou vzorků byla naměřena největší tvrdost v blízkosti řezné spáry a s rostoucí vzdáleností od řezné spáry tvrdost materiálu klesá. Hranice tepelně ovlivněné oblasti je přibližně 0,5 – 0,7 mm od řezné spáry. Největší tvrdost 753,2 HV byla naměřena u vzorku N-B1 s největší řeznou rychlostí. To může být způsobeno nižší tepelnou vodivostí materiálu, kdy nedocházelo k rychlejšímu vedení tepla materiálem do větší vzdálenosti a došlo ke strukturálním změnám v těsné blízkosti řezné spáry. Oproti materiálu 11 375 je možné pozorovat zmenšení velikosti tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 102: Struktura materiálu 17 240; zvětšení 150x



Obr. 103: Struktura materiálu 17 240; zvětšení 300x



Obr. 104: Struktura materiálu 17 240; zvětšení 500x

U nerezové oceli 17 240 je pozorována typická austenitická struktura s klasickými dvojčaty.

ZÁVĚR

Nekonvenční metody se vyvíjely jako doplňující technologie metod klasického třískového obrábění. S postupem času však našly uplatnění v mnoha oblastech a v dnešní době se využívají jako plnohodnotné technologie obrábění. Mezi nejrozšířenější nekonvenční technologie patří technologie laserového paprsku, které je věnována tato diplomová práce.

V úvodu teoretické části byly jednotlivě popsány nekonvenční metody obrábění, které se v dnešní době běžně používají. Dále se byla tato práce zaměřena, stejně jako celá diplomová práce, na technologii laserového obrábění. Byl zde popsán základní princip laseru, vlastnosti laserového paprsku, základní rozdělení laserů a interakce paprsku s materiálem. Závěr teoretické části byl věnován metodám vyhodnocování kvality povrchu a testovacím hypotézám.

Cílem praktické části byla výroba vzorků z různých materiálů a zkoumání vlivu technologických parametrů na kvalitu řezné plochy. Pro výrobu vzorků byly zvoleny běžně používané materiály ve strojírenství: konstrukční ocel 11 375, nerezová ocel 17 240 a slitina hliníku AW 1050 H24. U těchto materiálů byl zkoumán vliv řezné rychlosti, vliv výkonu laseru a vliv tlaku asistenčního plynu. Vzorky byly vyráběny na vláknovém laserovém zařízení s maximálním výkonem 2000 W od společnosti NESSAP GAMA.

Prvním z vyhodnocovaných parametrů byla drsnost povrchu, která byla měřena zařízením Taylor Hobson Talysurf CLI 500 na totožných stranách vzorků. Z naměřených dat byl vytvořen prostorový snímek povrchu řezné plochy a byly získány parametry drsnosti Ra a Rz pro vyhodnocování kvality. U vzorků byla porovnávána průměrná hodnota Ra a Rz.

Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že výkon laseru podstatně neovlivnil drsnost povrchu. Při snižování výkonu nedocházelo k postupnému zhoršení drsnosti povrchu, ale teprve po překročení určité hranice výkonu pro daný materiál se začala kvalita povrchu zhoršovat.

Obecně platí, že s rostoucí řeznou rychlostí se zlepšuje drsnost řezné plochy. Toto se potvrdilo pouze u vzorků z konstrukční oceli. Mění se řezná rychlost neměla významný vliv na kvalitu povrchu u vzorků z nerezové oceli a při obrábění slitiny hliníku měla řezná rychlost úplně opačný vliv než u oceli 11 375 – kvalita povrchu se s rostoucí rychlostí zhoršovala.

Posledním zkoumaným technologickým parametrem byl tlak asistenčního plynu a jeho vliv na kvalitu. Vliv tlaku plynu oproti vlivu řezné rychlosti nebyl tak podstatný. U oceli

11 375 bylo zjištěno zhoršení drsnosti povrchu při nejnižším (0,8 bar) a nejvyšším (1,6 bar) nastaveném tlaku. U vzorků ze slitiny hliníku došlo k výraznému zhoršení drsnosti při nastavení tlaku pod hodnotu 11 barů.

Dále byl pomocí testovacích hypotéz zkoumán trend, kterým jsou charakteristické paprskové metody obrábění. Tento trend říká, že na vstupu paprsku do materiálu se dosahuje vyšší kvality obrobeného povrchu než na výstupu paprsku z materiálu. Toto tvrzení bylo potvrzeno u všech zkoumaných vzorků. Cílem tohoto testování bylo poukázat, že na řeznou plochu nelze pohlížet jako na celek, ale kvalita povrchu u součástí vyrobených laserovou metodou musí být zkoumána v jednotlivých částech řezu.

V poslední části diplomové práce byl zkoumán vliv laserového paprsku na tvrdost a strukturu materiálu v blízkosti řezu u vzorků s měnící se řeznou rychlostí. Tvorba možných strukturálních změn při laserovém obrábění oceli byla potvrzena měřením mikrotvrdosti a mikroskopickým pozorováním. U oceli 11 375 došlo ke zvýšení tvrdosti materiálu u obou zkoumaných vzorků až na dvounásobnou hodnotu oproti neovlivněné oblasti. U této oceli byla pomocí mikroskopu zjištěna feriticko-bainitická strukturu a v blízkosti řezné spáry martenzitická strukturu. Také u oceli 17 240 byl zjištěn nárůst tvrdosti materiálu v blízkosti řezu, ale nedošlo zde k strukturálním změnám, protože nedošlo k rekrytalizaci materiálu. S rostoucí vzdáleností od řezné spáry tvrdost strmě klesala a poté docházelo k postupnému zvoľnění.

Ve výsledku se jako nejvíce ovlivňující technologický parametr projevila řezná rychlost. Nicméně vliv výkonu laseru a tlak asistenčního plynu nesmí být zanedbáván. Nejlepší kvality povrchu je možné dosáhnout vhodnou kombinací všech technologických parametrů. Tato kombinace se liší pro různé materiály.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇKOVÁ, I. *Progresivní technologie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] ŠKROBÁK, Adam. *Nekonvenční technologie* [přednáška]. Zlín: UTB, 27. 10. 2018
- [3] *Cesta k objevu* [online]. ČEZ. 2004 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>
- [4] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8
- [5] NOVÁK, Miroslav. *Seriál na téma lasery – Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. LAO - průmyslové systémy s.r.o., 2011. [cit. 2019-05-12].
Dostupné z: <http://www.lao.cz/laoinfo-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [6] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění II*. Ostrava: VŠB – Technická universita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3944-8
- [7] REICHL, Jaroslav. *Emise a absorpce světla*. [online]. Encyklopedie fyziky, 2008. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla#>
- [8] KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery – Laserové řezání* [online]. LAO - průmyslové systémy s.r.o., 2011. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/laoinfo-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [9] *Co rozhoduje při volbě typu laseru* [online]. MM Průmyslové spektrum. 2011 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
- [10] *Možné dělení typů a druhů laserů* [online]. Leonardo technology s.r.o. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [11] *Drsnost povrchu* [online]. OVMT. 2012 [cit. 201-05-12]. Dostupné z:
<http://files.ovmt.webnode.cz/200000030-3094f328a0/Drsnost%20povrchu.pdf>

- [12] PROCHÁZKA, Lukáš. *Technická dokumentace*. [online]. 2014. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: http://www.sps-prosek.cz/soubory/M/TD/TD-struktura_povrchu.pdf
- [13] *Měření tvrdosti* [online]. MEDUNA vakuová kalírna s.r.o. 2018. [cit. 201-05-12]. Dostupné z: <http://www.kalirna.cz/cz/sluzby/item/36-mereni-tvrdosti.html>
- [14] *Zkouška tvrdosti podle Vickerse* [online]. HANYKO Praha s.r.o. 2016. [cit. 201-05-12]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrdost-a-jak-se-meri/zkouska-tvrdosti-podle-vickerse/>
- [15] *Měření tvrdosti* [online]. ELUC. 2014. [cit. 201-05-12]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1569>
- [16] BEDÁŇOVÁ, Iveta. *Testování hypotéz ve statistice* [online]. VFU Brno, 2015. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/hypotezy.htm>
- [17] *NESSAP GAMA* [online]. NESSAP GAMA, 2012. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.cncstroje.cz/produkty-nessap-gama-detail-2>
- [18] *Jakosti ocelí* [online]. Feromat Brno s.r.o., 2014. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
- [19] *Nerezová ocel 1.4301* [online]. INOX, spol. s r. o., 2019. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
- [20] *EN AW-1050* [online]. ALUCAD Bohemia, s. r. o., 2019. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-1050>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

NT	Nekonvenční technologie
USM	Ultrasonic machining
AJM	Abrasive jet machining
AFM	Abrasive flow machining
WJM	Water jet machining
AWJM	Abrasive water jet machining
CM	Chemical machining
PCM	Photochemical machining
ECM	Electrochemical machining
ECG	Electrochemical grinding
EDM	Electrical discharge machining
LBM	Laser beam machining
EBM	Electron beam machining
IBM	Ion beam machining
PAM	Plasma arc machining
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation
E_1	Nižší energetická hladina
E_2	Vyšší energetická hladina
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu
Rz	Největší výška profilu
Z_{\max}	Největší výška výstupku profilu
Z_{\min}	Největší hloubka prohlubně profilu
F	síla
H_0	Nulová hypotéza

H_A	Alternativní hypotéza
σ^2	Rozptyl
μ	Střední hodnota
O_2	Kyslík
N_2	Dusík
HV	Tvrдость podle Vickerse

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Obrábění ultrazvukem [2]</i>	14
<i>Obr. 4: Zařízení AFM [2]</i>	15
<i>Obr. 2: Zařízení AJM [2]</i>	15
<i>Obr. 3: Detail procesu AJM [2]</i>	15
<i>Obr. 5: Obrábění vodním paprskem [2]</i>	16
<i>Obr. 6: Chemické obrábění [2]</i>	16
<i>Obr. 7: Elektrochemické obrábění [2]</i>	17
<i>Obr. 8: Elektrojiskrové obrábění [2]</i>	18
<i>Obr. 9: Elektronové dělo [2]</i>	18
<i>Obr. 10: Zařízení pro IBM [2]</i>	19
<i>Obr. 11: Obrábění plazmou [2]</i>	20
<i>Obr. 12: Stimulovaná emise [5]</i>	21
<i>Obr. 13: Nekoherentní záření (a), koherentní záření (b) [7]</i>	22
<i>Obr. 14: Závislost absorpce laserového záření na vlnové délce záření [9]</i>	23
<i>Obr. 15: Obecný povrch součásti [11]</i>	26
<i>Obr. 16: Zobrazení Rz a Ra [12]</i>	27
<i>Obr. 17: Princip zkoušky [15]</i>	28
<i>Obr. 18: CNC laser</i>	32
<i>Obr. 20: Rozměry vzorku</i>	34
<i>Obr. 19: Vzorek</i>	34
<i>Obr. 21: Řezací hlava</i>	34
<i>Obr. 22. Měření drsnosti</i>	39
<i>Obr. 23. Talysurf CLI 500</i>	39
<i>Obr. 24: Povrch K-A1</i>	40
<i>Obr. 25: Povrch K-A2</i>	40
<i>Obr. 26: Povrch K-A3</i>	41
<i>Obr. 27: Povrch K-A4</i>	41
<i>Obr. 28: Povrch K-A5</i>	41
<i>Obr. 29: Závislost Ra, Rz na výkonu laseru (11 375)</i>	42
<i>Obr. 30: Povrch K-B1</i>	43
<i>Obr. 31: Povrch K-B2</i>	43
<i>Obr. 32: Povrch K-B3</i>	44

<i>Obr. 33: Povrch K-B4</i>	44
<i>Obr. 34: Povrch K-B5</i>	44
<i>Obr. 35: Závislost Ra, Rz na řezné rychlosti (11 375)</i>	45
<i>Obr. 36: Povrch K-C1</i>	46
<i>Obr. 37: Povrch K-C2</i>	46
<i>Obr. 38: Povrch K-C3</i>	47
<i>Obr. 39: Povrch K-C4</i>	47
<i>Obr. 40: Závislost Ra, Rz na tlaku plynu (11 375)</i>	48
<i>Obr. 41: Povrch N-A1</i>	49
<i>Obr. 42: Povrch N-A2</i>	49
<i>Obr. 43: Povrch N-A3</i>	50
<i>Obr. 44: Povrch N-A4</i>	50
<i>Obr. 45: Povrch N-A5</i>	50
<i>Obr. 46: Závislost Ra, Rz na výkonu laseru (17 240)</i>	51
<i>Obr. 47: Povrch N-B1</i>	52
<i>Obr. 48: Povrch N-B2</i>	52
<i>Obr. 49: Povrch N-B3</i>	53
<i>Obr. 50: Povrch N-B4</i>	53
<i>Obr. 51: Povrch N-B5</i>	53
<i>Obr. 52: Závislost Ra, Rz na řezné rychlosti (17 240)</i>	54
<i>Obr. 53: Povrch H-A1</i>	55
<i>Obr. 54: Povrch H-A2</i>	55
<i>Obr. 55: Povrch H-A3</i>	56
<i>Obr. 56: Povrch H-A4</i>	56
<i>Obr. 57: Povrch H-A5</i>	56
<i>Obr. 58: Závislost Ra, Rz na výkonu laseru (AW 1050 H24)</i>	57
<i>Obr. 59: Povrch H-B1</i>	58
<i>Obr. 60: Povrch H-B2</i>	58
<i>Obr. 61: Povrch H-B3</i>	59
<i>Obr. 62: Povrch H-B4</i>	59
<i>Obr. 63: Povrch H-B5</i>	59
<i>Obr. 64: Závislost Ra, Rz na řezné rychlosti (AW 1050 H24)</i>	60
<i>Obr. 65: Povrch H-C1</i>	61

<i>Obr. 66: Povrch H-C2</i>	61
<i>Obr. 67: Povrch H-C3</i>	62
<i>Obr. 68: Povrch H-C4</i>	62
<i>Obr. 69: Povrch H-C5</i>	62
<i>Obr. 70: Závislost Ra, Rz na tlaku plynu (AW 1050 H24)</i>	63
<i>Obr. 71: Srovnání vlivu výkonu na kvalitu povrchu</i>	64
<i>Obr. 72: Srovnání vlivu řezné rychlosti na kvalitu povrchu</i>	65
<i>Obr. 73: K-A1 rozdělení</i>	66
<i>Obr. 74: Boxplot parametru Ra u vzorku K-A1</i>	66
<i>Obr. 75: F-test vzorku K-A1</i>	67
<i>Obr. 76: t-test vzorku K-A1</i>	68
<i>Obr. 77: K-A5 rozdělení</i>	69
<i>Obr. 78: Boxplot parametru Ra u vzorku K-A5</i>	69
<i>Obr. 79: F-test vzorku K-A5</i>	70
<i>Obr. 80: t-test vzorku K-A5</i>	71
<i>Obr. 81: N-A1 rozdělení</i>	72
<i>Obr. 82: Boxplot parametru Ra u vzorku N-A1</i>	72
<i>Obr. 83: F-test vzorku N-A1</i>	73
<i>Obr. 84: t-test vzorku N-A1</i>	74
<i>Obr. 85: N-A5 rozdělení</i>	75
<i>Obr. 86: Boxplot parametru Ra u vzorku N-A5</i>	75
<i>Obr. 87: F-test vzorku N-A5</i>	76
<i>Obr. 88: t-test vzorku N-A5</i>	77
<i>Obr. 89: H-A1 rozdělení</i>	78
<i>Obr. 90: Boxplot parametru Ra u vzorku H-A1</i>	78
<i>Obr. 91: F-test vzorku H-A1</i>	79
<i>Obr. 92: t-test vzorku H-A1</i>	80
<i>Obr. 93: H-A5 rozdělení</i>	81
<i>Obr. 94: Boxplot parametru Ra u vzorku H-A5</i>	81
<i>Obr. 95: F-test vzorku H-A5</i>	82
<i>Obr. 96: t-test vzorku H-A5</i>	83
<i>Obr. 97: Tvrdost materiálu 11 375</i>	85
<i>Obr. 98: Struktura materiálu 11 375; zvětšení 150x</i>	86

<i>Obr. 99: Struktura materiálu 11 375; zvětšení 300x</i>	86
<i>Obr. 100: Struktura materiálu 11 375; zvětšení 500x</i>	87
<i>Obr. 101: Tvrdost materiálu 17 240</i>	88
<i>Obr. 102: Struktura materiálu 17 240; zvětšení 150x</i>	89
<i>Obr. 103: Struktura materiálu 17 240; zvětšení 300x</i>	89
<i>Obr. 104: Struktura materiálu 17 240; zvětšení 500x</i>	90

SEZNAM TABULEK

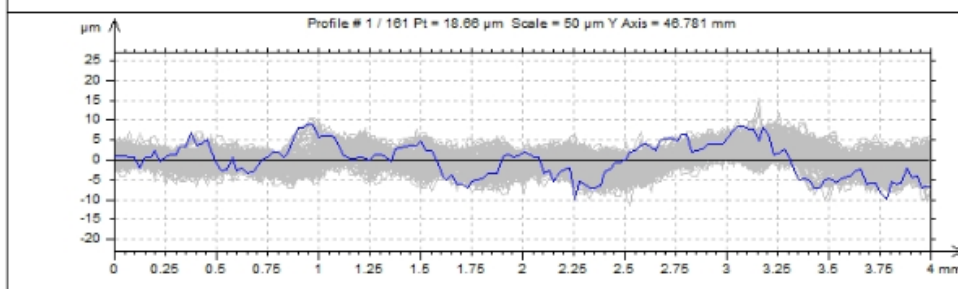
<i>Tab. 1: Série A – změna výkonu laseru (11 375)</i>	35
<i>Tab. 2: Série B – změna řezné rychlosti (11 375).....</i>	35
<i>Tab. 3: Série C – změna tlaku plynu (11 375)</i>	36
<i>Tab. 4: Série A – změna výkonu laseru (17 240)</i>	36
<i>Tab. 5: Série B – změna řezné rychlosti (17 240).....</i>	37
<i>Tab. 6: Série A – změna výkonu laseru (AW 1050 H24)</i>	37
<i>Tab. 7: Série B – změna řezné rychlosti (AW 1050 H24).....</i>	38
<i>Tab. 8: Série C – změna tlaku plynu (AW 1050 H24).....</i>	38
<i>Tab. 9: Výsledky měření změny výkonu laseru (11 375).....</i>	40
<i>Tab. 10: Výsledky měření změny řezné rychlosti (11 375)</i>	43
<i>Tab. 11: Výsledky měření změny tlaku plynu (11 375)</i>	46
<i>Tab. 12: Výsledky měření změny výkonu laseru (17 240).....</i>	49
<i>Tab. 13: Výsledky měření změny řezné rychlosti (17 240)</i>	52
<i>Tab. 14: Výsledky měření změny výkonu laseru (AW 1050 H24).....</i>	55
<i>Tab. 15: Výsledky měření změny řezné rychlosti (AW 1050 H24).....</i>	58
<i>Tab. 16: Výsledky měření změny tlaku plynu (AW 1050 H24)</i>	61
<i>Tab. 17: Technologické parametry pro obrábění oceli 11 375</i>	85
<i>Tab. 18: Technologické parametry pro obrábění oceli 17 240</i>	88

SEZNAM PŘÍLOH

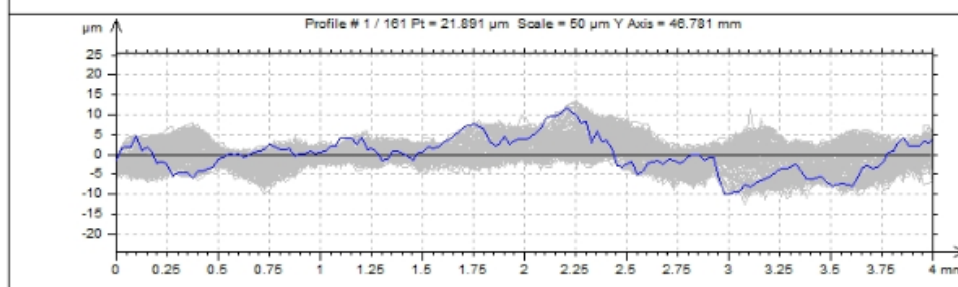
P I – Profily vzorků

PŘÍLOHA P I: PROFILY VZORKŮ

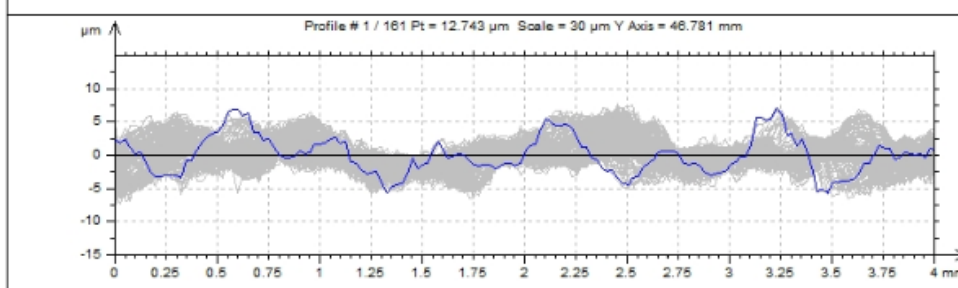
K-A1_2000W Cuts E-W



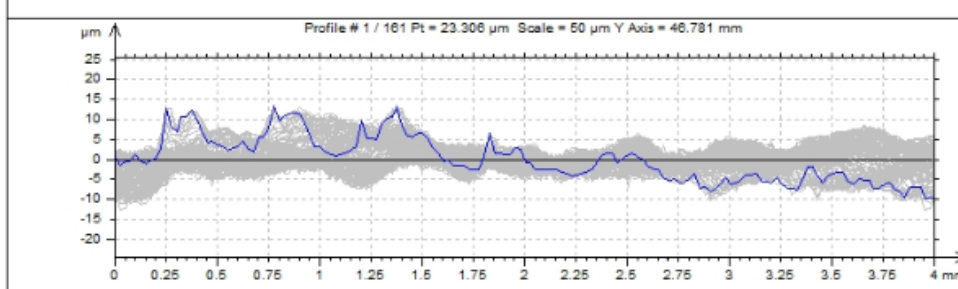
K-A2_1800W Cuts E-W



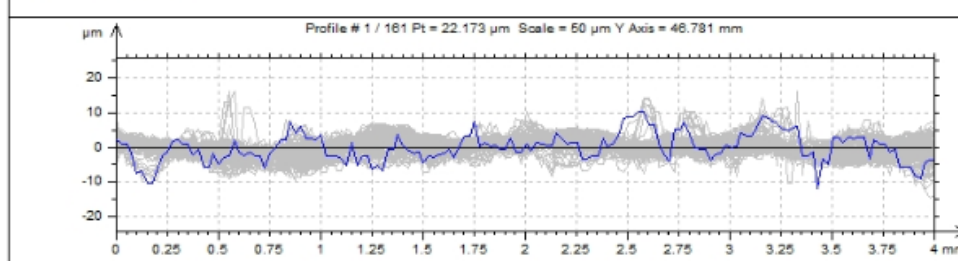
K-A3_1600W Cuts E-W



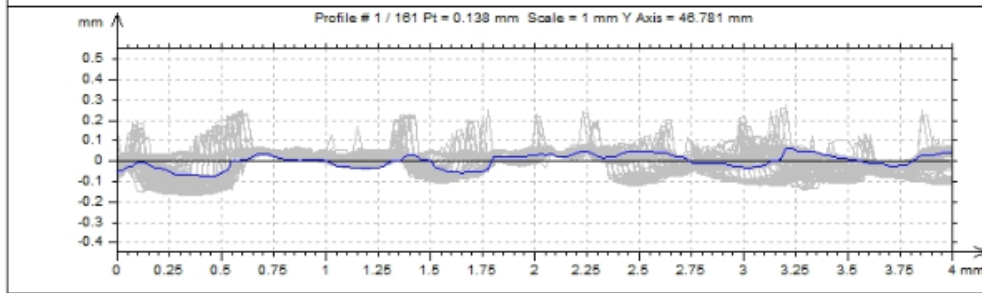
K-A4_1400W Cuts E-W



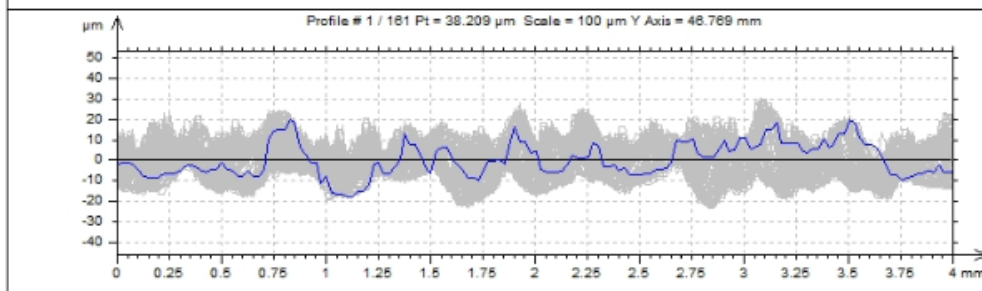
K-A5_1200W Cuts E-W



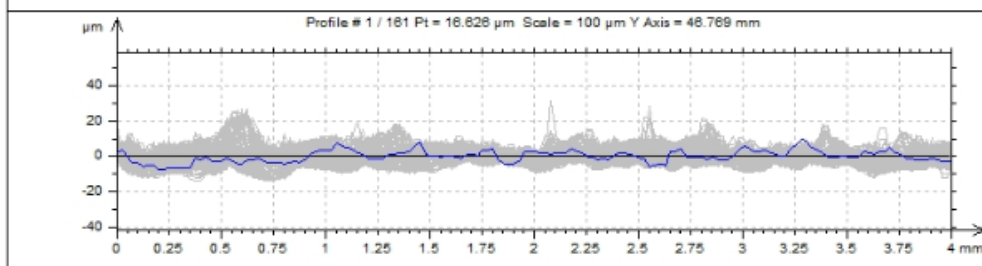
K-B1_650mm/min Cuts E-W



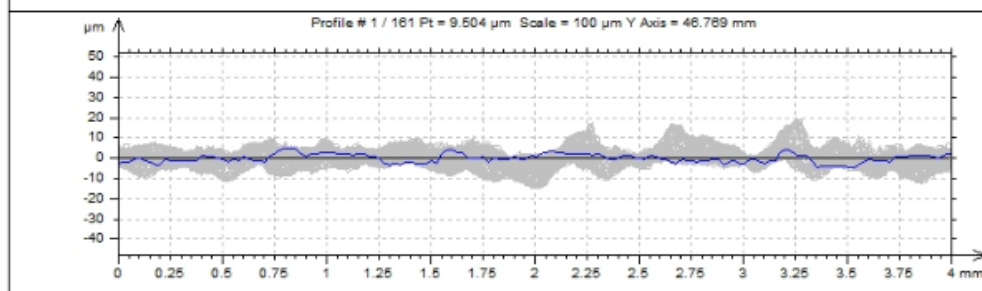
K-B2_1100mm/min Cuts E-W



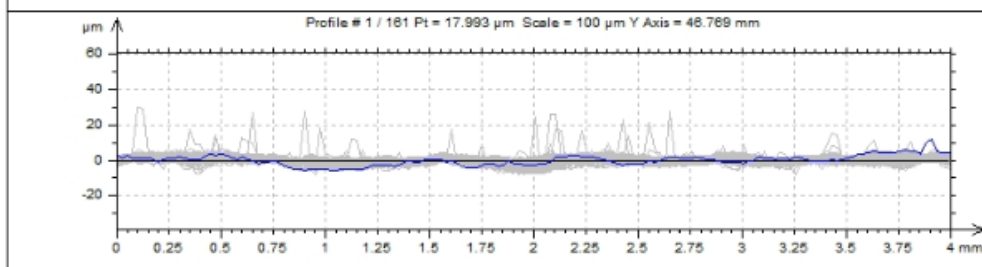
K-B3_1550mm/min Cuts E-W



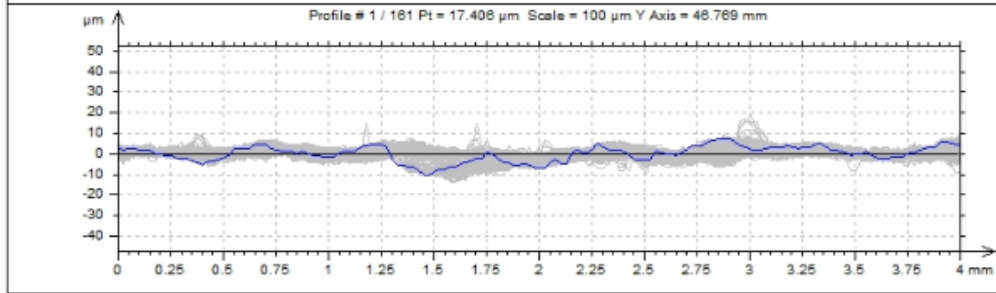
K-B4_2000mm/min Cuts E-W



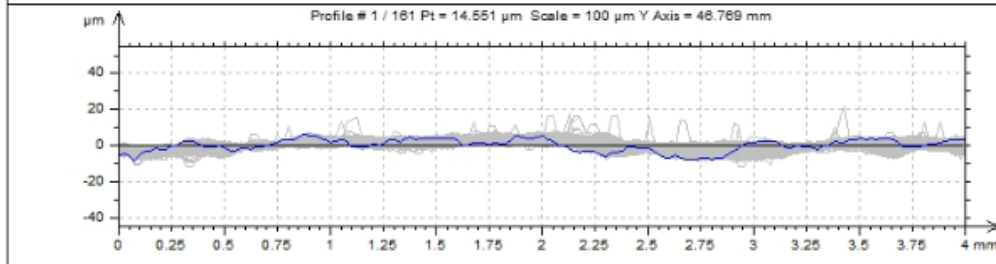
K-B5_2450mm/min Cuts E-W



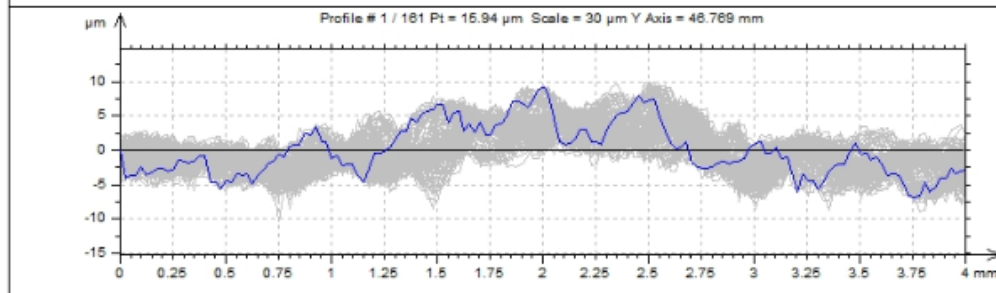
K-C1_0.8bar Cuts E-W



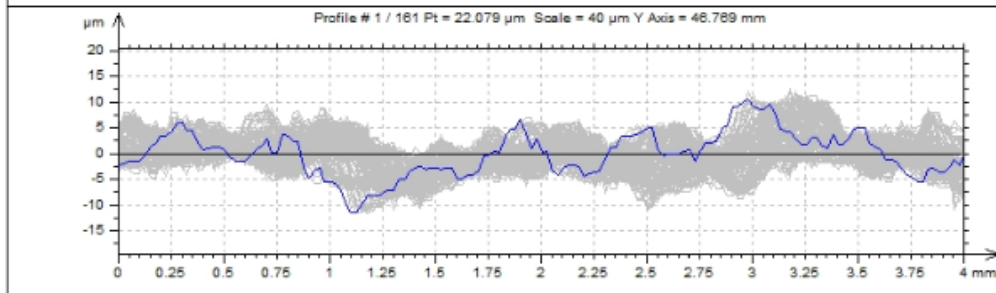
K-C2_1bar Cuts E-W



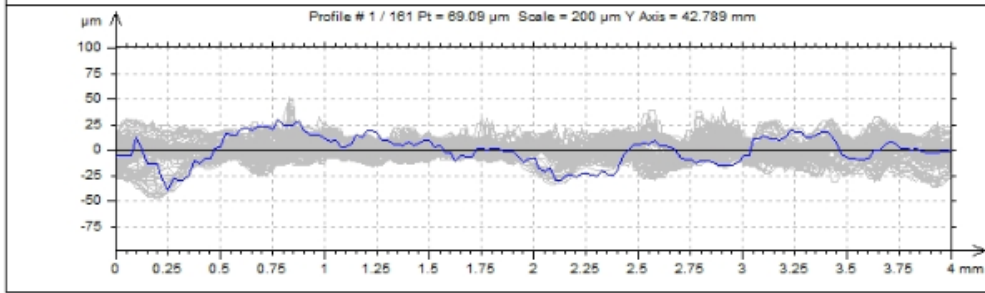
K-C3_1.2bar Cuts E-W



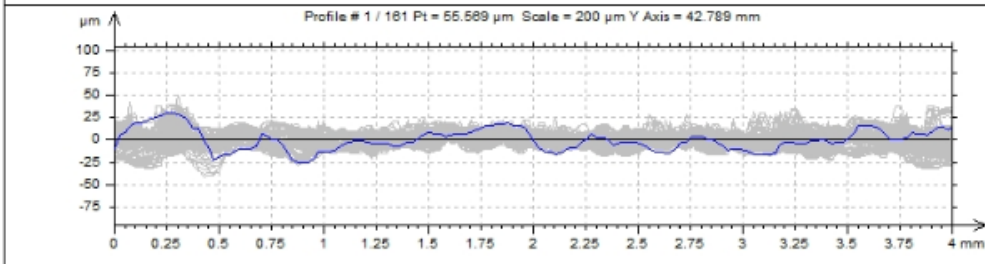
K-C4_1.4bar Cuts E-W



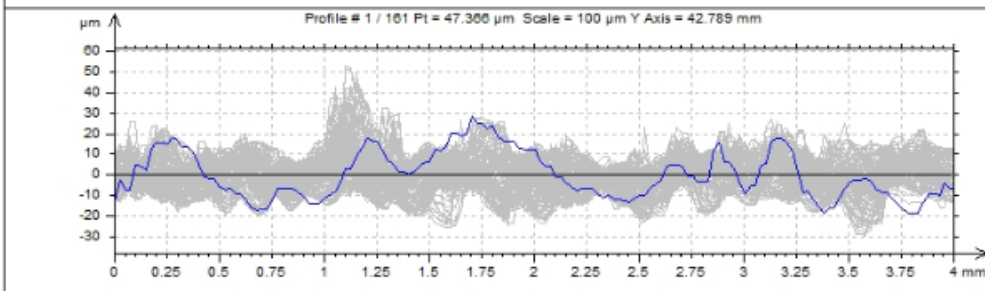
N-A1_2000W Cuts E-W



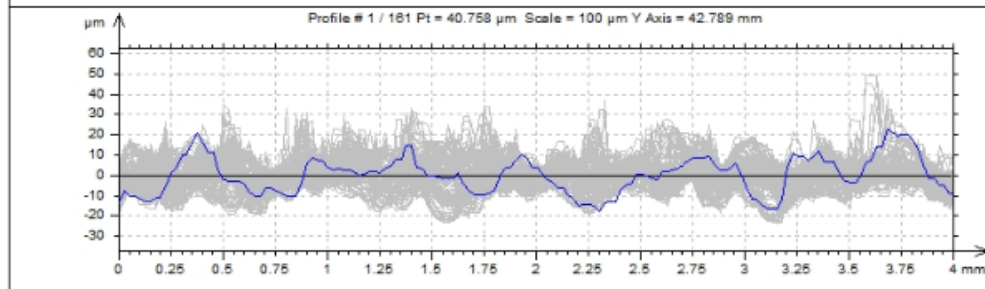
N-A2_1900W Cuts E-W



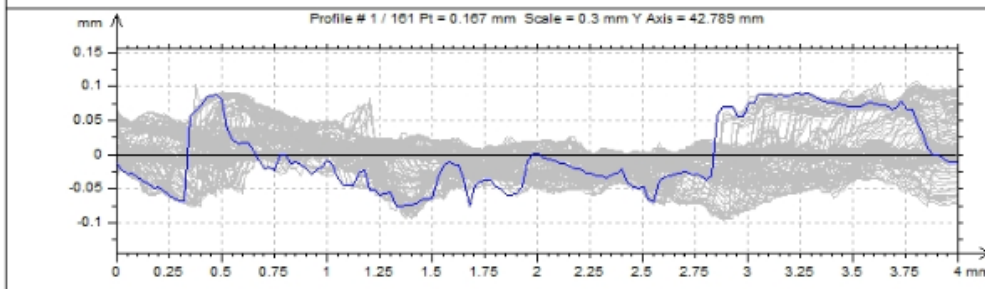
N-A3_1800W Cuts E-W



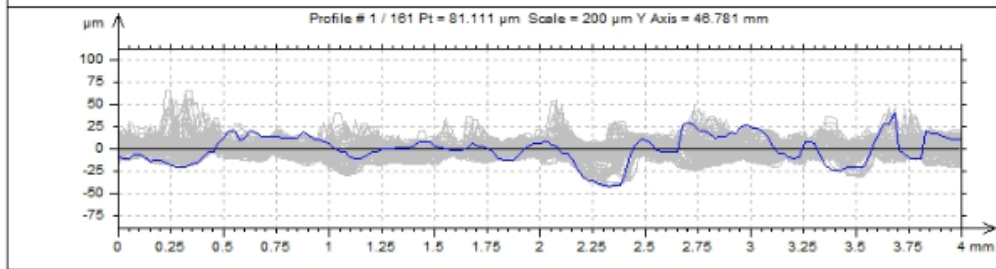
N-A4_1700W Cuts E-W



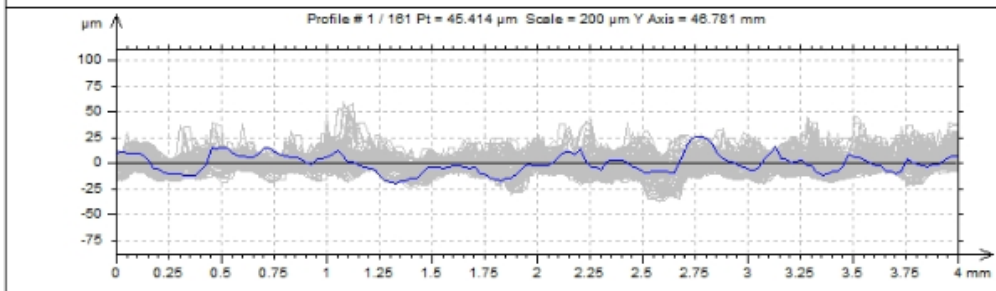
N-A5_1600W Cuts E-W



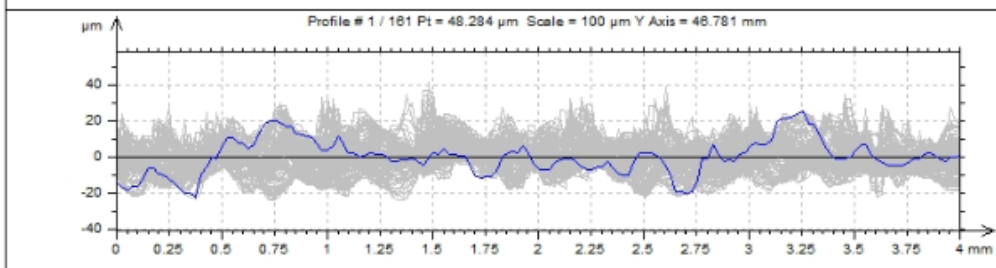
N-B1_2000mm/min Cuts E-W



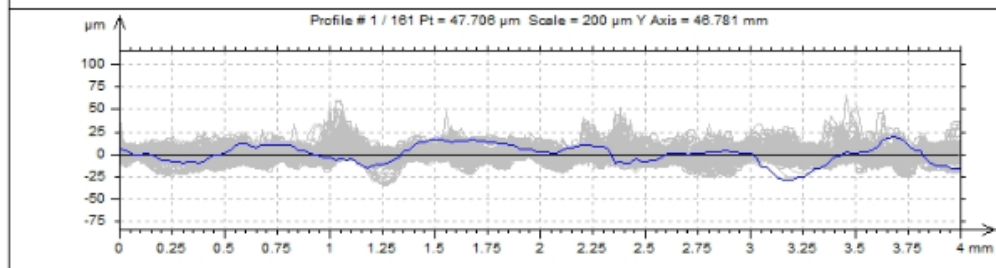
N-B2_1550mm/min Cuts E-W



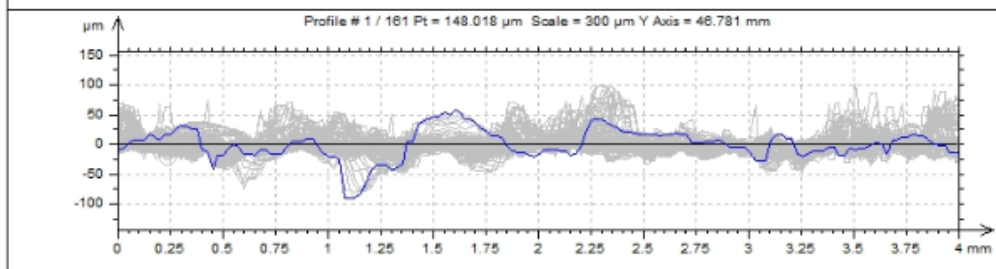
N-B3_1100mm/min Cuts E-W



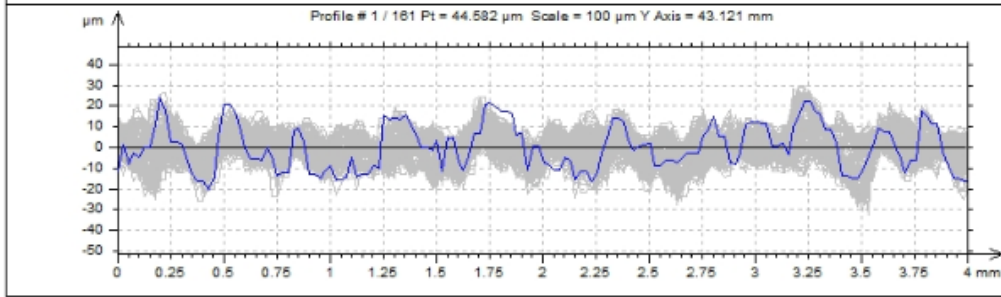
N-B4_650mm/min Cuts E-W



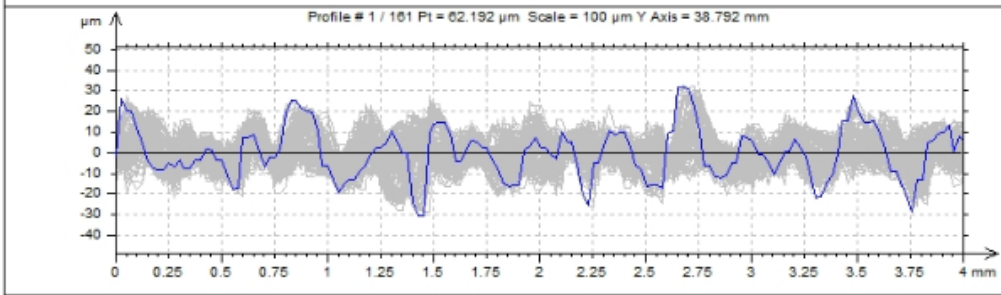
N-B5_200mm/min Cuts E-W



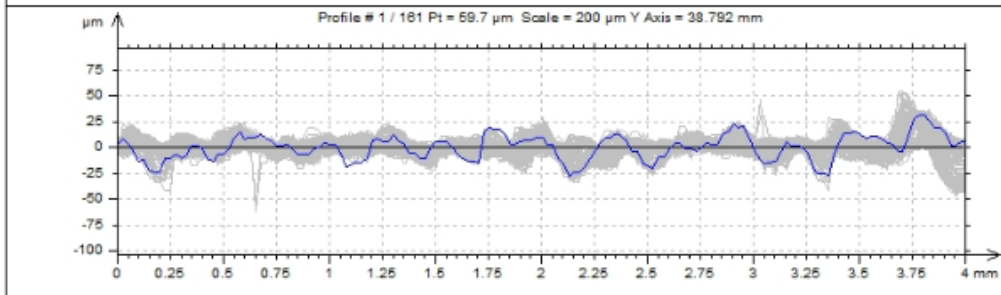
H-A1_2000W Cuts E-W



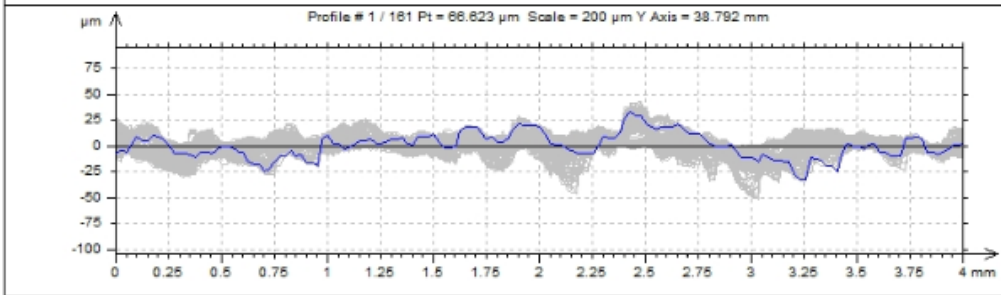
H-A2_1800W Cuts E-W



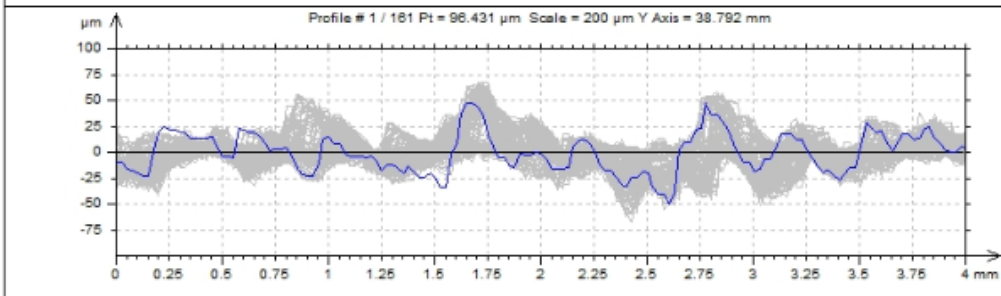
H-A3_1600W Cuts E-W



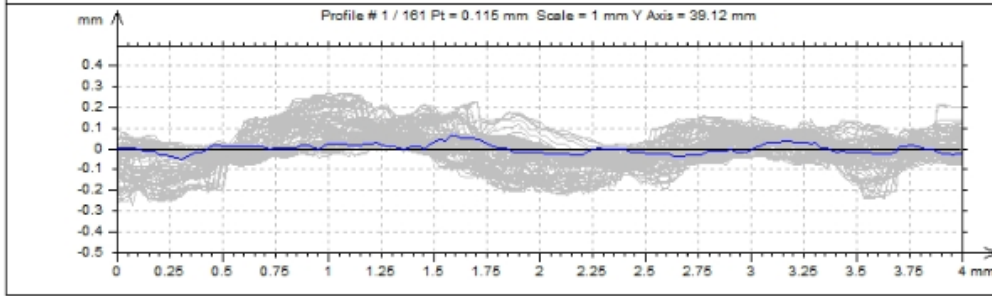
H-A4_1400W Cuts E-W



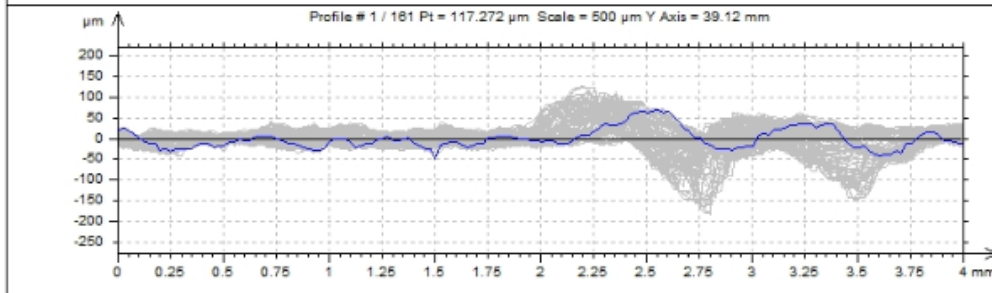
H-A5_1200W Cuts E-W



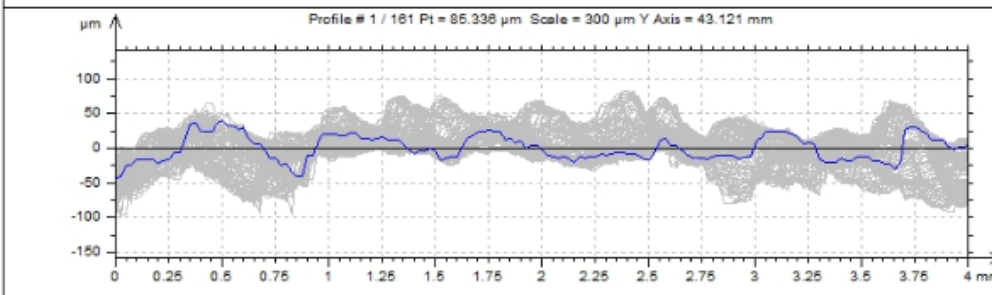
H-B1_500mm/min Cuts E-W



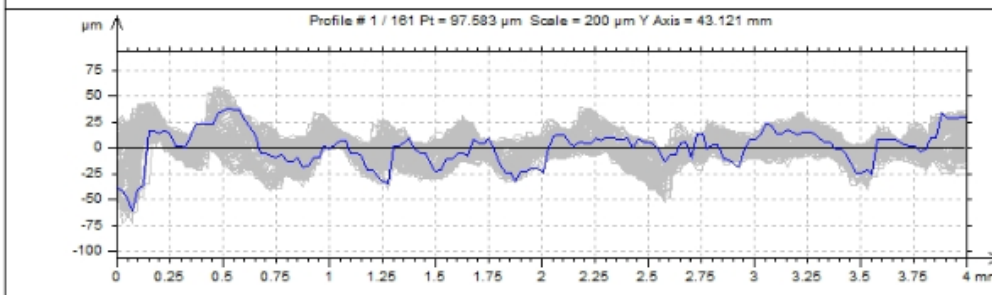
H-B2_400mm/min Cuts E-W



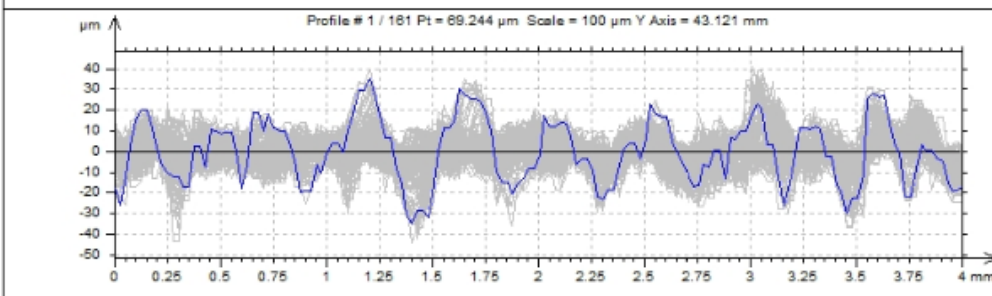
H-B3_300mm/min Cuts E-W



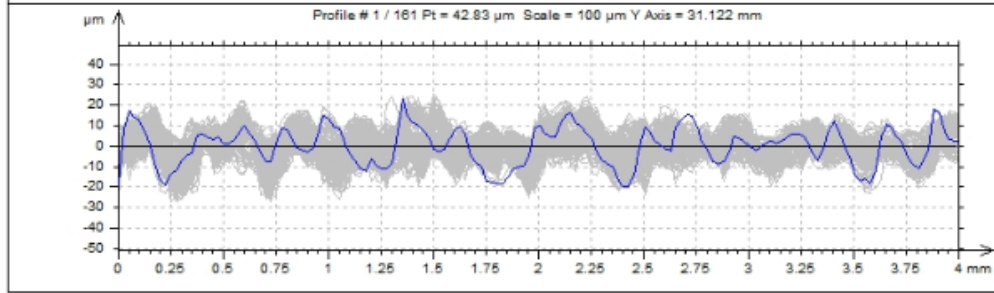
H-B4_200mm/min Cuts E-W



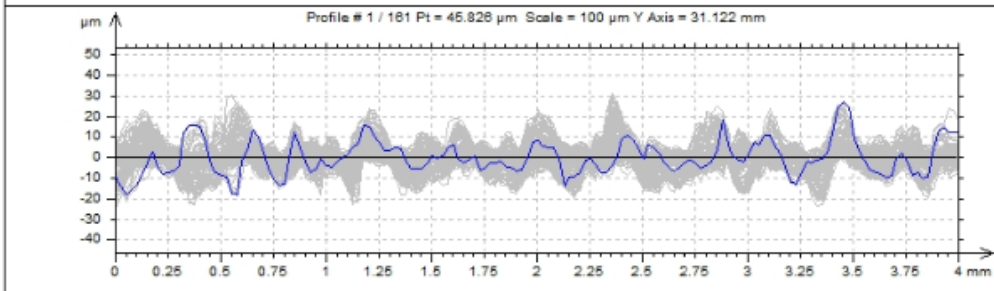
H-B5_100mm/min Cuts E-W



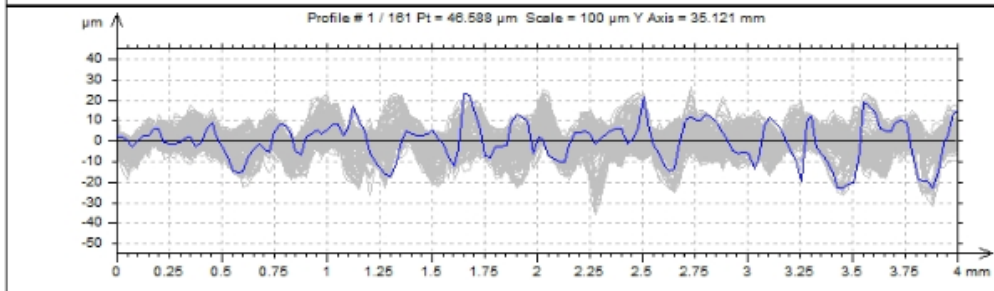
H-C1_20bar Cuts E-W



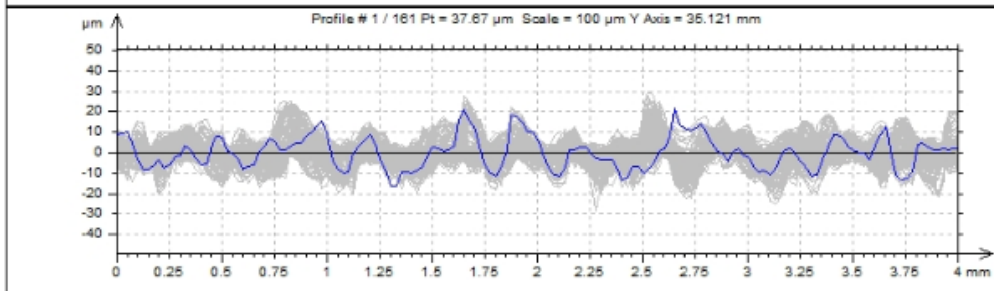
H-C2_17bar Cuts E-W



H-C3_14bar Cuts E-W



H-C4_11bar Cuts E-W



H-C5_8bar Cuts E-W

