

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kraus** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **494729**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Kvalita povrchu po obrábění

Název bakalářské práce anglicky:

Surface quality after machining

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky.
2. Nástroje a řezné podmínky.
3. Parametry řezného procesu a dosahovaná kvalita povrchů.
4. Zhodnocení a návrh technologických aplikací.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vítězslav Rázek, CSc. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

27.4.2023

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za cenné rady a připomínky, přístup při vedení mé bakalářské práce, ochotu a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Sommerovi za pomoc při řešení praktické části. V neposlední řadě Ing. Petru Mikešovi, PhD. za pomoc s měřením. Poděkování také patří Petru Krausovi a Evě Krausové za podporu během celého studia.

Anotace

Název práce: Kvalita povrchu po obrábění

Autor: Jiří Kraus

Druh práce: Bakalářská

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem parametrů řezného procesu na výslednou integritu povrchu. V teoretické části byly popsány vybrané dokončovací metody, typy zatížení materiálu při obrábění a atributy integrity povrchu.

V praktické části byla změřena drsnost povrchu obráběných ploch vzorků. Výsledné drsnosti byly na základě parametrů řezného procesu porovnány a výsledky vyhodnoceny.

Klíčová slova: integrita povrchu, dokončovací metody, zatížení materiálu, měření drsnosti

Annotation

Thesis title: Surface quality after machining

Author: Jiří Kraus

Kind of work: Bachelor

Supervisor: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Annotation:

This bachelor's thesis deals with the influence of cutting process parameters on the resulting surface integrity. Selected finishing methods, types of load during machining, and surface integrity attributes are described in the theoretical part.

Roughness of the machined surface of the samples was measured in the practical part. Resulting roughness was compared and evaluated based on the cutting process parameters.

Keywords: surface integrity, finishing methods, material load,
roughness measurement

Obsah

1. Dokončovací metody.....	11
1.1. Broušení.....	11
1.2. Honování	12
1.3. Lapování	14
1.4. Mikroobrábění.....	15
1.4.1. Mikro-soustružení	15
1.4.2. Mikro-frézování	16
1.4.3. Laserové mikroobrábění	17
1.4.4. Plazmové leptání	18
1.4.5. Ultrazvukové mikroobrábění.....	18
1.5. Leštění	19
1.5.1. Mechanické leštění.....	20
1.5.2. Chemické leštění	20
1.5.3. Elektrolytické leštění	20
1.5.4. Vibrační leštění.....	21
1.5.5. Ultrazvukové leštění.....	21
1.6. Tryskání	21
1.6.1. Balotinování.....	21
1.7. Superfinišování.....	22
2. Zatížení materiálu při obrábění.....	23
2.1. Mechanické zatížení	23
2.2. Tepelné zatížení.....	23
2.3. Chemické zatížení.....	23
2.4. Kombinované zatížení	24

3. Integrita povrchu	24
3.1. Metody měření a vyhodnocování integrity povrchu	25
3.2. Drsnost a vlnitost povrchu	25
3.3. Zbytková (reziduální) napětí.....	26
3.4. Tvrdost a mikrotvrdost.....	27
3.5. Vzhled.....	28
4. Experimentální měření.....	29
4.1. Použitá zařízení.....	29
4.1.1. CNC Okuma MU-400V II	29
4.1.2. Mahr MarSurf LD 120.....	30
4.2. Použité nástroje.....	31
4.2.1. NS TOOL SSPB220 D4	31
4.3. Průběh měření.....	32
4.4. Zkušební vzorky	34
4.4.1. Vzorek 1.....	35
4.4.2. Vzorek 2.....	36
4.4.3. Vzorek 3.....	37
4.4.4. Vzorek 4.....	38
4.5. Porovnání hodnot.....	40
4.5.1. Vzorek 1 – plocha 2 a průměr ploch 3 a 5.....	40
4.5.2. Vzorek 1 – plocha 2 a plocha 4.....	41
4.5.3. Vzorek 1 – plocha 1 a Vzorek 4 – plocha 1.....	42
4.5.4. Vzorek 1 – průměr ploch 3 a 5 a Vzorek 4 – plocha 1.....	43
4.5.5. Vzorek 1 – průměr ploch 3 a 5 a Vzorek 2 – průměr ploch 1 a 5.....	44
4.5.6. Vzorek 2 – plocha 1 a plocha 4.....	45
4.5.7. Vzorek 2 – plocha 1 a plocha 5.....	46

4.5.8. Vzorek 2 – plocha 2 a plocha 4.....	47
4.5.9. Vzorek 2 – plocha 4 a Vzorek 3 – plocha 4.....	48
4.5.10. Vzorek 2 – plocha 4 a Vzorek 3 – plocha 5.....	50
4.5.11. Vzorek 3 – plocha 2, plocha 3 a plocha 4.....	51
4.5.12. Vzorek 3 – plocha 1, plocha 3 a plocha 5.....	52
4.5.13. Vzorek 1 – průměr ploch 3 a 5 a Vzorek 3 – plocha 4.....	53
4.6. Shrnutí praktické části.....	54
5. Závěr.....	55
7. Seznam použité literatury.....	56
6. Seznam obrázků.....	60
7. Seznam tabulek.....	62

Úvod

Povrch lze definovat jako hranici mezi obrobkem a okolním prostředím. Obráběním se generuje finální geometrie součástí vlivem fyzikálních efektů. Tyto vlivy se dají popsat jako zatížení, které může být tepelné, mechanické chemické či kombinované. Povaha fyzikálních efektů během obrábění vede nevyhnutelně k poškození povrchu. Efekty působící na povrch materiálu způsobují změny topografie povrchové vrstvy, metalurgického stavu, mechanických vlastností a chemického stavu. Tyto změny, jejichž výsledkem jsou například drsnost a zvlnění povrchu, různé mikroefekty, mikrotvrdost, zbytkové napětí nebo reakční vrstvy a jejich vliv na kvalitu či funkčnost obrobku, se obecně uvažují a souhrnně označují výrazem integrita povrchu. Špatná integrita povrchu negativně ovlivňuje funkční atributy obrobku například odolnost proti korozi a opotřebení. Integrita povrchu je dána primárně technologií výroby součástí. Její výsledná kvalita je především výsledkem posledních operací obráběcího procesu. Tyto operace se označují jako dokončovací, případně výrazem dokončovací metody. [1][2][3]

1. Dokončovací metody

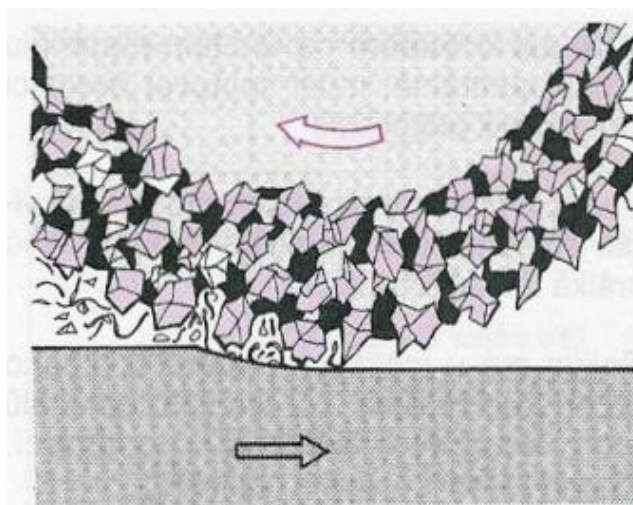
Se zvyšujícími se požadavky na kvalitu strojně vyráběných součástí, přestalo být možné dosáhnout požadované kvality klasickými metodami třískového obrábění. Proto musely vzniknout nové metody, které byly schopné dosáhnout vyšší přesnosti či lepší drsnosti obráběných ploch. [4]

Dokončovací metody jsou posledními operacemi, které jsou prováděny na strojírenských produktech během jejich výroby. Pomocí těchto procesů dosahujeme konečné přesnosti rozměrů, tvarů a polohy, drsnosti, fyzikálních i mechanických vlastností povrchové vrstvy a její kvality nebo upravujeme vzhled. V případě, že vyráběná součást splňuje všechny zadané požadavky a má dobrou integritu povrchu, není nutné dokončovací operace použít.

Každá z metod ovlivňuje více kvalitativních atributů výrobku, a ne ve všech případech kladně. Proto je nutné metody volit tak, aby sekundárně ovlivňovaly ty atributy, které nemají vliv funkčnost nebo volit vhodné kombinace metod. [5]

1.1. Broušení

Broušení je jednou z nejstarších způsobů úpravy materiálu, který byl člověkem používán. V současnosti je nejčastěji užívanou dokončovací operací, ale lze ji využívat i k hrubování. Z broušené součásti jsou odebírány velmi malé třísky pomocí brusného kotouče či pásu, jež je tvořen zrny brusiva s vysokou tvrdostí a pojivem. Zrna nejsou v nástrojích upořádána pravidelně, řezná geometrie tedy není definována a výsledný povrch je aperiodický.



Obrázek 1 - Princip broušení [5]

Broušením je možné obrábět téměř všechny druhy materiálů, včetně těch velmi tvrdých, které zároveň snesou vysoké teploty, jež během procesu vznikají. Teploty mohou přesáhnout až 1000 °C. K omezení teploty a s ní spojenými vlivy, jako je například teplotní roztažnost se mohou užít procesní kapaliny. Mimo chlazení kapalina odplavuje třísky a vylomené kusy brusných nástrojů, což zamezuje nepříznivým vlivům na výslednou integritu povrchu. [6]

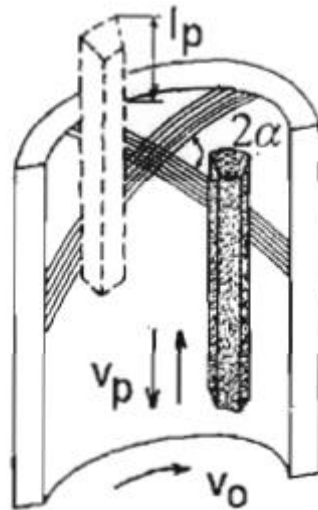
Brousit lze téměř všechny druhy plochy, díky velké tvarové variabilitě brusných nástrojů. Nejčastěji používaným nástrojem je celistvý kotouč. Dále se v praxi můžeme setkat s dalšími typy nástrojů: broušící segmenty, pásy, pilníky, válečky, obtahovací kameny. Ačkoli se s použitím různého nástroje proces broušení částečně mění, podstata zůstává stejná. Nástroj rotuje (nebo vykonává jiný typ pohybu) zatímco obrobek je upnut a pohybuje se s pracovním stolem.

Broušící nástroje jsou tuhá tělesa různých tvarů tvořené brusnými zrny, jež jsou spojena pojivem. Brusiva lze rozdělit dle původu na umělá a přírodní. Mezi přírodní se řadí vápenec, křemen či diamant a mezi umělé například karbid boru, křemíku nebo kubický nitrid boru. Používají se látky, které jsou především tvrdé, dále houževnaté, teplotně stabilní a ostrohranné.

Pojivo utváří tvar nástroje a spojuje jednotlivá zrna brusiva, zároveň zajišťuje, aby se otupená zrna oddělovala od kotouče a nahrazovala se novými. [6] Materiál pojiva se volí dle požadavků na tuhost nebo pružnost nástroje, lze ho rozdělit na organický a anorganický, organický dále rozdělujeme na pryžový a umělé pryskyřice. Anorganický se rozděluje na silikátový, magnezitový, kovový a keramický. [7]

1.2. Honování

Honování je obdobnou dokončovací metodou jako broušení, avšak rychlosti posuvů jsou menší a trajektorie pohybu nástroje a obrobku je odlišná. Zároveň brusivo je pevně vázané v brusných kamenech. Využívá se typicky k dokončování vnitřních i vnějších válcových ploch. Použití je možné i u velmi tvrdých materiálů jako jsou například slinuté karbidy a lze docílit velké tvarové i rozměrové přesnosti.



Obrázek 2- Trajektorie pohybu honovacích kamenů [6]

Honování nelze použít k hrubování a je nutné obrobek před touto dokončovací metodou vybrousit případně jemně vyvrtat. Přídavek na honování bývá od 0,01 do 0,03 mm. Existuje honování jednostupňové a vícestupňové. V případě vícestupňového se používá postupně více honovacích nástrojů, které mají postupně menší zrnitost, zatímco při jednostupňovém se používá nástroj pouze jeden.

Kameny jsou v těle nástroje připevněny pomocí kovových lišt. Nástroje v sobě mají mechanismus, kterým lze upravit poloha kamenů, a tím nastavit přesně požadovaný rozměr obráběné plochy. Kameny tvoří podobně jako brusné nástroje tvrdé brusivo a vazba. Vazba je typicky keramická nebo bakelitová, ale může být i kovová.

Použití kapalin je v případě honování nezbytné. Kapalina odplavuje odebraný materiál a chrání kameny od zanášení. Viskozita procesní kapaliny má vliv na výslednou integritu povrchu obrobku. Povrch má lepší vlastnosti, čím je kapalina viskóznější, avšak s rostoucí viskozitou klesá výkon.

Honovací nástroj je ve stroji upnut tak, aby nástroj případně obrobek zůstal pohyblivý v kolmé rovině na osu díry. Upíná se buď na pevně nebo pomocí kloubů, které zabraňují poškození jak nástroje, tak obrobku. Nástroj je k obrobku přitlačován nízkým tlakem mezi 0,2-1,5 MPa. Pohyb může vykonávat pouze nástroj nebo může být výslednou kombinací trajektorií pohybu nástroje a obrobku. Výsledné dráhy pohybů vytvářejí překrývající se šroubovice.

Honování se nejčastěji využívá k výrobě součástí v hydraulice, válců ve spalovacích motorech a vedení ventilů. Přesnosti dosažené honování se pohybuje mezi IT 4 a IT 5. V případě velmi jemného honování až IT 3 a Ra 0,025. [5]

1.3. Lapování

Jedná se o dokončovací metodu, kterou lze dosáhnout současně vysokých rozměrových i geometrických přesností a nízkých drsností povrchu. Charakter úběru materiálu nám rozděluje lapování na hrubovací a jemné. Lapování je možné použít pro dokončování vnějších i vnitřních ploch, rovinných a tvarových ploch případně závitů. Materiál je ubírán abrazivem, které se volně pohybuje v procesní kapalině nebo měkké pastě. Kapalina či pasta s brusivem se přivádí mezi pohybující se nástroj a obrobek. Nástroj, který je negativem dokončovaného profilu, převážně neodebírání materiál, na rozdíl od volného brusiva.

Hrubovací lapování probíhá s vysokou koncentrací abraziva v kapalině a dochází v odřezávání mikro nerovností, případně k jejich plastické deformaci. Při velmi jemném lapování je v kapalině nižší koncentrace abraziva a dochází k leštění. Tímto leštěním lze dosáhnout zrcadlově lesklého povrchu. Nástroje bývají z jemnozrnné perlitické litiny, mědi či olova. Pomocí kombinace různé viskozity pasty, koncentrace brusných zrn, volby nástroje, velikosti tlaku a rychlosti pohybu můžeme vytvořit velmi specifický poměr mezi hrubováním a leštěním. Díky tomu lze vyhovět velmi přeným požadavkům na integritu povrchu.

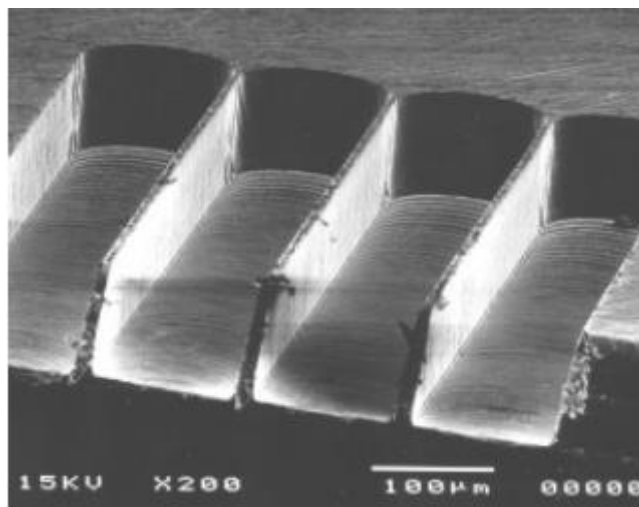
Druh brusiva se volí dle obráběného materiálu. Pro měkké i kalené oceli se používá často umělý korund, pro litiny polovodiče či sklo a keramiku karbid křemíku. Na obrábění nejtvrdších materiálu jako jsou slinuté karbidy a keramiky se používá karbid bóru, kubický nitrid bóru případně diamantový mikro prášek. Pro velmi jemné lapování je důležitý tvar brusiva a jeho homogenita.

Provozní kapalina či pasta může mimo přivádění brusiva napomáhat procesu lapování. Pasty, jež obsahují kyseliny, mohou porušovat svrchní vrstvy obrobku, což pomáhá obrušování. Mimo kyseliny obsahují petrolej, oleje nebo živočišné tuky.

Obrobek se nechává před lapováním s přídavkem mezi 0,03 až 0,005 mm. Lapovaný povrch dosahuje drsnosti až Ra 0,005 mm a přesnosti IT 1. [5]

1.4. Mikroobrábění

Mikroobrábění zahrnuje více typů utváření mikrostruktur s rozměry v řádech mikrometrů. Mikroobrábění je obecný pojem a může označovat i proces výroby struktur menších než jeden mikrometr, někdy označovaný jako nanoobrábění. Dělí se na obrábění objemové a povrchové. U objemového mikroobrábění dochází k odebrání materiálu konvenčními i nekonvenčními metodami, zatímco během povrchového mikroobrábění jsou tenké vrstvy materiálu nanášeny na obrobek a je využíváno především v elektronice. Vzhledem k velmi malým rozměrům je proces náročný jak z hlediska technologie, tak měření a vyžaduje specifické stroje i nástroje. [8][9][10][11]



Obrázek 3 - Detail plochy po mikroobrábění [12]

1.4.1. Mikro-soustružení

Z hlediska způsobu výroby součástí je proces v podstatě totožný jako „makro-soustružení“, jde tedy o obrábění rotačně symetrických ploch, avšak kvůli velmi malým rozměrům obrobku je nutné pracovat s fyzikálními vlivy, které při obrábění makrostruktur neovlivňují výslednou kvalitu či je lze zanedbat.

Důležitým vlivem je takzvaný velikostní efekt (anglicky size effect). Tento efekt zapříčiňuje nelineární nárůst energie vynaložené na odstranění stejného objemu materiálu a také ovlivňuje tvorbu třísky. Velikostní efekt souvisí s několika faktory, kterými jsou poloměr zaoblení ostří, struktura zrn materiálu obrobku a minimální hloubka řezu.

Minimální hloubka řezu určuje nejmenší možnou vrstvu, kterou je nutné odebrat, aby se tvořila kvalitní tříska. V případě, že není dodržena, dochází ke skluzu nástroje po obrobku, rýhování nebo k tvorbě částečné třísky. Tvorba částečné třísky nastává, když je

spodní část obráběné vrstvy elasticky deformována a svrchní část se odděluje ve formě neúplné třísky.

Minimální hloubka řezu úzce souvisí s poloměrem ostří v ortogonální rovině. Poměr mezi hloubkou a poloměrem musí být dostatečně velký, aby docházelo k tvorbě třísky. V případě, že je rádius ostří moc velký, dochází k deformaci materiálu vlivem vtlačování pod nástroj a řezný proces vůbec nezačne. Pokud je poloměr přibližně 3-krát větší než hloubka řezu, dochází k plastické deformaci a tvorbě částečné třísky. Pokud mají nástroje pro „makro soustružení“ dostatečně malý poloměr ostří je možné jejich použití k obrábění mikrostruktur.

V případě klasického soustružení je materiál považován za homogenní a izotropní. Vliv velikosti zrn je v tomto případě zanedbatelný. Toto však nelze tvrdit při mikroobrábění, neboť obrobená plocha vzniká téměř nezávisle v jednotlivých zrnech materiálu. Tímto jevem je negativně ovlivněna tvorba třísky, mechanismus odebrání vrstvy a také dochází průběžným změnám velikosti řezné síly. Kombinace těchto vlivů negativně ovlivňuje schopnost počítačově modelovat a simulovat obráběcí proces. Během přípravy CNC programu je nutné tyto vlivy zohledňovat nebo je během vlastního obrábění ovládat, aby výsledný obrobek odpovídal zadaným požadavkům.

Velikost řezné síly je dalším vlivem, který je nutné sledovat a přizpůsobit ve výrobě mikrostruktur. Malé rozměry obrobku způsobují pokles tuhosti. Pokud je řezná síla příliš velká obrobek se ohne či vychýlí a buď dochází k poklesu přesnosti, který může být při práci v takto malých rozměrech fatální nebo samotný řezný proces nezapočne.

K mikro-soustružení se používají nástroje, které principiálně fungují stejně jako ty, kterými se obrábí obrobky konvenčních velikostí, hlavním rozdílem je jejich rozměr, dále pak jejich tvar. Vyrábí se ze slinutých karbidů, diamantu či kubického nitridu boru. Diamantového nástroje jsou využívány k velmi přesnému obrábění. Mají vysokou tvrdost, ale především mají výrazně menší poloměr ostří.

Obrobená plocha touto metodou získává zrcadlově lesklý povrch. Touto metodou lze dosáhnout rozměrové přesnosti až 1 μm a hodnot Ra 20 nm. [9][13]

1.4.2. Mikro-frézování

Princip výroby součástí touto metodou je obdobný jako klasické frézování. Hlavní řezný pohyb vykonává nástroj, zatímco obrobek je upnutý a pohybuje se vůči nástroji. Stejně jako u mikro-soustružení vstupují kvůli velmi malým rozměrům do procesu jevy, které je

nutné zohledňovat, aby bylo dosaženo kvalitního obrobku. Jde o univerzální metodu výroby rovinných, rotačních i obecných ploch. Pokud nástroj dosahuje průměru maximálně 1 mm, lze technologii definovat jako mikro-frézování.

Se snižováním velikosti průměru nástroje za stejného počtu otáček vřetena za minutu klesá obvodová rychlost. Proto je nezbytné, aby stroje byly schopné dosáhnout vysokých otáček. Stroje určené pro mikro-frézování mají vřetena, která jsou schopná dosahovat až 200 000 otáček za minutu. Takto vysokých otáček lze dosáhnout díky elektromotorům integrovaným přímo uvnitř vřetene. Tato vřetena jsou zároveň uložena na vzduchových ložiscích, která jsou vhodná pro mikro-frézování, neboť při něm nepůsobí velké síly a nenastávají rázy.

Proces obrábění takto malých obrobků je velmi náchylný na vibrace, proto je nutné jejich vzniku zabránit. Stroj, na kterém bude obrábění probíhat, musí být tuhý a dobře seřízený, zároveň by měl být umístěný v místech, kde se nenacházejí jiné stroje, které by mohly vibrace způsobovat, jako jsou například buchary či lisy. Nevhodná jsou i místa poblíž vytížených silničních komunikací. Stejně jako u mikro-soustružení se může projevit velikostní efekt. Jeho vliv lze omezit správnou volbou nástroje a obráběcí strategie.

Frézy pro mikro-frézování jsou v podstatě zmenšenou verzí klasických monolitních fréz. Stejná je jak geometrie, tak materiály, ze kterých jsou vyráběny. Nejčastěji jde o rychlořeznou ocel, slinuté karbidy, diamant a kubický nitrid boru případně pak cermety či řezná keramika. Výroba „mikro-fréz“ spadá sama o sobě také do kategorie mikroobrábění. Nejjednodušší metodou výroby nástrojů je broušení. Jde o standardní proces s vyššími požadavky na přesnost. Používá se brusivo s jemnou zrnitostí a vysokou tvrdostí. Dalšími způsoby výroby je metodou koncentrovaného iontového svazku či elektroerozivním obráběním.

Výsledkem mikro-frézování je zrcadlově lesklý povrch, jehož se využívá v optice a laserové technice. Mimo jiné se používá na výrobu součástek v hodinářském průmyslu či medicíně. Hodnoty drsnosti se pohybují kolem 0,05 Ra a je možné dosáhnout rozměrové přesnosti v jednotkách μm . [8][13]

1.4.3. Laserové mikroobrábění

Je technologií výroby mikrostruktur, při kterém dochází k odběru materiálu pomocí proudu koherentního světla jedné vlnové délky, tedy laserových paprskem. Materiál je

vysokou rychlostí ohříván následně se odpaří. Výhodou je vysoká přesnost, nízké tepelné ovlivnění okolních částí obráběné plochy, možnost odebírat velmi malé objemy materiálu a absence nutnosti měnit nástroje. Zároveň proces může být ve srovnání s třískovým obráběním ekonomičtější. Díky pouze lokálnímu ohřevu, lze tuto metodu využít k obrobení materiálů s vysokou citlivostí na teplo. Využívá se v medicíně, optice, dentálním a leteckém průmyslu. Je možné dosahovat drsnosti 0,5 Ra. [12]

1.4.4. Plazmové leptání

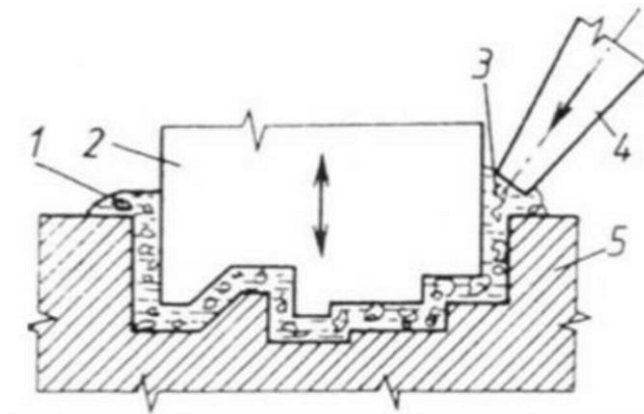
Je metodou výroby mikrostruktur pomocí leptacích procesů. Mimo plazmového leptání se využívá iontové či mokré chemické leptání. Leptání se rozděluje na suchá, jejímž příkladem je obrábění plazmou a mokrá, dle skupenství, ve které se nachází leptací medium. Suché leptání je nákladný, složitý a pomalý proces, avšak výhodami jsou vysoká možnost automatizace, nízké dopady na životní prostředí, vysoká dosahovaná přesnost a díky pomalé rychlosti procesu je možné ho komplexně řídit.

Leptání funguje na základě chemické reakce částic leptadla ve formě ionizovaného plynu a částicemi obráběného materiálu. Leptadlo při dodání dostatečné energie změní fázi a vznikne mračno iontů, elektronů a radikálů neboli plazma. Takto vzniklé radikály se na základě difúze přiblíží k leptané ploše, kde jsou absorbovány. Poté dojde k reakci mezi radikály a materiálem obrobku jež vede ke vzniku těkavé látky. Následuje desorpce produktů reakce jejich následná difúze do objemu plazmy. Leptaná plocha je definována pomocí takzvané masky. Nejdůležitější vlastnost masky je její odolnost vůči danému leptadlu. Masky pokrývá povrch plochy, který není odleptán. Pomocí této metody je možné dosáhnout drsnosti 0,8 Ra nevýhodou je tepelné ovlivnění materiálu. [14][15]

1.4.5. Ultrazvukové mikroobrábění

V případě ultrazvukového obrábění je materiál odebírán pohybem volného abraziva v kapalině mezi obrobkem a nástrojem. K úběru materiálu dochází také vlivem kavitační eroze. Nástroj je negativem obráběné plochy a jeho kmity dosahují standardně frekvencí od 18 do 24 kHz, ale je možné obrábět i s frekvencí kmitů 40 kHz. Nástroj je přitlačován kolmo k obráběnému povrchu, zároveň je mezi něj a obrobek kapalinou, nejčastěji vodou, petrolejem či olejem, přiváděno abrazivo. Mimo kmitání a přitlačování se nástroj může pohybovat po přímočaré trajektorii, avšak dochází k vyššímu opotřebování nástroje a efektivita

odebírání materiálu boky nástroje není tak vysoká jako pod čelem nástroje. Touto metodou lze dosáhnout rozměrové přesnosti až 0,02 mm drsnosti Ra 0,4 μm . [16][17]



Obrázek 4 - Princip metody pro obrábění ultrazvukem 1 – kapalina, 2 – nástroj, 3 – brousící zrna, 4 – přívod brousících zrn a kapaliny, 5 – obrobek [16]

Technologie	Princip	Min. Odběry (mm)	Drsnost povrchu	Výhody	Nevýhody
Třískové obrábění	Síla	0,02	0,05 Ra	Nejvyšší kvalita povrchu	Vznik třísek, odpadu, znečištění povrchu oleji, kvalitní upínací systémy
Elektroeroze	Elektrochemie	0,01	0,06 Ra	Nepřítomnost hrotů	Vznik kalů, drahé nástroje
Plasma	Odtavení	0,05	0,8 Ra	Není omezeno tvrdostí materiálu	Tepelné ovlivnění
Laser	Ablace	0,01	0,5 Ra	Ekonomický, neomezená výroba otvorů, malé tepelné ovlivnění	U tenkých dílů hrozí deformace teplem
Ultrazvuk	Eroze	0,01	0,4 Ra	Mnohostranné použití	Nákladný

Obrázek 5 - Tabulka srovnání jednotlivých druhů mikroobrábění [12]

1.5. Leštění

Leštění odstraňuje povrchové nedokonalosti z materiálu, aby došlo k vytvoření hladkého, lesklého povrchu. Úběry materiálu jsou v tomto případě velmi malé. Metoda se používá mimo průmyslových odvětví významně také v klenotnictví.

Existuje několik různých metod leštění, jmenovitě mechanické, chemické, elektrolytické, vibrační a ultrazvukové leštění. Každá z těchto metod má své výhody a nevýhody. Volba správné metody závisí na požadavcích, které má splňovat leštěná plocha.

[5]

1.5.1. Mechanické leštění

Mechanické leštění je široce používaná metoda pro konečnou úpravu materiálů. Tato metoda zahrnuje použití abrazivních materiálů, jako je brusný papír, leštící kotouče nebo pásy. Rychlost leštícího nástroje a tlak, kterým je přitlačován k obrobku, zásadně ovlivňují výslednou kvalitu povrchu.

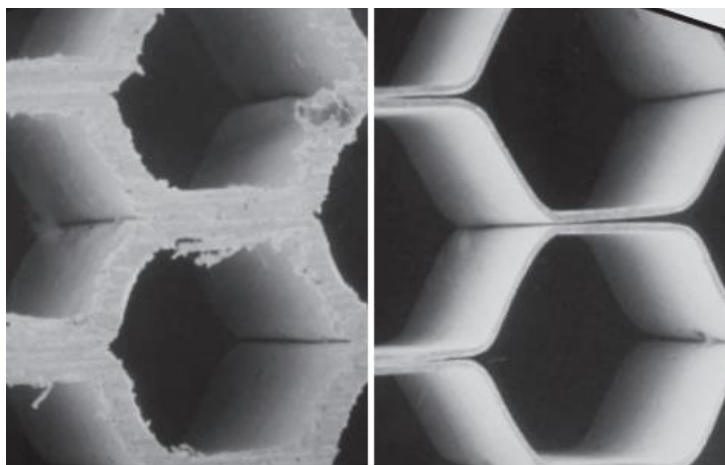
Mechanické leštění je relativně rychlý a přímočarý proces, ale nemusí být vhodný pro všechny typy materiálů.

1.5.2. Chemické leštění

Chemické leštění je běžně používaná metoda pro konečnou úpravu kovových materiálů. Při této metodě se ponoří obrobek do chemického roztoku obsahujícího oxidační činidlo a kyselinu. Kombinace oxidačního činidla a kyseliny způsobí selektivní rozpuštění povrchu kovu. Výsledkem je odstranění povrchových nedokonalostí a zanechání hladkého a lesklého povrchu.

1.5.3. Elektrolytické leštění

Elektrolytické leštění je přesnou dokončovací metodou kovových materiálů. Tato metoda zahrnuje ponoření materiálu do roztoku elektrolytu obsahujícího kyselinu nebo zásadu. Roztokem pak prochází elektrický proud, což způsobí rozpuštění kovových iontů a povrch materiálu se vyhladí a vyleští.



Obrázek 6 - Odstranění otřepů pomocí elektrolytického leštění [18]

1.5.4. Vibrační leštění

Vibrační leštění je vhodné pro dokončování malých dílů vyrobených z kovů či plastů. Leštěné díly se umístí do nádoby vibračního stroje, která obsahuje abrazivo. Abrazivem mohou být keramické třísky nebo kuličky z chromové oceli. Vibrace způsobují tření abrazivního média o povrch materiálu. Dochází k odstranění povrchových nedokonalosti a vyhlazení povrchu.

1.5.5. Ultrazvukové leštění

Ultrazvukové leštění se typicky používá pro dokončení lisovacích forem. Ultrazvukový generátor pomocí převodníku vytváří vibrace, které krouživě pohybují s nástrojem. Mezi nástrojem a obrobkem je brusivo, které odděluje malé třísky od obrobku. [18]

1.6. Tryskání

Tryskání je dokončovací metoda, při které může kromě odebírání materiálu docházet i ke změně vlastností povrchu vlivem plastické deformace. Abrazivní materiál je urychlen pomocí stlačeného vzduchu, kapaliny nebo metacích lopatek. Dochází k odstranění povrchových nečistot, vyhlazení hrubých povrchů a přípravě materiálů pro další zpracování nebo konečnou úpravu, jako je lakování, svařování či lepení

Tryskání povrchů lze použít na širokou škálu materiálů, včetně kovů, plastů, keramiky a kompozitů. Výhodou povrchového tryskání je schopnost odstranit povrchové nečistoty, jako je rez, okuje či starý nátěr a schopnost vytvořit jednotnou povrchovou texturu.

Tryskání má hodně atributů, které lze měnit, což zajišťuje širokou variabilitu užití. Mezi proměnné atributy patří: druh brusiva, jeho zrnitost, sklon a vzdálenost trysky od obrobku, počet průchodů nad jednou plochou, hustota překrytí trajektorií trysky a rychlost tryskaného materiálu či pohybu trysky vůči obrobku.

Jako abrazivo se používá nejčastěji křemičitý písek, dále pak nadrcené pecky či skořápky ořechů, broky různých kovů, struska, keramické a skleněné kuličky nebo piliny.

Tryskání má významné použití v leteckém průmyslu, kde se pomocí této metody uzavírají póry na povrchu součástí letadel. Přesnost je dána předchozími operacemi, ale tryskáním lze dosáhnout přibližně drsnosti Ra 0,1 μm . [5]

1.6.1. Balotínování

Balotínování je speciálním druhem tryskání, při kterém se jako abrazivo používají skleněné nebo keramické kuličky. Důležitou vlastností tohoto abraziva je, že se při určité síle

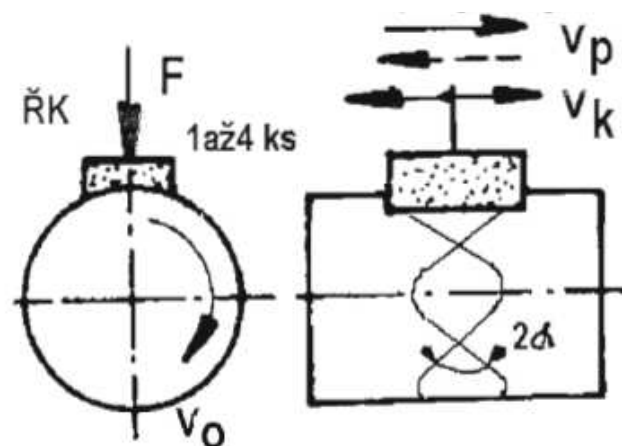
nárazu do obráběného materiálu roztříští a tím je omezena maximální energie, kterou předá obrobku. Roztříštěné zbytky kuliček se v separátoru oddělí a nejsou znovu v tomto procesu použity. Omezením předané energie se zabraňuje vnášení vad do materiálu. [19]

1.7. Superfinašování

Je metoda, kterou se dokončují rovinné i rotační vnitřní či vnější plochy. Spočívá v přehlazování již obrobeného povrchu typicky jedním až čtyřmi superfinašovacími kameny. Nástroje mají tvar negativu dokončované plochy. Při obrábění rotačních součástí vzniká kombinací rotačního pohybu obrobku a kmitání nástroje superpozice, která s posuvem vytváří řezný pohyb. Jako procesní kapalina se používá olej či petrolej, případně jejich kombinace. Vhodnou volbou viskozity procesní kapaliny, rychlosti pohybu a velikosti přtlaku je možné proces rozdělit na dvě části, hrubovací a leštící.

Při hrubovacím superfinašování se dráhy pohybu zrn překrývají pod úhlem 90° . Snadno se během něj odplavují třísky a lze dosáhnout vysoké jakosti. Vzniklý povrch je matný. Při leštění dochází k plastickým mikrodeformacím, které zahlazují povrch. Materiál téměř není odebírán při této fázi. S postupným snižováním drsnosti povrchu obrobku dojde k vytvoření filmu kapaliny mezi nástrojem a obráběným povrchem, což způsobí zastavení procesu superfinašování. Takto leštěná plocha je typická svým vysokým leskem.

Nástroje mají organickou, keramickou či bakelitovou vazbu, která obsahuje abrazivo o nízké zrnitosti. Brusivem může být elektrokorund, kubický nitrid bóru nebo diamantový prášek. [5]



2. Zatížení materiálu při obrábění

Během obráběcího procesu konvenčními i nekonvenčními technologiemi je obráběný materiál vystavován různým typům zatížení, což vede k jeho porušení a následnému odebrání určitého množství. Toto zatížení může být mechanické, tepelné, chemické nebo kombinované. Teoreticky každá metoda obrábění vyvoluje zatížení kombinované, ale při popisování se zaměřujeme na ta, která působí nezanedbatelně na materiál.

2.1. Mechanické zatížení

Do této skupiny patří konvenční technologie, jako je vrtání, soustružení, frézování, broušení nebo leštění, z nekonvenčních pak obrábění vodním paprskem. V tomto případě je uvažováno, že chlazením součástí či zvolením „jemných“ řezných podmínek je zajištěna nízká řezná teplota, aby nedocházelo k tepelnému zatížení. Obecně jde o procesy, kdy do kontaktu s obrobkem přichází nástroj či abrazivo. Kontakt způsobí deformace, které rozruší celistvost materiálu, jehož část je následně odebrána. Pokud je tento druh zatížení dominantní během obrábění, obrobek nese mechanicky vyvolané povrchové defekty. Například se jedná o rýhy nebo deformace zrn. Výsledné hloubky defektů se mohou pohybovat v milimetrech, pokud jde o hrubování anebo až mikrometrech jedná-li se o dokončování.

2.2. Tepelné zatížení

Laserové obrábění je typickým příkladem, kde převládá rozrušení materiálu teplem zatížením. Materiál je odtavován či odpařován. Vysoké teploty, na které se obrobek během procesu zahřívá, způsobují řadu sekundárních jevů. Mezi tyto jevy patří vznik tepelně ovlivněných zón, přetavených vrstev, mikroprasklin a mikrotrhlin. Dále dochází lokálnímu zakalení nebo k popouštění a následnému poklesu tvrdosti.

2.3. Chemické zatížení

Zahrnuje procesy, kde k odebrání materiálu dochází vlivem chemického rozpouštění, elektrolýzy či dalších elektrochemických procesů. Mezi takové technologie se řadí leptání nebo elektrochemické obrábění. Typů defektů vzniklých chemickým působením je velké množství a závisí na použitých chemikáliích a na materiálu součásti. Chemický účinek obvykle neproniká hluboko pod povrch obrobku, rozsah povrchového poškození se pohybuje v řádech mikrometrů případně nanometrů. Chemické zatížení může v některých případech

ovlivňovat vlastnosti materiálu selektivně, proto se často při přípravě vzorků pro měření používá chemická úprava.

2.4. Kombinované zatížení

Popisuje metody, při kterých je obrobek nezanedbatelně ovlivňován více druhy zatížení. Kombinovaný mechanismus zatížení se často objevuje při konvenčním obrábění, kde dochází v ovlivnění součásti jak mechanickými, tak tepelnými efekty. Dalším typem je metoda LAM (laser assisted machining), elektrojiskrové obrábění. U nekonvenčních technologií se nejčastěji vyskytuje kombinace chemického a tepelného působení. Typickým příkladem je suché plazmové leptání. Zároveň existují i procesy, jež působí na obrobek všemi druhy zatížení. [3]

3. Integrita povrchu

Obecně jde o souhrn vlastností povrchu vytvořených předcházejícími procesy. Jak již bylo zmíněno, zvolené technologie během procesu obrábění působí různými druhy zatížení na materiál a tím mění jeho tvar a zároveň způsobují defekty v povrchové vrstvě. V rámci zkoumání integrity povrchu se popisuje a vyhodnocuje, jakým způsobem tyto vady dávají materiálu vlastnosti, které ovlivňují životnost a chemickou či únavovou odolnost součástí. Mechanické vlastnosti jako je zbytkové napětí, mikrostruktura nebo mikromechanické chování, mají zásadní vliv na funkční výkonnost obrobku.

Vyšší požadavky na kvalitu součástí vedly akademickou i průmyslovou sféru ke snaze objasnit mechanismy vzniku povrchových defektů, jejich vliv na výslednou jakost obrobků a k vývoji postupů, které dokáží tvorbě defektů předejít. Výzkum, mimo popsání řady aspektů integrity povrchu, přinesl využití již existujících metod zkoumání materiálu nebo vznik nových experimentálních metod, jež se využívají k měření a vyhodnocování defektů a jejich dopadu na kvalitu součástí. Jako příklad můžeme uvést Ramanovu spektroskopii, fototermální a akustickou mikroskopii, rentgenovou difrakci či velocimetrii obrazu částic.

Velikost a rozsah povrchových vad úzce souvisí s podmínkami, při kterých se obrábí. U konvenčních technologií jde obecně o parametry rezného procesu, opotřebení nástroje či volbu procesní kapaliny. Nízké rychlosti posuvu a malé hloubky řezu, které lze označit jako „jemnější“ rezné podmínky, mají pozitivní vliv na integritu povrchu, avšak mají negativní dopad na výši nákladů na obrábění, produktivitu a s ní spojenou rychlost úběru materiálu. U nekonvenčních technologií můžeme podobného efektu dosáhnout například snížením

teploty, na kterou se obrobek zahřeje, avšak to s sebou stále přináší negativní dopad na produktivitu. [1][2][3]

3.1. Metody měření a vyhodnocování integrity povrchu

K měření jsou využívány jak destruktivní i nedestruktivní metody. Významně je zastoupena tvorba metalografického výbrusu a následná charakterizace jeho mikrostruktury různými mikroskopickými analýzami. Výbrus je připravován tak, že je ze zkoumaného obrobku oddělena část, metodou, která co nejméně ovlivní vnitřní strukturu a následně je vzniklá plocha další šetrnou metodou vyleštěna. Díky tomu je možné pomocí mikroskopie zhodnotit morfologii vnitřních struktur materiálu. Další typ analýzy spočívá v měření tvrdosti a mikrotvrdosti. Používají se standardní metody zkoušek dle Brinela, Vickerse nebo nanoindentace. Pro měření plasticity existuje metoda stlačování mikrosloupků (micropillar compression test).

Mezi nedestruktivní zkoušky lze zařadit neutronovou a rentgenovou difrakci či metodu Barkhausenova šumu. Z hlediska chemické analýzy integrity povrchu se zkoumá chemie povrchu, chemické vazby v obrobené vrstvě či její elementární složení. K tomu se využívají různé druhy spektroskopie, elektronová mikrosondová analýza (EPMA) nebo rastrovací elektronová mikroskopie se zpětným rozptylem. [2][3]

3.2. Drsnost a vlnitost povrchu

Souhrnně je drsnost a vlnitost označována jako struktura povrchu. Jedná se o část geometrických úchylek skutečného profilu. Dle vzdálenosti jednotlivých sousedících úchylek a jejich velikosti je rozlišujeme na mikronerovnosti (drsnost) a makronerovnosti (vlnitost)

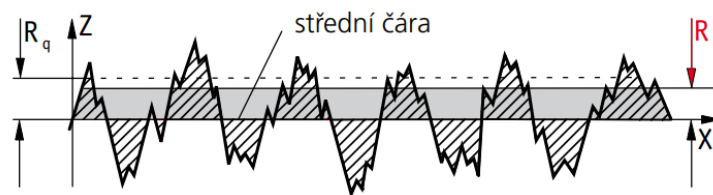
Na strukturu povrchu mají vliv všechna zatížení. Tepelné zatížení primárně způsobuje zvlnění povrchu a mechanické má nejvýraznější vliv na drsnost. Drsnost po obrábění lze použít jako metriku pro popis kvality, kterou je možné danou obráběcí metodou dosáhnout.

Tvarové defekty mohou negativně ovlivňovat funkčnost součásti v sestavě i funkčnost sestavy jako takové. Dále zhoršují korozní a únavovou odolnost, ale na drsnějším povrchu lépe ulpívají nátěrové hmoty či lepidla.

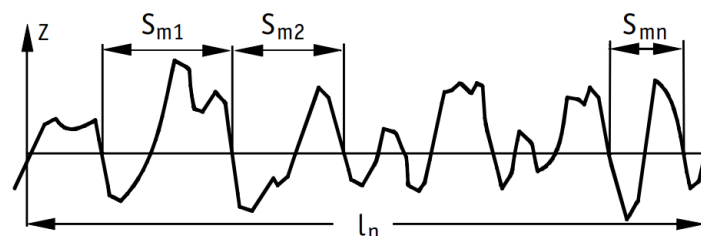
Struktura povrchu je popisována na profilech, které mají odfiltrované některé její složky. Filtr rozděluje profil na krátkovlnné a dlouhovlnné složky. Rozeznávají se tři typy filtru: λ_s , λ_c , a λ_f . Filtr λ_s definuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami povrchových vln, λ_c definuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti a λ_f definuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami povrchových vln. Dle použití filtrů rozlišujeme tři typy profilu.

Základní profil vzniká potlačením krátkovlnných složek filtrem λ_s , od kterého se odvozují další dva. Profil drsnosti vzniká ze základního, kdy jsou dlouhovlnné složky potlačené filtrem λ_c a nejkratší složky potlačené filtrem λ_s . Profil vlnitosti vznikne potlačením dlouhovlnné složky filtrem λ_f a krátkovlnné složky filtrem λ_c ze základního profilu. Dále se při zkoumání struktury povrchu definuje střední čára, což je čára, jež protíná střed výstupků a prohlubní tak, že součet obsahů ploch profilu nad čarou je roven součtu obsahů ploch pod čarou.

Drsnost je vyhodnocována pomocí hodnot parametrů profilu nerovnosti. Nejčastěji užívaný je amplitudový parametr, který se značí R_a . Parametr poskytuje informaci o velikosti vrcholů a prohlubní. Další používaný parametr se značí R_{sm} . Jedná se o frekvenční parametr, jež vyjadřuje průměrnou šířku prvků profilu, avšak je možné ho použít v případě, že se jedná o periodický profil. Kombinace více parametrů utváří komplexní soubor informací o struktuře povrchu. [20][21][22]



Obrázek 8 - Profil drsnosti R_a [25]



Obrázek 9 - Profil drsnosti R_{sm} [25]

3.3. Zbytková (reziduální) napětí

Zbytková napětí jsou mechanická napětí uvnitř a na povrchu materiálu, která existují bez působení vnějších sil a momentů. Panuje shoda, že neexistují prakticky žádné součásti technického významu bez těchto napětí. Pokud je oblast materiálu nehomogenně plasticky nebo elasticky deformována, vždy se objeví reziduální napětí. Vznikají účinkem všech druhů zatížení, primárně však tepleným a mechanickým. Jsou jednou z nevýznamnějších vlastností, které jsou při popisování integrity povrchu sledovány. Dělíme je do tří druhů podle toho, jak jsou homogenní ve velikosti a směru. Jsou označovány římskými číslicemi I, II a III.

Zbytková napětí I. druhu jsou téměř homogenní ve velkých oblastech, které obsahují mnoho zrn materiálu a silové účinky jsou v rovnováze ve větším objemu materiálu. Pokud je narušena rovnováha sil v oblasti napětí, změní se vždy v makroskopickém měřítku rozměry materiálu, na který působí. Jsou nejčastěji se vyskytujícím typem reziduálních napětí. Každé operace, které vyvolávají elastickou nebo plastickou deformaci vytváří první typ zbytkového napětí.

Zbytková napětí II. druhu jsou téměř homogenní v mikroskopické oblasti jednoho či několika zrn materiálu. Ve stejné oblasti jsou také v rovnováze jejich silové účinky. Porušení této rovnováhy nemusí vést makroskopickým změnám rozměrů materiálu. Stává se velmi vzácně, aby veškeré reziduální napětí v materiálu byly druhého typu. Objevují se často vlivem operací, které vyvolávají tepelné zatížení.

Zbytková napětí III. druhu jsou nehomogenní a jejich silové účinky dosahují rovnováhy v rámci oblasti jednoho či zrna či menší. Při narušení rovnováhy nedochází k žádným makroskopickým změnám. Změny rozmístění dislokací v materiálu vedou ke vzniku reziduálních napětí třetího typu. V určitém bodě je vždy napětí superpozicí všech tří druhů.

Efekty reziduálních napětí na obrobek jsou kladné i záporné, závisí na materiálu a na tom, zdali jsou napětí tahová či tlaková. Tahová mají negativní dopady, které mohou být fatální jako je roztržení či zkroucení součásti, dále pak podporují vznik prasklin, jež mohou vést k lomu. Tlaková napětí například uzavírají póry, což má pozitivní vliv na únavovou odolnost. Obecně lze prohlásit, že při narušení silové rovnováhy se mění tvar obrobku. Výsledná podoba napětí úzce souvisí se zvolenými podmínkami obrábění, bez ohledu na to, zdali se jedná o konvenční či nekonvenční technologii. Vliv zbytkových napětí na obrobek je možné snížit vhodným tepelným zpracováním. [23][24][25]

3.4. Tvrdost a mikrotvrdost

Tvrdost je definována jako schopnost materiálu odolávat vnikání cizích těles. Měření tvrdosti je díky své rychlosti, jednoduchosti a nízké ceně velmi často využíváno v technické praxi k hodnocení kvality integrity povrchu součástek. Výslednou tvrdost ovlivňují primárně mechanické a tepelné zatížení, naopak chemické zatížení nemusí tvrdost ovlivnit vůbec.

Měření tvrdosti se dělí dle metody na vrypové, vnikací, odrazové či kyvadlové, dle rychlosti zatěžující síly na dynamické nebo statické a dle zatěžující síly, která se standardně

pohybuje v rozmezí 0,1 mN až 30 kN. Statické zkoušky je dále možné rozdělit podle toho, zda měříme makrotvrdot, mikrotvrdot či nanotvrdot. Makrotvrdot se měří, pokud je zatěžovací síla vyšší než 2 N. Mikrotvrdot je měřena v případě, že maximální hloubka vtisku přesahuje 200 nm a síla působící na indentor nepřesahuje 2 N. Měření nanotvrdoti je definováno maximální hloubkou vtisku, která nepřesahuje 200 nm.

Nejčastějšími metodami měření jsou statické zkoušky tvrdosti dle Brinella, Vickerse a Rockwella. Všechny tři zkoušky spočívají ve vnikání indentoru do testované materiálu a následné vyhodnocení na základě velikosti vtisku zanechaného v materiálu. Každá metoda používá indentor jiného tvaru a materiálu, k vyhodnocení používá jiné vztahy a vyjadřuje se jiných jednotkách. Tyto zkoušky jsou destruktivní a ve výrobě není použití těchto metod možné, využívají se tedy metody nedestruktivní. K určení mikrotvrdoti a nanotvrdoti jsou statické metody obdobné, ale jsou přizpůsobeny menším rozměrům. Například snížením zatěžující síly nebo zmenšením indentorů. Ke zjištění rozměrů vtisku se využívají mikroskopy. [26][27][28]

3.5. Vzhled

Vzhled ovlivňuje, jakým způsobem člověk vnímá, či optické zařízení registruje, povrch obrobku. Kromě zlepšení estetického hlediska, může přinášet i technicky využitelné vlastnosti. Například matný povrch součástí s plochami konkávních tvarů zabraňuje koncentrování světla do jednoho bodu. Naopak lesklé povrchy se využívají v laserové a vesmírné technice nebo například při optickém počítání otáček. Barva povrchu může napomáhat při zhoršených zorných podmínkách, případně jako indikátor typu povrchové úpravy obrobku nebo je pouze designovou volbou.

Existuje více kvalitativních a kvantitativních atributů vzhledu, které lze posuzovat, proto je nemožné obecně rozhodnout, do jaké míry různé typy zatížení vzhled ovlivňují. Jedním z kvantitativních atributů je lesk, tedy schopnost materiálu odrážet světlo. Je měřen pomocí leskoměru. Výsledek je interpretován pomocí jednotek lesku (gloss units), standardně se jejich hodnota pohybuje v intervalu 0-100, kdy hodnota 0 znamená „perfektně“ matný povrch a hodnota 100 „perfektní“ zrcadlo. Existuje více systémů, pomocí kterých se kvantifikuje lesk. [29][30][31]

4. Experimentální měření

Cílem praktické části bakalářské práce bylo porovnat vliv použití různých řezných podmínek na výsledný profil drsnosti R_a obráběných ploch vzorků z maraging oceli.

Obráběná plocha vzorku byla rozdělena na pět menších ploch. Parametry řezného procesu byly pro každou plochu mírně odlišné. Sledovány byly následující parametry: hloubka řezu a_p , vzdálenost mezi drahami nástroje (řádkování) a_e , posuv f a obráběcí strategie z hlediska směru posuvu a tepelné zpracování. Dále bylo sledováno, zdali proběhlo hrubování či byla plocha obrobena rovnou na čisto.

4.1. Použitá zařízení

4.1.1. CNC Okuma MU-400V II

Vzorky byly obrobeny na univerzálním pětiosém frézovacím centru od firmy Okuma. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce níže.



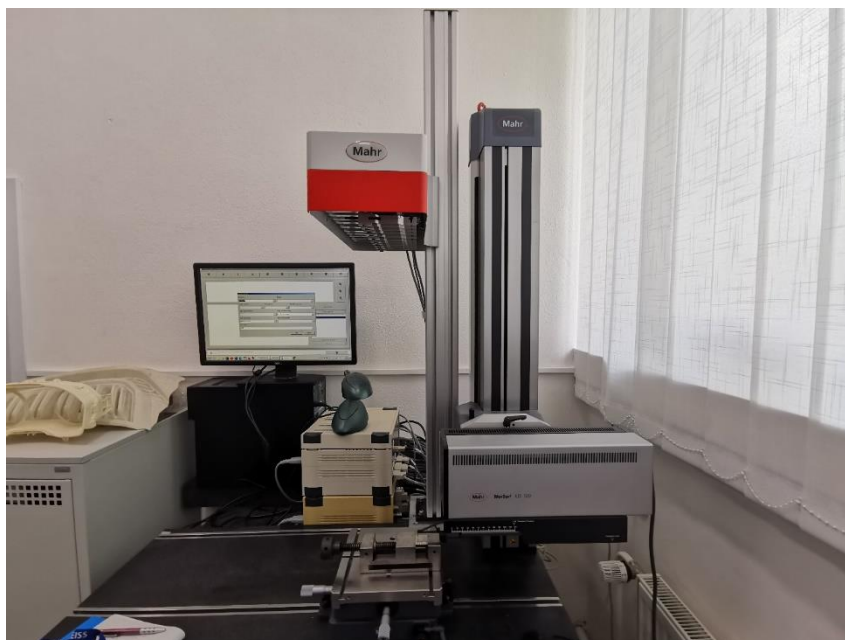
Obrázek 10 – CNC Okuma MU-400V II

Tabulka 1 - Technické parametry CNC Okuma MU-400V II [32]

Technický údaj	Hodnota
Průměr upínací plochy	400 mm
Max. rozměry obrobku	Ø 600 x H 400 mm
Max. otáčky vřetene	35 000 ot/min
Rozsah pojezdů osa X	762 mm
Rozsah pojezdů osa Y	460 mm
Rozsah pojezdů osa Z	460 mm
Rozsah pojezdů osa A	20 až -110 °
Rozsah pojezdů osa C	360 °

4.1.2. Mahr MarSurf LD 120

Profily drsnosti byly měřeny pomocí měřící jednotky MarSurf LD 120 od firmy Mahr.

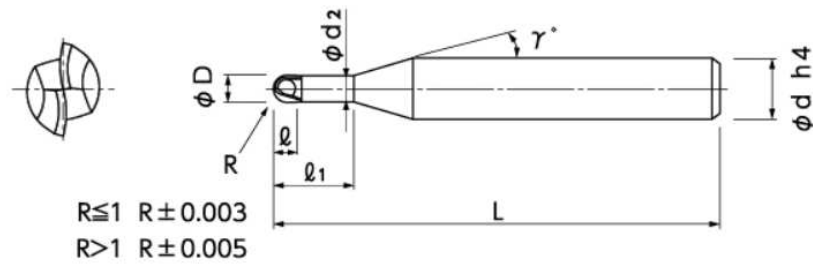


Obrázek 11 - Drnosměr s měřící jednotkou Mahr MarSurf LD 120

4.2. Použité nástroje

4.2.1. NS TOOL SSPB220 D4

K obrábění byl použit jeden nástroj, a to kulová fréza o průměru 4 mm od firmy NS TOOL s katalogovým číslem 01-00505-02008. V následující tabulce jsou její parametry.



Obrázek 12 - Schéma frézy [33]



Obrázek 13 - Fréza NS TOOL SSPB220 D4

Tabulka 2 - Parametry frézy


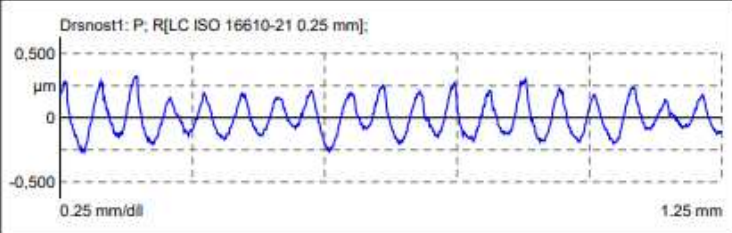
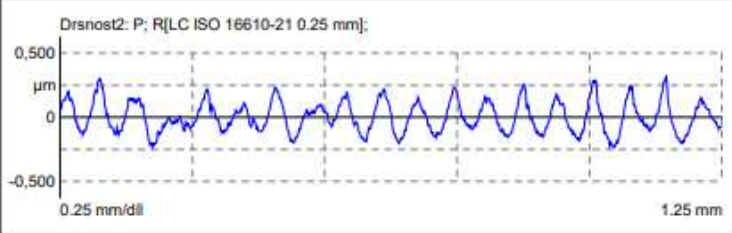
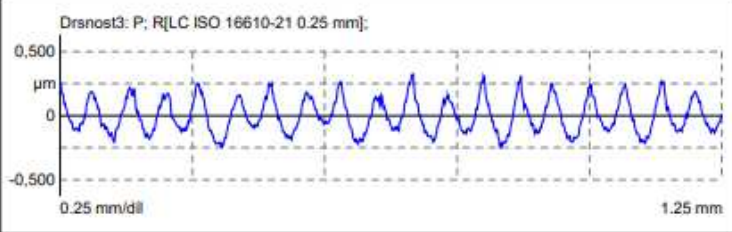
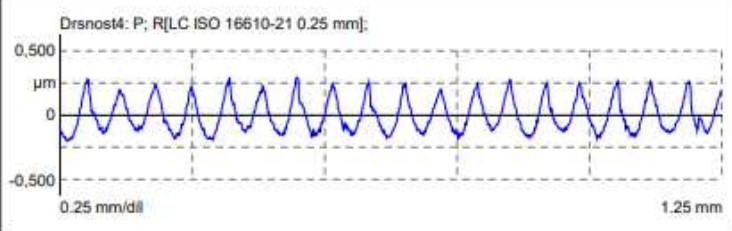
Označení veličiny	Hodnota v mm
D	4
R	2
l	2,4
l ₁	8
L	50
d ₂	3,8
d	6

4.3. Průběh měření

V rámci vyhodnocování byl změřen a vyhodnocen profil drsnosti Ra obrobených ploch vzorků. Každá plocha byla měřena vícekrát pokaždé na jiném místě, konkrétně 4-krát ve směru kolmo na směr obrábění a 3-krát kontrolně rovnoběžně se směrem obrábění. Z naměřených hodnot jsem vypočítal aritmetický průměr a stanovil hodnotu Ra dané plochy. Před měřením bylo nutné nastavit mezní vlnovou délku (cutoff) počet měřených délek a velikost základní délky. První měření plochy není zaznamenáno v protokolu, neboť sloužilo jako k reference pro nastavení mezní vlnové délky. Měření probíhalo dle normy ČSN EN ISO 3274.

VOLBA MEZNÍ VLNOVÉ DÉLKY ISO 4288, ISO 3274				
Periodické profily	Aperiodické profily		Mezní vlnová délka (Cutoff)	Jednotlivá / celková měřicí dráha
Rsm (mm)	Rz (μm)	Ra (μm)	λc (mm)	Lr/Ln (mm)
> 0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02	0,08	0,08 / 0,4
> 0,04 do 0,13	> 0,1 do 0,5	> 0,02 do 0,1	0,25	0,25 / 1,25
> 0,13 do 0,4	> 0,5 do 10	> 0,1 do 2	0,8	0,8 / 4
> 0,4 do 1,3	> 10 do 50	> 2 do 10	2,5	2,5 / 12,5
> 1,3 do 4	> 50 do 200	> 10 do 80	8	8 / 40

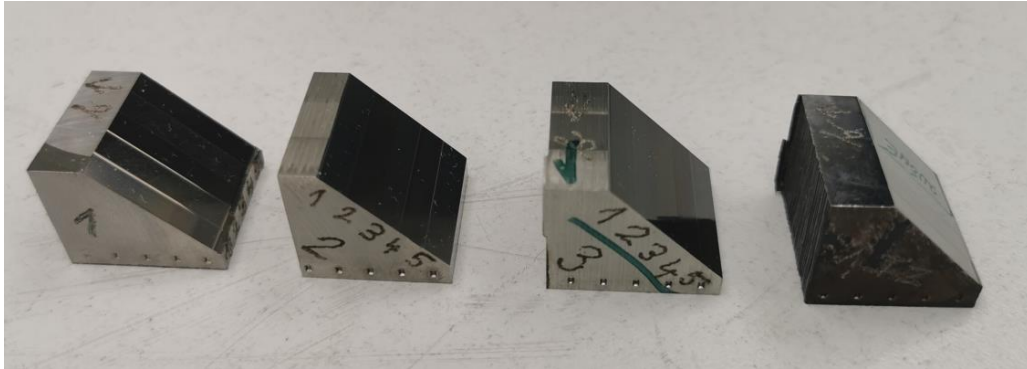
Obrázek 14 - Tabulka pro volbu mezní vlnové délky [25]

	MarWin 10.00-21 SP 3	Xone_1 Úloha: "Drsnost"	28.6.2023 1 17:36:54 Kontrolor: Kraus Jiří Podpis:								
	Díl: _____ Číslo výkresu: _____ Krok obrábění: _____		FS ČVUT v Praze								
MarSurf LD 120 Komentář: 214k											
Měřicí přístroj: MarTalk Posuvová jednotka: DriveUnit.LD 120 Snímač: LD A 14-10-2 1197		Lt: 1.50 mm Ls: 2.50 µm VB: +/-6154.6 µm Vt: 0.20 mm/s Body: 2991									
		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,112 µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0,491 µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>0,590 µm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>66,647 µm</td></tr> </table>		Ra	0,112 µm	Rz	0,491 µm	Rmax	0,590 µm	R Sm	66,647 µm
Ra	0,112 µm										
Rz	0,491 µm										
Rmax	0,590 µm										
R Sm	66,647 µm										
		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,100 µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0,478 µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>0,553 µm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>71,156 µm</td></tr> </table>		Ra	0,100 µm	Rz	0,478 µm	Rmax	0,553 µm	R Sm	71,156 µm
Ra	0,100 µm										
Rz	0,478 µm										
Rmax	0,553 µm										
R Sm	71,156 µm										
		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,111 µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0,510 µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>0,552 µm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>66,824 µm</td></tr> </table>		Ra	0,111 µm	Rz	0,510 µm	Rmax	0,552 µm	R Sm	66,824 µm
Ra	0,111 µm										
Rz	0,510 µm										
Rmax	0,552 µm										
R Sm	66,824 µm										
		<table border="1"> <tr><td>Ra</td><td>0,110 µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0,461 µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>0,490 µm</td></tr> <tr><td>R Sm</td><td>66,528 µm</td></tr> </table>		Ra	0,110 µm	Rz	0,461 µm	Rmax	0,490 µm	R Sm	66,528 µm
Ra	0,110 µm										
Rz	0,461 µm										
Rmax	0,490 µm										
R Sm	66,528 µm										

Obrázek 15 - Ukázka listu z protokolu měření drsnosti

4.4. Zkušební vzorky

Zkušební vzorky byly obrobeny z maraging oceli Böhler W720 VMR. Výraz „maraging“ vznikl spojením anglických slov „martensite“ a „ageing“. Jedná se vysoce pevné, vysoce legované, martenziticky vytvrditelné oceli s nízkým obsahem uhlíku typicky do 0,03% hmotnosti. Obecně disponují velmi dobrými vlastnostmi. Například jsou dobře svařitelné, korozivzdorné, mají vysokou tvrdost, pevnost, tažnost a nízký koeficient teplotní roztažnosti.



Obrázek 16 - Zkušební vzorky

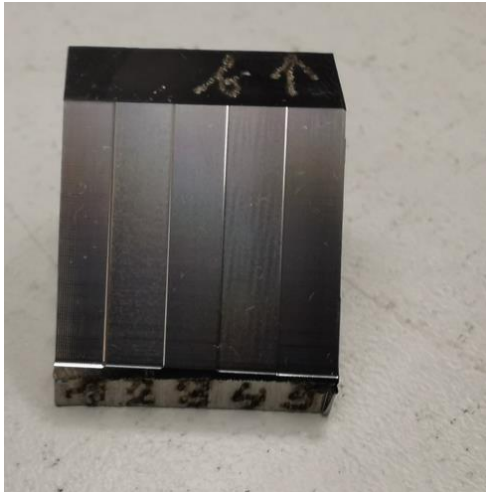
Testované vzorky byly celkem čtyři. Tři nebyly tepelně zpracovány a jeden prošel rozpouštěcím žíháním a následným precipitačním vytvrzováním. Některé plochy byly obráběné rovnou na čisto, jiné byly před tím hrubovány. Pokud byly vzorky hrubovány hodnoty řezných podmínek budou v následujících tabulkách uvedeny v horním řádku nad hodnotou obrábění na čisto. V případě prvního a tepelně zpracovaného vzorku se fréza pohybovala ve dvou osách ve směru sklonu plochy. V případě druhého a třetího vzorku se fréza pohybovala v jedné ose rovnoběžně s horizontální rovinou. [34]

4.4.1. Vzorek 1

Řezné podmínky, při kterých byl vzorek obráběn, jsou v následující tabulce. Fréza se pohybovala ve dvou osách ve směru sklonu plochy. Číselné označení ploch a směr posuvu je vidět na následujícím snímku vzorku.

Tabulka 3 - Parametry vzorku 1

Vzorek 1	Tepelné zpracování		NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]
Plocha 1	0,1	0,18	2000
Plocha 2	0,05	0,08	1000
Plocha 3	0,02	0,02	1000
Plocha 4	0,05	0,08	800
Plocha 5	(hrubování) 0,05	(hrubování) 0,08	1000
	0,02	0,02	



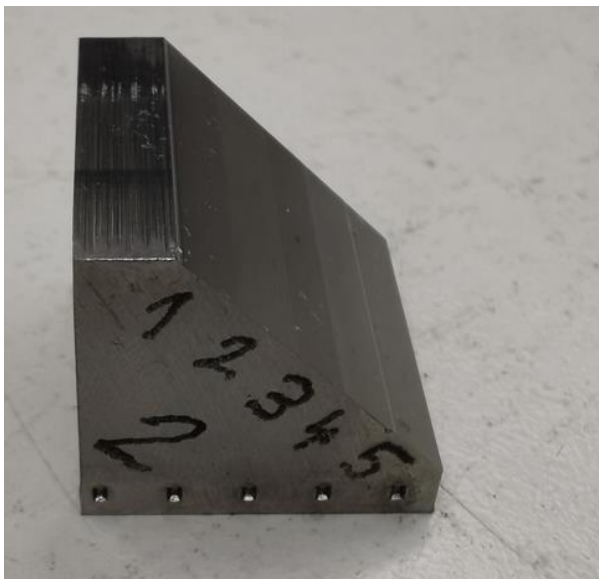
Obrázek 17 - Vzorek 1

4.4.2. Vzorek 2

Řezné podmínky, při kterých byl vzorek obráběn, jsou v následující tabulce. Fréza se pohybovala v jedné ose rovnoběžně s horizontální rovinou. Číselné označení ploch je vidět na následujícím snímku vzorku.

Tabulka 4 - Parametry vzorku 2

Vzorek 2	Tepelné zpracování		NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]
Plocha 1	0,02	0,02	1000
Plocha 2	0,02	0,02	1000
	0,005	0,005	
Plocha 3	0,02	0,02	1000
	0,005	0,02	
Plocha 4	0,02	0,02	1000
	0,02	0,005	
Plocha 5	0,05	0,08	1000
	0,02	0,02	



Obrázek 18 - Vzorek 2

4.4.3. Vzorek 3

Řezné podmínky, při kterých byl vzorek obráběn, jsou v následující tabulce. Fréza se pohybovala v jedné ose rovnoběžně s horizontální rovinou. Číselné označení ploch je vidět na následujícím snímku vzorku.

Tabulka 5 - Parametry vzorku 3

Vzorek 3	Tepelné zpracování		NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]
Plocha 1	0,02	0,02	500
	0,003	0,005	
Plocha 2	0,02	0,02	250
	0,005	0,005	
Plocha 3	0,02	0,02	500
	0,005	0,005	
Plocha 4	0,02	0,02	1000
	0,005	0,005	
Plocha 5	0,02	0,02	500
	0,02	0,005	



Obrázek 19 - Vzorek 3

4.4.4. Vzorek 4

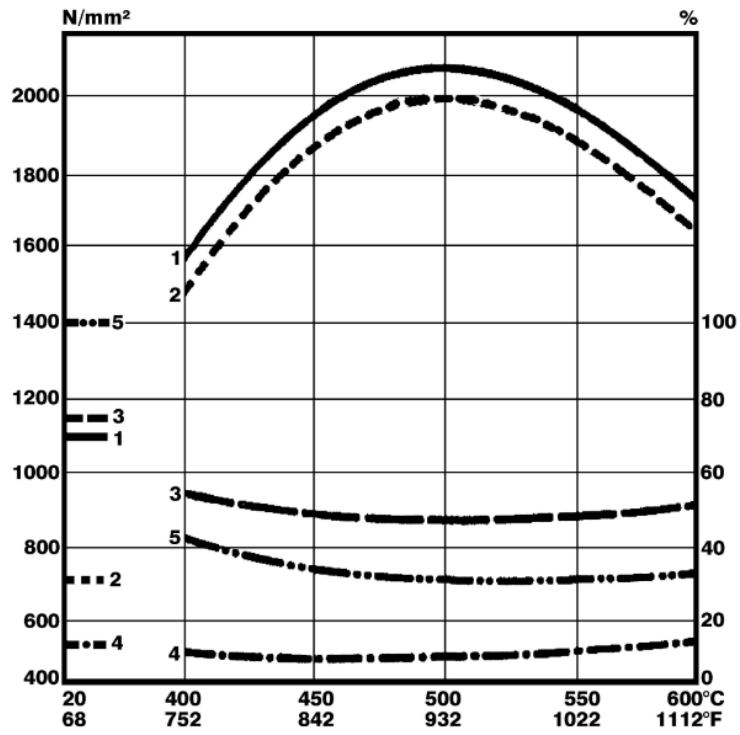
Řezné podmínky, při kterých byl vzorek obráběn, jsou v následující tabulce. Fréza se pohybovala ve dvou osách ve směru sklonu plochy. Číselné označení ploch a směr posuvu je hůře vidět, ale je stejné jako u prvního vzorku. Tento vzorek byl tepelně zpracován. Plocha 4 a 5 byla po obrobení navíc vyleštěna ručně leštící pastou. Drsnosti těchto ploch jsem nebyl schopen změřit.

Tabulka 6 - Parametry vzorku 4

Vzorek 4	Tepelné zpracování		ANO
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]
Plocha 1	0,1	0,18	2000
Plocha 2	0,05	0,08	1000
Plocha 3	0,02	0,02	1000



Obrázek 20 - Vzorek 4



Obrázek 21 - Graf stárnutí (doba udržování: 3 hodiny) [35]

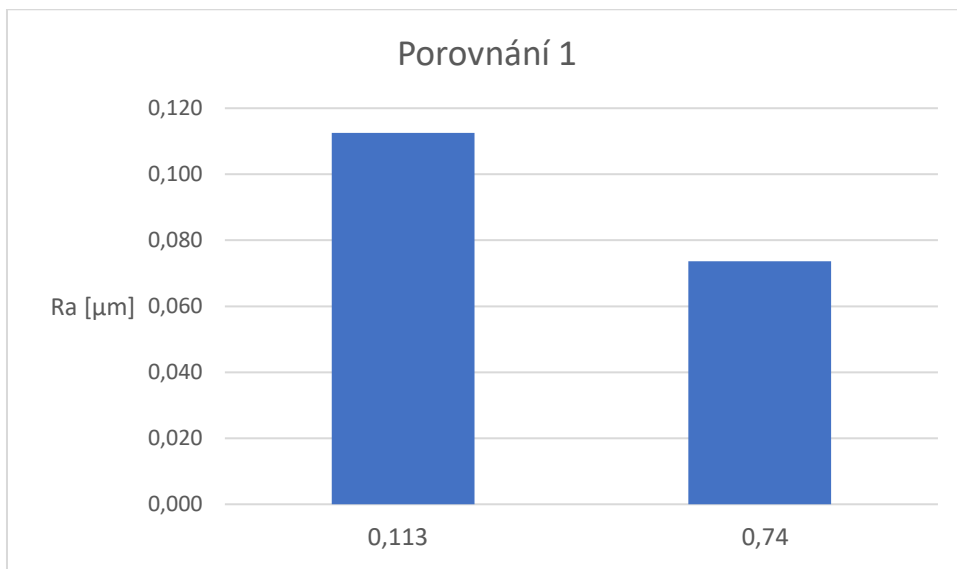
4.5. Porovnání hodnot

Hodnoty profilu drsnosti Ra byly porovnávány u těch plochy, které měly alespoň jeden stejný parametr řezného procesu. Výsledky měření byly zaneseny do sloupcových grafů. V levém sloupci je vždy reprezentována plocha, jež je uvedena v nadpisu jako první.

4.5.1. Vzorek 1 – plocha 2 a průměr ploch 3 a 5

Tabulka 7 - Parametry ploch porovnání 1

Vzorek 1	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 2	0,05	0,08	1000	0,113
Plocha 3	0,02	0,02	1000	0,074
Plocha 5	(hrubování) 0,05	(hrubování) 0,08	1000	0,074
	0,02	0,02		



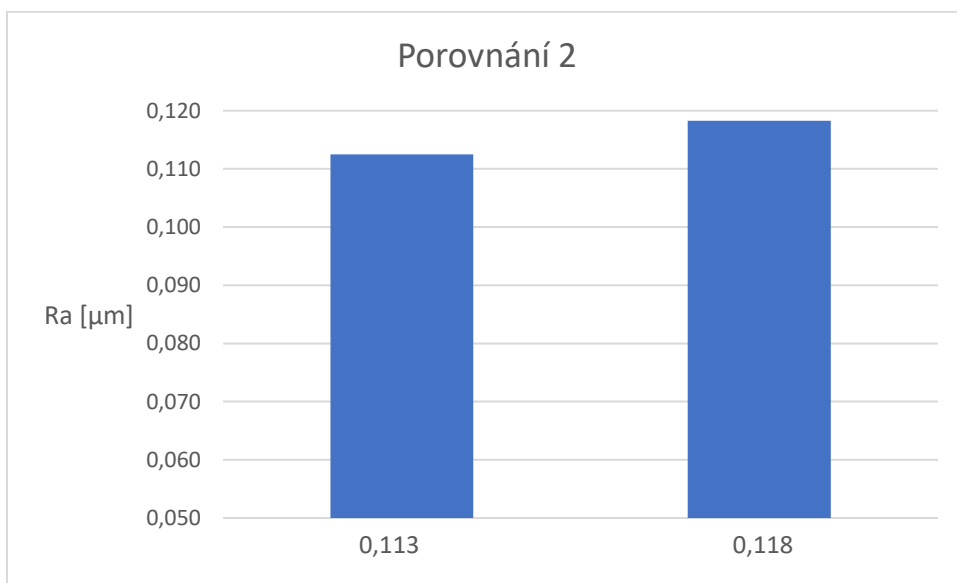
Obrázek 22 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 1

Nižší hloubka řezu a kratší vzdálenost drah měla pozitivní vliv na výslednou drsnost. Hrubování v tomto případě nemělo na drsnost vliv.

4.5.2. Vzorek 1 – plocha 2 a plocha 4

Tabulka 8 - Parametry ploch porovnání 2

Vzorek 1	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 2	0,05	0,08	1000	0,113
Plocha 4	0,05	0,08	800	0,118



Obrázek 23 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 2

Vliv rozdílu 200 mm/min je na hodnotu profilu drsnosti v těchto hodnotách posuvu zanedbatelný stejně jako výsledný rozdíl drsností.

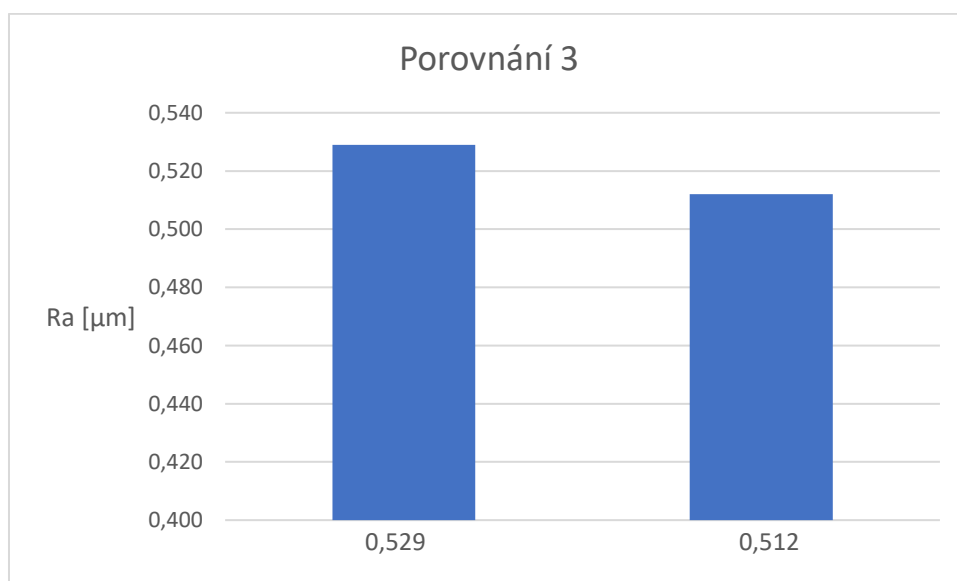
4.5.3. Vzorek 1 – plocha 1 a Vzorek 4 – plocha 1

Tabulka 9 - Parametry ploch porovnání 3 - vzorek 1

Vzorek 1	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 1	0,1	0,18	2000	0,529

Tabulka 10 - Parametry ploch porovnání 3 - vzorek 4

Vzorek 4	Tepelné zpracování			ANO
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 1	0,1	0,18	2000	0,512



Obrázek 24 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 3

Hodnoty profilu drsnosti těchto ploch jsou nejvyšší naměřené. Rychlý posuv a velká hloubka řezu pravděpodobně vedl ke zhoršení drsnosti. Kvalita plochy je mírně lepší u tepelně upraveného vzorku.

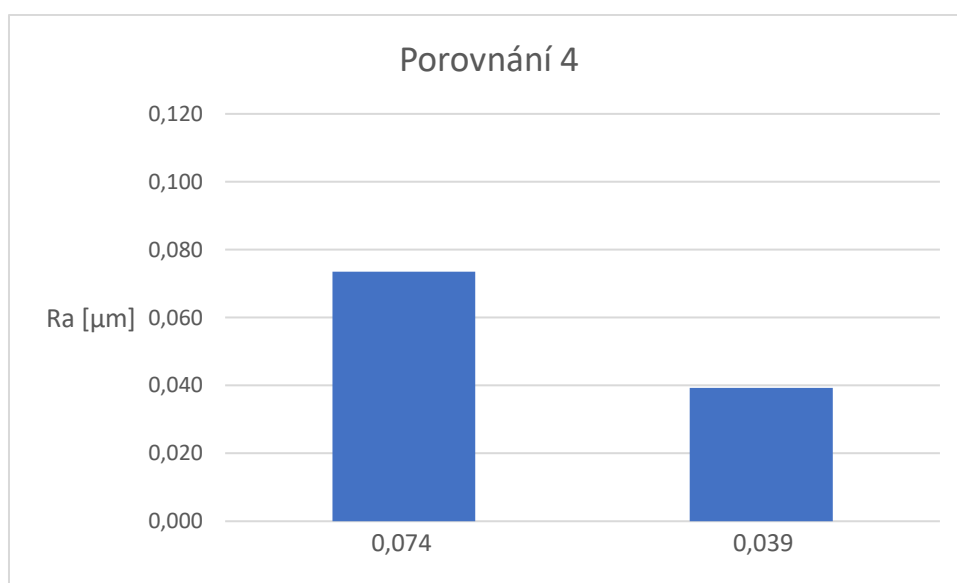
4.5.4. Vzorek 1 – průměr ploch 3 a 5 a Vzorek 4 – plocha 1

Tabulka 11 - Parametry ploch porovnání 4 - vzorek 1

Vzorek 1	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 3	0,02	0,02	1000	0,074
Plocha 5	0,05	0,08	1000	0,074
	0,02	0,02		

Tabulka 12 - Parametry ploch porovnání 4 - vzorek 4

Vzorek 4	Tepelné zpracování			ANO
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 3	0,02	0,02	1000	0,039



Obrázek 25 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 4

Plocha tepelně zpracovaného vzorku vykazuje lepší drsnost za použití stejných řezných podmínek jako u vzorku bez tepelného zpracování.

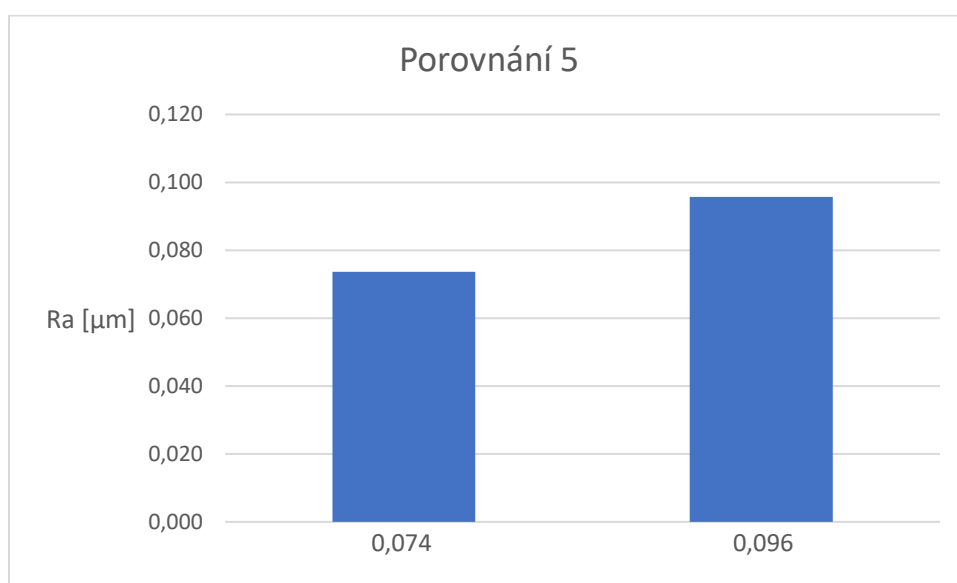
4.5.5. Vzorek 1 – průměr ploch 3 a 5 a Vzorek 2 – průměr ploch 1 a 5

Tabulka 13 - Parametry ploch porovnání 5 - vzorek 1

Vzorek 1	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 3	0,02	0,02	1000	0,074
Plocha 5	0,05	0,08	1000	0,074
	0,02	0,02		

Tabulka 14 - Parametry ploch porovnání 5 - vzorek 2

Vzorek 2	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 1	0,02	0,02	1000	0,108
Plocha 5	0,05	0,08	1000	0,083
	0,02	0,02		



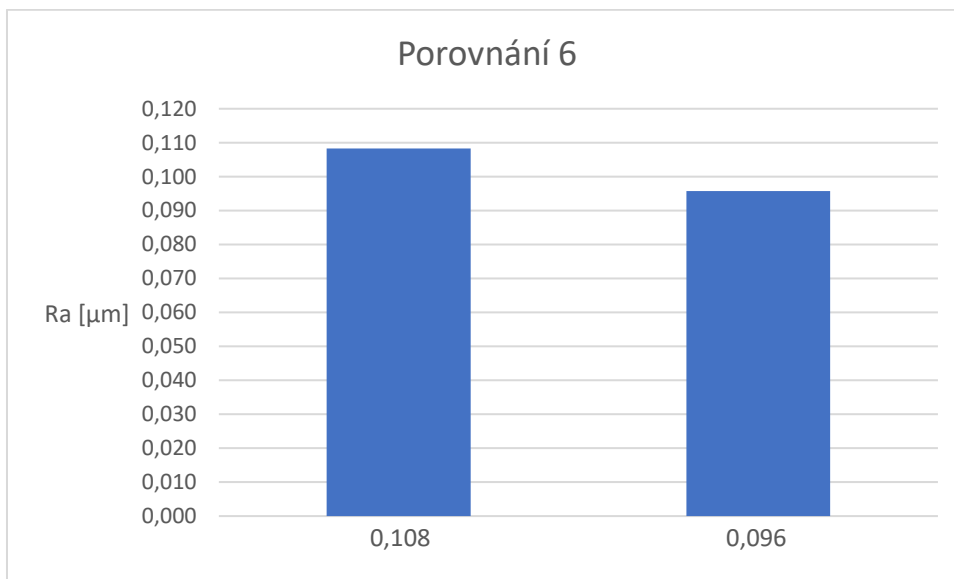
Obrázek 26 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 5

Pohyb obráběcího nástroje ve dvou osách se jeví jako způsob, kterým lze dosáhnout lepších drsností. V případě, že byla plocha nejdříve hrubovaná je rozdíl téměř zanedbatelný.

4.5.6. Vzorek 2 – plocha 1 a plocha 4

Tabulka 15 - Parametry ploch porovnání 6

Vzorek 2	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 1	0,02	0,02	1000	0,108
Plocha 4	0,02	0,02	1000	0,096
	0,02	0,005		



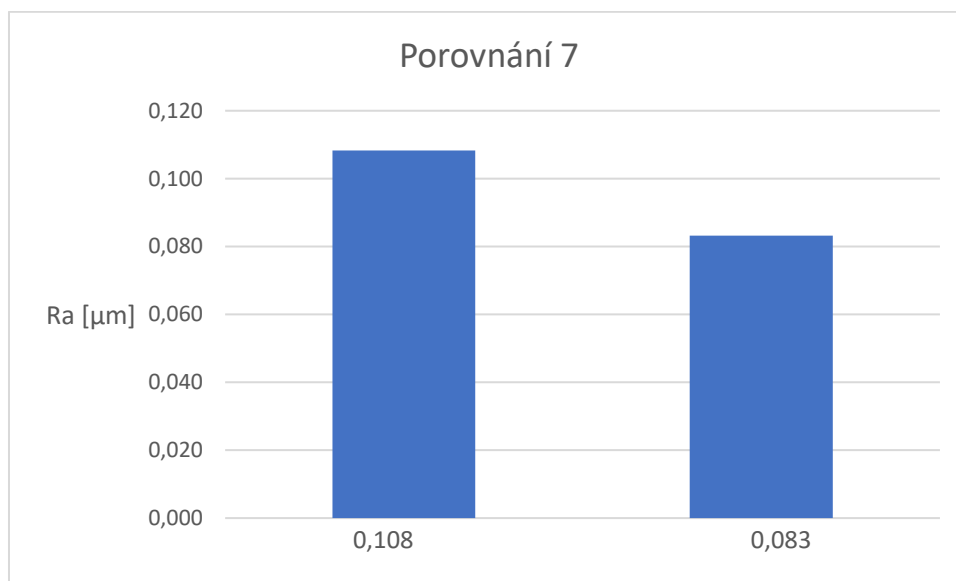
Obrázek 27 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 6

Plocha, která byla nejdříve hrubovaná dosahuje lepší drsnosti, avšak rozdíl je téměř zanedbatelný. V porovnání s přechozími výsledky se zdá, že zmenšení vzdálenosti drah mělo minimální vliv.

4.5.7. Vzorek 2 – plocha 1 a plocha 5

Tabulka 16 - Parametry ploch porovnání 7

Vzorek 2	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 1	0,02	0,02	1000	0,108
Plocha 5	0,05	0,08	1000	0,083
	0,02	0,02		



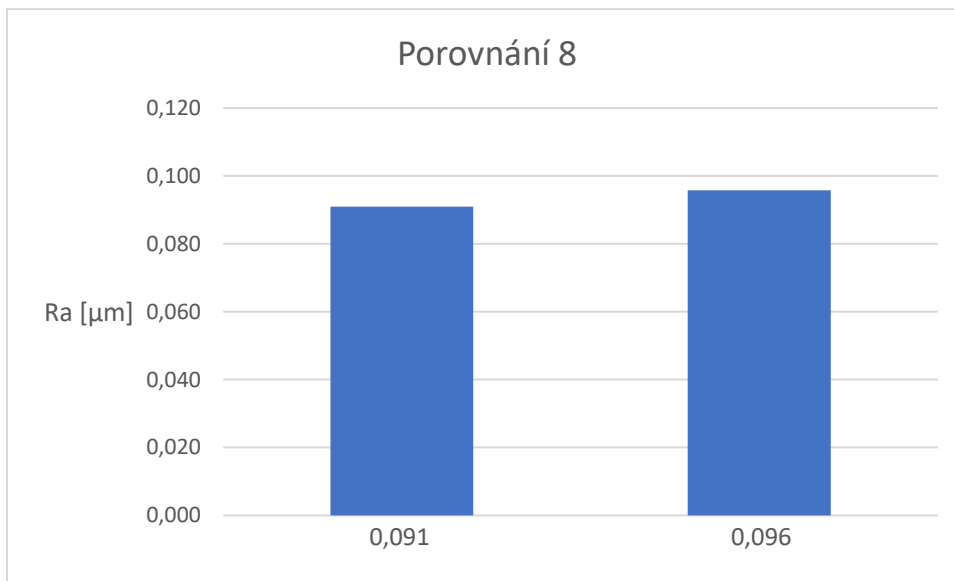
Obrázek 28 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 7

Hrubovaná plocha, stejně jako v případě vyhodnocení předchozích ploch, vykazuje lepší hodnoty profilu drsnosti Ra. Rozdíl hodnot je o něco větší než v přechozích případech.

4.5.8. Vzorek 2 – plocha 2 a plocha 4

Tabulka 17 - Parametry ploch porovnání 8

Vzorek 2	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 2	0,02	0,02	1000	0,091
	0,005	0,005		
Plocha 4	0,02	0,02	1000	0,096
	0,02	0,005		



Obrázek 29 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 8

Řezné podmínky byly identické. Rozdíl drsností je zanedbatelný a může být způsoben jinými vlivy, například chybou měření.

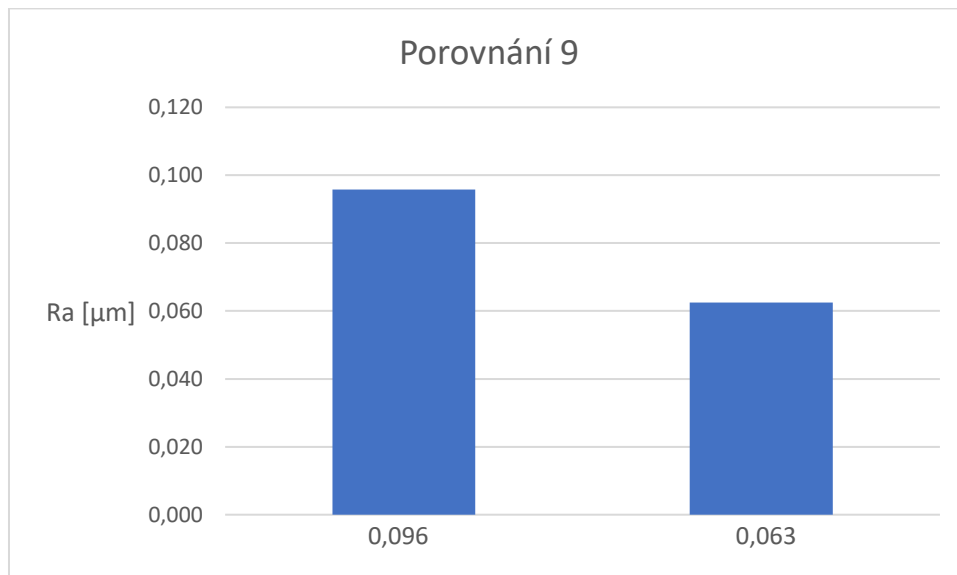
4.5.9. Vzorek 2 – plocha 4 a Vzorek 3 – plocha 4

Tabulka 18 - Parametry ploch porovnání 9 - vzorek 2

Vzorek 2	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 4	0,02	0,02	1000	0,096
	0,02	0,005		

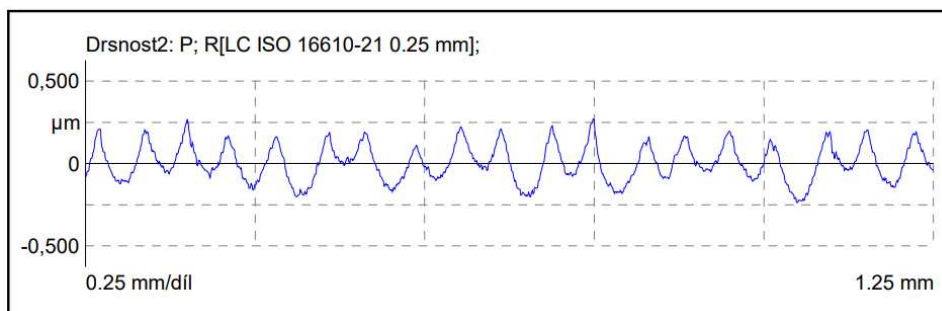
Tabulka 19 - Parametry ploch porovnání 9 - vzorek 3

Vzorek 3	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f	Ra
Plocha 4	0,02	0,02	1000	0,063
	0,005	0,005		

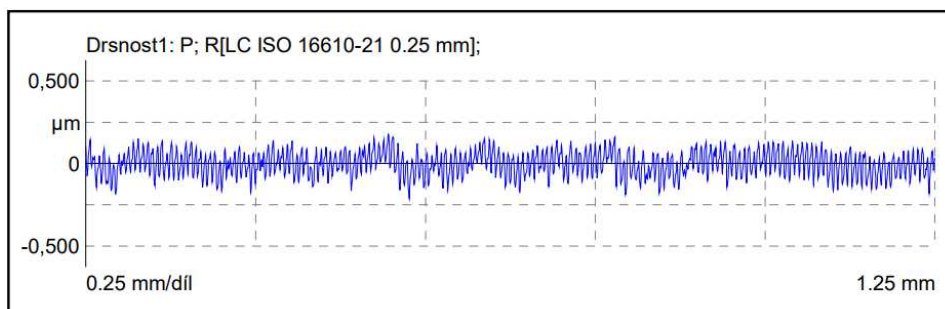


Obrázek 30 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 9

Přestože řezné podmínky byly velmi podobné, plocha vzorku dvě vykazuje lepší hodnotu profilu drsnosti. Z tohoto porovnání je dobře vidět míra vlivu hloubky řezu na výslednou kvalitu. Pro srovnání jsem níže přiložil záznam z měření.



Obrázek 31 - Průběh měření profilu drsnosti – vzorek 2 – plocha 4



Obrázek 32 - Průběh měření profilu drsnosti – vzorek 2 – plocha 4

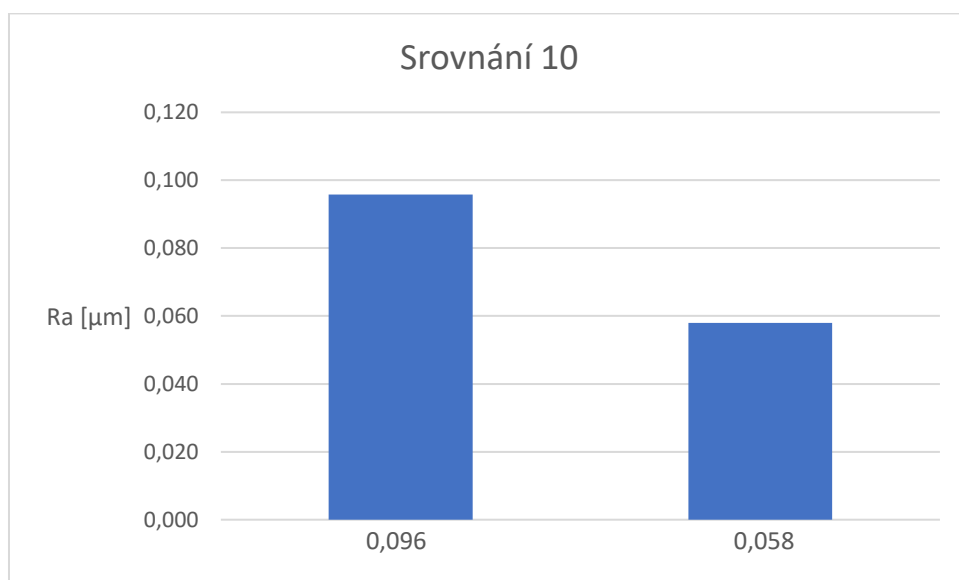
4.5.10. Vzorek 2 – plocha 4 a Vzorek 3 – plocha 5

Tabulka 20 - Parametry ploch porovnání 10 - vzorek 2

Vzorek 2	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 4	0,02	0,02	1000	0,096
	0,02	0,005		

Tabulka 21 - Parametry ploch porovnání 10 - vzorek 3

Vzorek 3	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 5	0,02	0,02	500	0,058
	0,02	0,005		



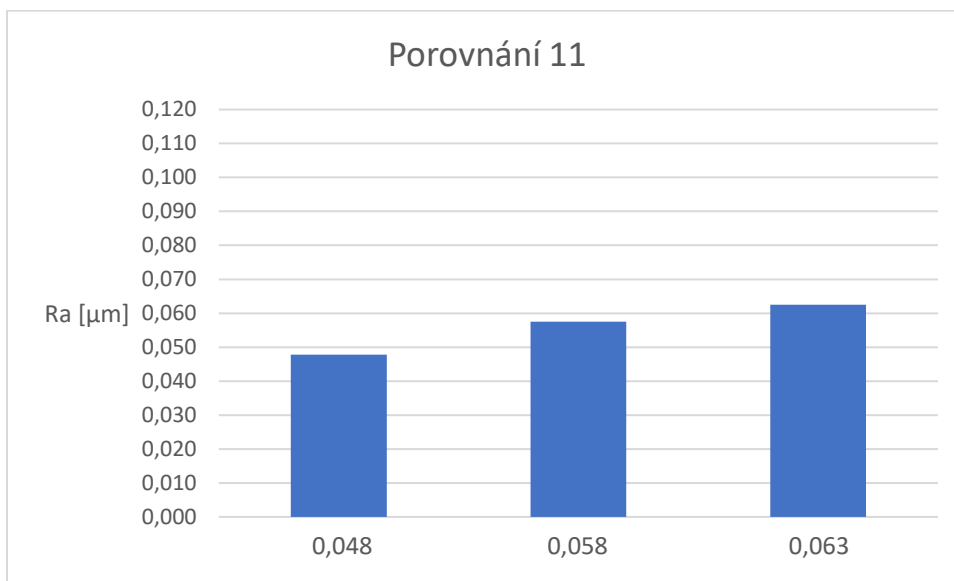
Obrázek 33 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 10

Z tohoto porovnání vyplývá, že při posuvu nižším o 500 mm/min povrch dosáhl znatelně lepší hodnoty profilu drsnosti.

4.5.11. Vzorek 3 – plocha 2, plocha 3 a plocha 4

Tabulka 22 - Parametry ploch porovnání 11

Vzorek 3	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 2	0,02	0,02	250	0,048
	0,005	0,005		
Plocha 3	0,02	0,02	500	0,058
	0,005	0,005		
Plocha 4	0,02	0,02	1000	0,063
	0,005	0,005		



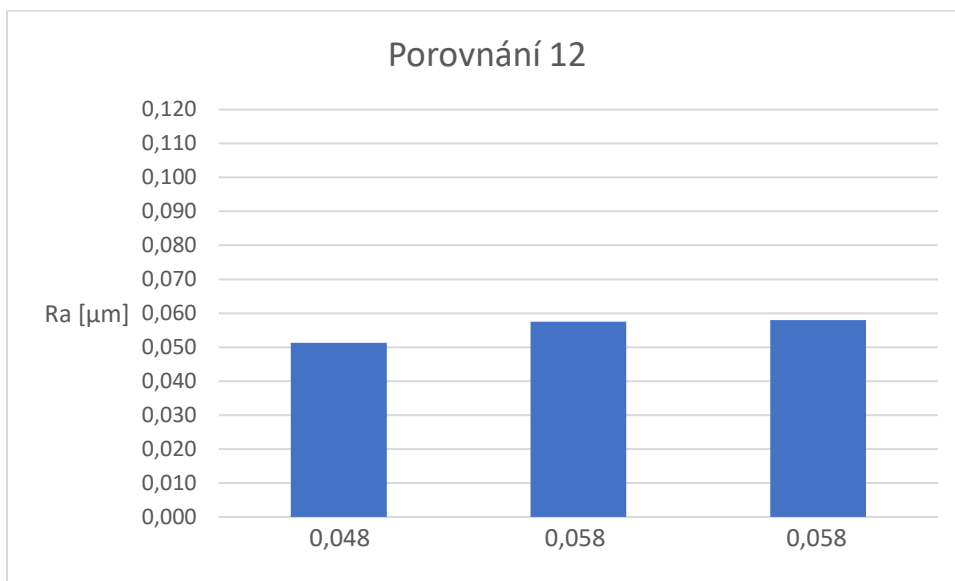
Obrázek 34 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 11

Toto srovnání zřetelně ukazuje, že menší posuv má kladný vliv na výslednost drsnost povrchu vzorků. Tento trend lze vysledovat i z předchozích srovnání.

4.5.12. Vzorek 3 – plocha 1, plocha 3 a plocha 5

Tabulka 23 - Parametry ploch porovnání 12

Vzorek 3	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 1	0,02	0,02	500	0,048
	0,003	0,005		
Plocha 3	0,02	0,02	500	0,058
	0,005	0,005		
Plocha 5	0,02	0,02	500	0,058
	0,02	0,005		



Obrázek 35 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 12

Z tohoto porovnání lze usoudit, že na výslednou drsnost má vyšší vliv posuv než hloubka řezu a řádkování. Použitím hrubších řezných podmínek v tomto případě plocha vykazuje horší drsnost než použitím podmínek jemnějších.

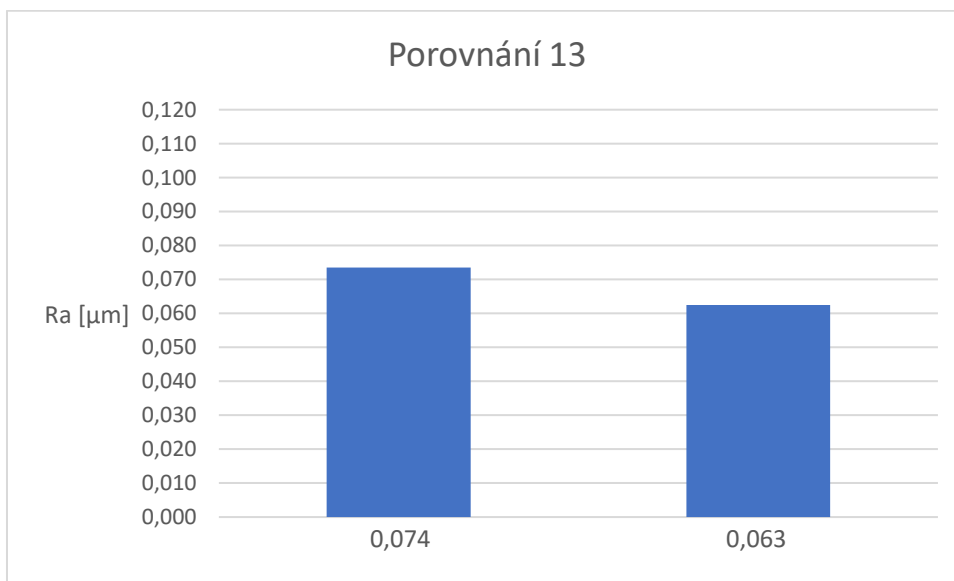
4.5.13. Vzorek 1 – průměr ploch 3 a 5 a Vzorek 3 – plocha 4

Tabulka 24 - Parametry ploch porovnání 13 – vzorek 1

Vzorek 1	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 3	0,02	0,02	1000	0,074
Plocha 5	0,05	0,08	1000	0,074
	0,02	0,02		

Tabulka 25 - Parametry ploch porovnání 13 - vzorek 4

Vzorek 3	Tepelné zpracování			NE
	a_p [mm]	a_e [mm]	f [mm/min]	Ra
Plocha 4	0,02	0,02	1000	0,063
	0,005	0,005		



Obrázek 36 - Sloupcový graf hodnot R_a - porovnání 13

Nižší hodnoty hloubky řezu a vzdálenosti drah nástroje měly pozitivní vliv na drsnost povrchu vzorku. Po celkovém porovnání předchozích závěrů lze říci, že obecně jemnější řezné podmínky zlepšují drsnost a nejvýraznější vliv má posuv.

4.6. Shrnutí praktické části

Nejdříve byly naměřeny profily drsnosti Ra obrobených ploch čtyřech vzorků. Celkově bylo měřeno 18 ploch ve směru kolmo na směr obrábění. Kontrolně byl měřen také profil drsnoty Rz. Pro lepší přehled byly porovnávané hodnoty zaneseny do sloupcových grafů.

Výsledky měření drsnosti obráběných ploch byly mezi sebou porovnány na základě shodných parametrů obráběcího procesu. Z porovnání vyplynulo, že nejzásadnějším vlivem na kvalitu povrchu z hlediska drsnosti má velikost posuvu. Výrazný vliv má také hloubka řezu a řádkování.

Nejvyšší drsnosti měly plochy, které byly obráběny řezným procesem s posuvem o velikosti 2000 mm/min, hloubkou řezu o velikosti 0,1 mm a řádkováním o velikosti 0,18 mm. Nejhorší hodnoty Ra konkrétně 0,529 μm dosáhla plocha 1 vzorku 1. I když se jedná o nejhorší výsledek ze sledovaného souboru, jde obecně o velmi kvalitní povrch.

Nejnižší drsnost byla naměřená na ploše tepelně zpracovaného vzorku obrobeného za posuvu o velikosti 1000 mm/min a hloubce řezu i řádkování o velikosti 0,2 mm. Nejlepší kvality povrchu dosáhla plocha 3. Naměřená hodnota profilu drsnosti Ra této plochy byla 0,039 μm .

Tepelně zpracovaný vzorek za stejných řezných parametrů vykazoval lepší drsnost než vzorek bez tepelného zpracování. Hrubování ploch před obráběním na čisto vedlo většinou k lepším hodnotám profilu drsnosti, ale v některých případech byl rozdíl zanedbatelný. Zanedbatelná byla také volba strategie obrábění z hlediska směru pohybu frézy.

5. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem zvolené technologie a jejích parametrů na výslednou integritu povrchu obrobku. V teoretické části byly popsány vybrané dokončovací metody a typy zatížení materiálu při obrábění. Dále bylo vysvětleno, co je integrita povrchu a popsány některé její atributy.

V praktické části byly porovnávány profily drsnosti Ra obrobených ploch vzorků z maraging oceli Böhler W720 VMR. Jednotlivé plochy byly obráběny za jiných řezných podmínek. Cílem bylo zhodnotit vliv jednotlivých podmínek a vyhodnotit, které jsou neoptimalnější. Proměnné parametry vzorků byly hloubka řezu, řádkování, posuv, obráběcí strategie a tepelné zpracování.

Výsledky experimentu potvrzují tvrzení z teoretické části, že obecně jemnější řezné podmínky mají pozitivní vliv na integritu povrchu. Nejzásadnější vliv má velikost posuvu. Dále je možné vysledovat, že tepelné zpracování vzorku mělo pozitivní vliv na drsnost. Pokud byl vzorek mimo obrábění pouze na čisto i hrubován, měřená plocha dosahovala lepších drsností. Dalším zásadním vlivem byla hloubka řezu a řádkování. Nižší hodnoty těchto parametrů měly pozitivní vliv na integritu povrchu. Směr pohybu frézy měl naopak zanedbatelný vliv.

7. Seznam použité literatury

- [1] DAVIM, J. Paulo. *Surface Integrity in Machining*. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-84882-873-5.
- [2] JAWHIR, I.S, E. BRINKSMEIER, R. M'SAOUBI, D.K. ASPINWALL, J.C. OUTEIRO, D. MEYER, D. UMBRELLO a A.D. JAYAL. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals* [online]. 2011, (60), 603-626 [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850611002046>
- [3] LIAO, Zhirong, Andrea LA MONACA, James MURRAY, Alistar SPEIDEL, Dmitrii USHMAEV, Adam CLARE, Dragos AXINTE a Rachid M'SAOUBI. Surface integrity in metal machining - Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2021, (162) [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695520307021>
- [4] VANĚK, Tomáš a Josef ŠVARC. *Obrábění a zpracování kovů: Dokončovací metody úpravy povrchu* [online]. 2015 [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1379>
- [5] BARTOŇOVÁ, Renáta. *Technologie broušení* [online]. 2012 [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: https://www.sousvodnany.cz/zet/File/drop/ste_s2a_c5_brouseni-1609852366.pdf
- [6] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění: 3. díl*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [7] MÁDL, Jan. *Vliv dokončovací technologie na chování povrchu strojních součástí při zatížení*. [Ústí nad Labem]: UJEP, FVTM, 2012. ISBN 978-80-7414-561-2.
- [8] TKADLEC, Jiří. *VÝROBA ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ PRO MIKRO-FRÉZOVÁNÍ*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, ústav strojní technologie. Vedoucí práce Jan Židek.
- [9] ŠVORC, Josef. *APLIKACE MIKRO-SOUSTRUŽENÍ VE VYSOCE PŘESNÉ VÝROBĚ ZA POUŽITÍ DIAMANTOVÝCH NÁSTROJŮ*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, ústav strojní technologie. Vedoucí práce Jan Židek.
- [10] What is Microfabrication?. *ONEMONROE* [online]. 17.7.2017 [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://monroeengineering.com/blog/what-is-microfabrication/>

- [11] Mativenga, P. (2018). Micromachining. In: CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [12] Mikroobrábění – Jak opracováváme miniaturní součásti laserem. *Lascam* [online]. 12.6.2017 [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/mikroobrabeni/>
- [13] MIAN, A.J, N. DRIVER a P.T. MATIVENGA. Identification of factors that dominate size effect in micro-machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Elsevier, 2011.
- [14] KRÁTKÝ, Stanislav. *TECHNOLOGIE LEPTÁNÍ KŘEMÍKU*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Milan Matějka.
- [15] KOMIYA, Hiroyoshi, Hiroyasu TOYODA, Tadao KATO a Kumiko INABA. Microfabrication Technique by Gas Plasma Etching Method. *Japanese Journal of Applied Physics* [online]. 1976, 15(S1) [cit. 2023-07-23]. ISSN 0021-4922. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAPS.15S1.19>
- [16] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění – 3. díl. MM Průmyslové spektrum. 2007, (12), 54. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-3-dil.html>
- [17] SUN, Xi-Qing, T. MASUZAWA a M. FUJINO. Micro ultrasonic machining and its applications in MEMS. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 1996, 57(2), 159-164 [cit. 2023-07-23]. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-4247(97)80107-0
- [18] Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí. KOSMAČ, Alenka. Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí [online]. Brusel: Euro Inox, 2009, s. 20 [cit. 2023-07-21]. ISBN 978-2-87997-319-7. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-imagefiles/PDF/Euro_Inox/Electropolishing_CZ.pdf
- [19] Piskovani-scpmoto. Balotina [online]. 2014 [vid. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.piskovani-scpmoto.cz/balotina>
- [20] TYKAL, Josef. Metrologie povrchu. ČNI TNK 7. červen 2006

- [21] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění: 1. díl*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03752-2
- [22] MarSurf. Parametry drsnosti povrchu. *Mahr* [online]. [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>
- [23] MACHERAUCH, Eckard. *INTRODUCTION TO RESIDUAL STRESS* [online]. 1987 [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/1987125.pdf>
- [24] GANEV, Nikolaj a Ivo KRAUS. RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ TECHNIKA MĚŘENÍ MAKROSKOPICKÝCH ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ. *Materials Structure* [online]. 2002, 2002(9) [cit. 2023-07-23]. ISSN 1805-4382. Dostupné z: <https://xray.cz/ms/bul2002-2/ganev.pdf>
- [25] VILČEK, I., J. ŘEHOŘ, D. CAROU a P. ZEMAN. Residual stresses evaluation in precision milling of hardened steel based on the deflection-electrochemical etching technique. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Elsevier, 2017.
- [26] Theory of the Rockwell hardness test. *AFFRI* [online]. [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://affri.com/the-rockwell-hardness-test-theory/>
- [27] SOBOTOVÁ, Jana, Zdeňka JENÍKOVÁ, Jakub HORNÍK a Elena ČIŽMÁROVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2022. ISBN 978-80-01-06975-2.
- [28] AUFFAHRTOVÁ, Pavla. *Mikrotvrdoměr kovových materiálů*. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická. Vedoucí práce Martin Ovsík.
- [29] KUBČKOVÁ, Martina. *Hodnocení rozdílů barev – vliv geometrie měření*. Liberec, 2020. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, fakulta textilní. Vedoucí práce Michal Vik.
- [30] MAZUREK, Pavel. Hodnocení lesku povrchové úpravy. *Průmyslové spektrum* [online]. 25. 04. 2007 [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hodnoceni-lesku-povrchove-upravy>
- [31] R. HANSON, Andrew. Measurement Good Practice Guide. *A NATIONAL MEASUREMENT GOOD PRACTICE GUIDE* [online]. 2006, 2006(94) [cit. 2023-07-23]. ISSN 1368-6550. Dostupné z: <https://eprintspublications.npl.co.uk/3441/1/mgpg94.pdf>

[32] Katalog. *Misan* [online]. [cit. 2023-07-23]. Dostupné z:
<https://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/mu-400v-ii-okuma-mu-400v-ii/?viewpart=2>

[33] : Products. *NSTOOL* [online]. [cit. 2023-07-23]. Dostupné z: <https://www.nstool.com/en/products/detail/221#>

[34] GARRISON, Warren a Malay BANERJEE. Martensitic Non-Stainless Steels: High Strength and High Alloy. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering [online]. Elsevier, 2018 [cit. 2023-07-15]. DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.02519-4. ISBN 9780128035818. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128035818025194>

[35] BÖHLER W720 VMR. *Voestalpine* [online]. [cit. 2023-07-23]. Dostupné z:
<https://www.bohler.cz/cs/products/w720vmr/>

6. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Princip broušení [5]	11
Obrázek 2- Trajektorie pohybu honovacích kamenů [6]	13
Obrázek 3 - Detail plochy po mikroobrábění [12]	15
Obrázek 4 - Princip metody pro obrábění ultrazvukem 1 – kapalina, 2 – nástroj, 3 – brousicí zrna, 4 – přívod brousicích zrn a kapaliny, 5 – obrobek [16].....	19
Obrázek 5 - Tabulka srovnání jednotlivých druhů mikroobrábění [12].....	19
Obrázek 6 - Odstranění otřepů pomocí elektrolytického leštění [18]	20
Obrázek 7 - Schéma superfinišování [5]	22
Obrázek 9 - Profil drsnosti Ra [25]	26
Obrázek 10 - Profil drsnosti Rsm [25]	26
Obrázek 11 – CNC Okuma MU-400V II	29
Obrázek 12 - Drnosměr s měřící jednotkou Mahr MarSurf LD 120.....	30
Obrázek 13 - Schéma frézy [33]	31
Obrázek 14 - Fréza NS TOOL SSPB220 D4	31
Obrázek 15 - Tabulka pro volbu mezní vlnové délky [25]	32
Obrázek 16 - Ukázka listu z protokolu měření drsnosti	33
Obrázek 17 - Zkušební vzorky	34
Obrázek 18 - Vzorek 1	35
Obrázek 19 - Vzorek 2	36
Obrázek 20 - Vzorek 3	37
Obrázek 21 - Vzorek 4	38
Obrázek 22 - Graf stárnutí (doba udržování: 3 hodiny) [35]	39
Obrázek 23 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 1	40
Obrázek 24 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 2	41
Obrázek 25 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 3	42
Obrázek 26 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 4	43
Obrázek 27 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 5	44
Obrázek 28 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 6	45
Obrázek 29 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 7	46
Obrázek 30 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 8	47
Obrázek 31 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 9	48
Obrázek 32 - Průběh měření profilu drsnosti – vzorek 2 – plocha 4.....	49
Obrázek 33 - Průběh měření profilu drsnosti – vzorek 2 – plocha 4.....	49

Obrázek 34 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 10	50
Obrázek 35 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 11	51
Obrázek 36 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 12	52
Obrázek 37 - Sloupcový graf hodnot Ra - porovnání 13	53

7. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Technické parametry CNC Okuma MU-400V II [32]	30
Tabulka 2 - Parametry frézy	31
Tabulka 3 - Parametry vzorku 1.....	35
Tabulka 4 -Parametry vzorku 2	36
Tabulka 5 - Parametry vzorku 3.....	37
Tabulka 6 - Parametry vzorku 4.....	38
Tabulka 7 - Parametry ploch porovnání 1	40
Tabulka 8 - Parametry ploch srovnání 2.....	41
Tabulka 9 - Parametry ploch srovnání 3 - vzorek 1	42
Tabulka 10 - Parametry ploch srovnání 3 - vzorek 4	42
Tabulka 11 - Parametry ploch srovnání 4 - vzorek 1	43
Tabulka 12 - Parametry ploch srovnání 4 - vzorek 4	43
Tabulka 13 - Parametry ploch porovnání 5 - vzorek 1	44
Tabulka 14 - Parametry ploch porovnání 5 - vzorek 2	44
Tabulka 15 - Parametry ploch porovnání 6	45
Tabulka 16 - Parametry ploch porovnání 7	46
Tabulka 17 - Parametry ploch porovnání 8	47
Tabulka 18 - Parametry ploch porovnání 9 - vzorek 2	48
Tabulka 19 - Parametry ploch porovnání 9 - vzorek 3	48
Tabulka 20 - Parametry ploch porovnání 10 - vzorek 2	50
Tabulka 21 - Parametry ploch porovnání 10 - vzorek 3	50
Tabulka 22 - Parametry ploch porovnání 11	51
Tabulka 23 - Parametry ploch porovnání 12	52
Tabulka 24 - Parametry ploch porovnání 13 – vzorek 1	53
Tabulka 25 - Parametry ploch porovnání 13 - vzorek 4	53