

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**METODIKA ZÁKLADNÍCH TECHNOLOGICKÝCH ZKOUŠEK
OMÍLACÍCH TECHNOLOGIÍ**

Autor: Bc. David Dvořák

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořák** Jméno: **David** Osobní číslo: **434249**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Metodika základních technologických zkoušek omílacích technologií

Název diplomové práce anglicky:

Methodology of basic technological tests of vibro-thumbling technologies

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše v oblasti omílacích dokončovacích technologií.
- 2) Technologie SPM leštění a identifikace klíčových parametrů procesu.
- 3) Modifikace zkušebních těles pro testování vlivu vybraných procesních parametrů na drsnost, úběr a zaoblování hran.
- 4) Výrobní postup titanových zkušebních těles.
- 5) Prototypová výroba těles.
- 6) Provedení technologických zkoušek a vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

- 1) OVERBY, Alan. CNC machining handbook: building, programming, and implementation. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.
- 2) Výrobní dokumentace stroje SPM LPG1/LPG EVO
- 3) DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004. ISBN 0-87170-686-5.
- 4) Handbook of Modern Grinding Technology - Robert King, Robert S. Hahn

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS


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

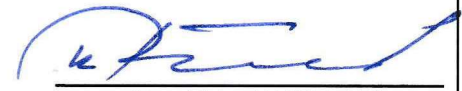
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce



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


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

20.06.2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

DVOŘÁK, David. *Metodika základních technologických zkoušek omílacích technologií*. Praha: ČVUT 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem všechny použité zdroje správně a úplně citoval a uvádím je v příloženém seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této závěrečné práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Praze dne: 31. 07. 2020

Podpis:

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi za cenné rady a připomínky k mé práci a také za pomoc při výrobě zkušebních tělísek. Dále bych rád poděkoval rodině, která mě vždy podporovala. A v neposlední řadě bych rád poděkoval všem přátelům, kteří mě i v těžkých chvílích dokázali motivovat.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá základní metodikou technologických zkoušek pro omílací technologii od firmy SPM ve stroji LPG1. V úvodu je teoretická část věnována slitinám titanu a následně se práce věnuje dostupným omílacím technologiím. Další část se věnuje stroji LPG1, pro který jsou identifikovány klíčové parametry procesu a které budou následně využity pro experiment. Praktická část se zabývá výrobou zkušebních tělísek a samotným experimentem, při kterém jsou zkoumány vlivy orientace a umístění zkušebního tělíska v prostoru, množství abraziva a délka omílání na výsledný úběr materiálu.

Klíčová slova

Omílání, dokončovací operace, technologie, SPM, LPG1, vlivy procesních parametrů na úběr materiálu, turbínové lopatky, titanové slitiny

Abstract

This diploma thesis deals with basic methodology of technological tests for tumbling technology from the company SPM in the LPG1 machine. In the introduction, the theoretical part is devoted to titanium alloys and then the thesis deals with available tumbling technologies. The next part deals with the LPG1 machine, for which key process parameters are identified and which will then be used for the experiment. The practical part deals with the production of test specimens and the experiment itself, which examines the effect of orientation and location of the test specimen in space, the amount of abrasive and the length of tumbling on the final removal of material.

Key words

Tumbling, finishing processes, technology, SPM, LPG1, influence of process parameters on material removal, turbine blades, titanium alloys

Obsah

Úvod	5
1 Titanové slitiny	6
1.1 Vlastnosti titanu	7
1.2 Obrobitelnost a broušení titanu	8
1.3 Omílání titanu	10
2 Omílací technologie	12
2.1 Základní omílací technologie	13
2.2 Modifikované omílací technologie	16
2.2.1 Proudové omílání	16
2.2.2 Vlečné omílání	17
2.2.3 Surf-Finisher	19
2.2.4 ISF®	20
2.3 Omílací tělíska	20
2.4 Kompoundy	22
3 Omílací stroj SPM LPG1	23
4 Výroba zkušebních tělísek	26
4.1 Polotovar	26
4.2 Stroje, nástroje	27
4.3 Výrobní postup	30
4.4 Popis vzorků	32
5 Příprava experimentu	34
5.1 Označení a upínání	34
5.2 Způsoby měření	35
6 Experiment	40
6.1 Hypotézy	41
6.2 První test	42
6.2.1 Výsledky	43
6.2.2 Vyhodnocení úběru materiálu	46
6.3 Druhý test	50
6.3.1 Výsledky	51

6.3.2	Vyhodnocení úběru materiálu	55
6.4	Zhodnocení prvních dvou testů	57
6.5	Testy pro zjištění vlivu času a množství abraziva.....	58
6.5.1	Výsledky úběrů materiálu	59
6.5.2	Vliv času omílání a množství abraziva	62
6.5.3	Rovnice úběrů v závislosti na poloze.....	64
6.6	Vizuální porovnání deformace ostří.....	68
7	Závěr.....	69
8	Seznam použité literatury	70
9	Seznam obrázků	73
10	Seznam tabulek	75
11	Seznam grafů	76
12	Seznam symbolů a zkratk	77

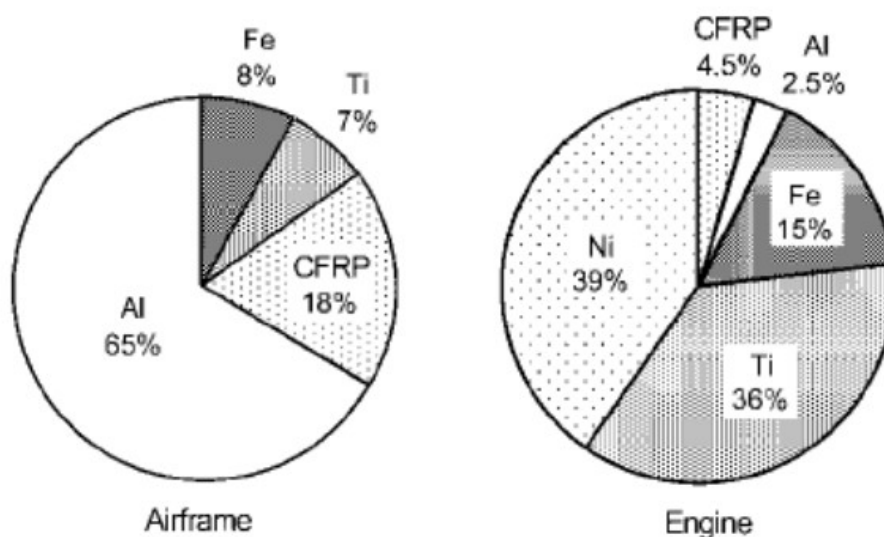
Úvod

V leteckém průmyslu se kladou vysoké nároky na dokončovací operace pro turbínové lopatky. Jelikož nemají jednoduchý tvar, ale jsou tvořeny obecnými tvarovými plochami, je nutné tyto plochy dokončovat pomocí technologií, které jsou k tomu uzpůsobeny. Mezi tyto technologie patří například omílání, které najdeme v různých modifikacích. Takto různě uzpůsobené technologie omílání jsou pak vhodnější nebo naopak méně vhodné pro omílání turbínových lopatek. Správná volba technologie pak závisí na technologovi a jeho zkušenostech. Tato práce se tak bude věnovat omílání pomocí technologie od firmy S.P.M. Mould Polishing System s.r.l. Cílem práce je zobecnit vliv procesních parametrů omílání na velikost úběru materiálu a velikost zaoblení náběžných hran.

1 Titanové slitiny

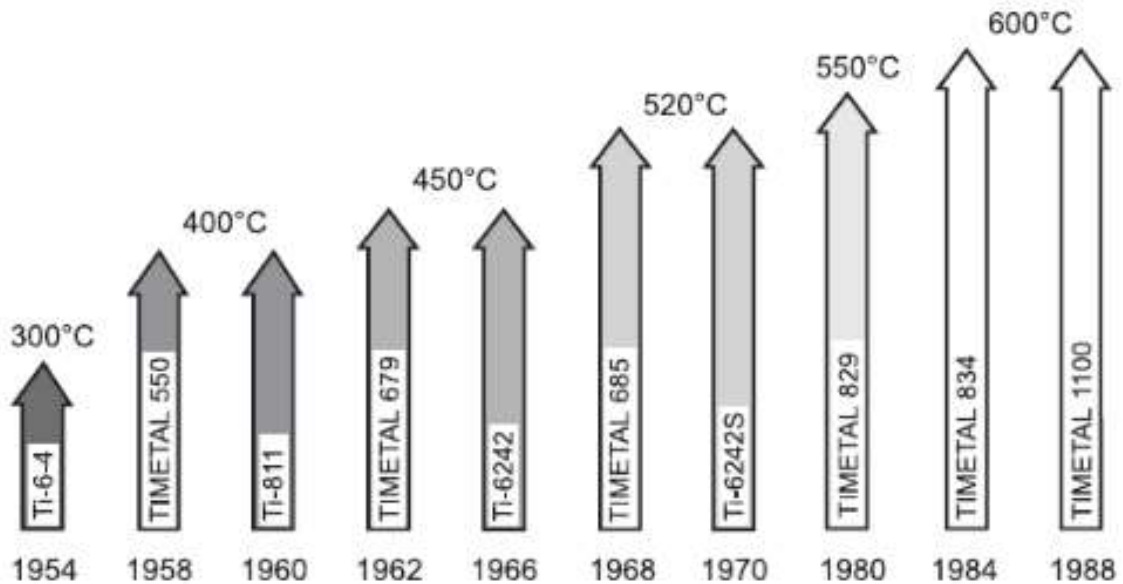
Titan a jeho slitiny jsou v dnešní době úzce spjaty s letectvím, ale i kosmonautikou nebo bojovou technikou. S jeho hustotou $4,5 \text{ g/cm}^3$ jsou titanové slitiny o polovinu lehčí než ocel nebo niklové superslitiny a dosahují tak výborného poměru pevnosti ku hmotnosti. Mohou mít také výbornou korozní odolnost. Titanových slitin je především využíváno ke snížení hmotnosti. Nižší hmotnost znamená nižší provozní náklady, ať už v podobě ušetřeného paliva nebo větší nosnosti díky ušetřené hmotnosti. Ušetřená hmotnost se však promítne na výsledné ceně. Například v automobilovém průmyslu nemůže ušetřený kilogram hmotnosti stát více než 10 euro, oproti tomu letecký průmysl je ochotný zaplatit za ušetřený kilogram více než 1000 euro. Budeme-li mluvit o kosmonautice, v některých případech je možné překročit cenu 10 000 euro za ušetřený kilogram [1].

V letectví je možné najít titanové slitiny všude tam, kde se využívá kombinace nízké hmotnosti, pevnosti a korozní odolnosti, nebo v některých případech i vysokoteplotní stability, kde jiné materiály jako hliníkové slitiny, vysokopevnostní oceli nebo niklové superslitiny jsou nedostatečné. Na následujícím obrázku jsou pak zobrazeny procentuální podíly titanových slitin ve velkém komerčním letadle. Vlevo je vidět využití titanu pro trup letadla, na pravé straně pak využití v motorech, které činí 36 % a je tak patrné, že zde nachází největší uplatnění [1].



Obrázek 1 - Procentuální podíl hliníkových, titanových a ocelových slitin a CFRP na hmotnosti velkých moderních letadel a plynových turbínových motorů [1].

Důležitým faktorem v průběhu let bylo zvýšit teplotní odolnost, aby titanové slitiny mohly pracovat za vysokých teplot. V průběhu 40 let se podařilo zvýšit pracovní teplotu titanových dílů z 300 °C na 600 °C Tento stoupající trend zachycuje obrázek č. 2. V dnešní době se však vyvíjí slitiny titanu, které budou schopny zvládat provozní teploty 800-900 °C [1;2].



Obrázek 2 - Navýšení maximální provozní teploty titanových slitin [1].

1.1 Vlastnosti titanu

Pro průmyslové využití k nejrozšířenějším slitinám dnes patří slitiny α a $\alpha+\beta$. Tyto titanové slitiny pak můžeme žíhat, kalit, vytvrzovat a chemicky povrchově zpracovávat. Základní rozdělení titanu podle skupin Grade 1–11 popisuje tabulka č. 1. Pro jednotlivé materiály je zde vidět mez pevnosti v tahu, mez kluzu, prodloužení a popis jednotlivých vlastností a použití.

Druh titanu	R _m [MPa]	R _{p0.2} [MPa]	A ₅ [%]	Vlastnosti a použití
Grade 1 3.7025	290-410	170-310	30	Druhý nejpoužívanější komerčně čistý titan (CP titan), vynikající tažnost, nižší pevnost.
Grade 2 3.7035	390-540	275-450	22	Nejpoužívanější druh CP titanu s nejširším sortimentem hutních výrobků. Vyvážená tažnost s pevností.
Grade 3 3.7055	460-590	380-550	18	Méně obvyklý druh CP titanu, střední tažnost a zvýšená pevnost.
Grade 4 3.7065	540-740	483-655	16	Méně obvyklý druh CP titanu, nejnižší tažnost a zvýšená pevnost.
Grade 7 3.7235	390-540	275-450	22	Méně obvyklý druh CP titanu, zvýšená korozní odolnost přidavkem palladia, mechanické hodnoty stejné jako Grade 2.
Grade 11 3.7225	290-410	170-310	30	Méně obvyklý druh CP titanu, zvýšená korozní odolnost přidavkem paladia, mechanické hodnoty stejné jako Grade 1.
Grade 5 6Al-4V 3.7165	895-900	828-830	10	Nejpoužívanější titanová slitina pro konstrukční aplikace. Vysoká pevnost v tahu. Více než 50 druhů všech slitin titanu je odvozeno od skupiny Ti-6Al-4V. Použití zejména pro vysoce namáhané letecké díly do teploty 400 °C.

Tabulka 1 - Mechanické vlastnosti slitin titanu při pokojové teplotě, jejich vlastnosti a využití [2]

1.2 Obrobitelnost a broušení titanu

Slitiny titanu se mohou obrábět všemi známými konvenčními metodami jako je soustružení, frézování, vrtání, řezání závitů, broušení, nebo nekonvenčními metodami, jako je elektrochemické broušení nebo chemické obrábění. Avšak titanové slitiny patří k těžkoobrobitelným materiálům. Díky dnešním širokým znalostem o jejich obrábění jsou dnešní výrobci schopni tento materiál obrábět pomocí podobných technik, jako AISI 316 nerezovou ocel, při dodržení určitých zásad. Pro obrábění titanových slitin je zapotřebí o něco větší řezná síla, avšak metalurgické charakteristiky, které tyto slitiny mají, je dělají složitější a také dražší na obrobení, než oceli o stejné tvrdosti. Obrobitelnost jednotlivých slitin je pak shrnuta v tabulce č. 2 [3]. Obrobitelnost se vztahuje k oceli B1112, která je dle normy AISI stanovena jako etalon

s obrobiteľnosťou 100 %. Táto oceľ je za studena ťažená s tvrdosťou 160 dle Brinella [4]. Jednotlivé stavy jsou: Ž – žíhání; TS – ťažení za studena; VT – válcování za tepla; RŽS – rozpouštěcí žíhání a stárnutí.

Slitina	Stav	Hodnocení obrobiteľnosti [%]
Hliníková slitina 2017	RŽS	300
Oceľ B1112	VT	100
1020 uhlíková oceľ	TS	70
4340 slitinová oceľ	Ž	45
Komerční čistý titan	Ž	40
302 nerezová oceľ	Ž	35
Ti-5Al-2.5Sn	Ž	30
Ti-6Al-4V	Ž	22
Ti-6Al-6V-2Sn	Ž	20
Ti-6Al-4V	RŽS	18
HS25	Ž	10
René 41	RŽS	6

Tabulka 2 - Hodnocení obrobiteľnosti [3]

Tato špatná obrobiteľnosť je spôsobovaná nasledujúcimi faktormi, ktoré významne ovplyvňujú chovánie titanových slitin pri obrábění. Je teda nutné s týmito vlastnosťami počítat a náležitě upraviť parametry daného obrábění, jako je například rezná rychlost, hloubka řezu, chlazení nebo materiál nástroje.

Prvním z faktorů je tepelná vodivost, jelikož titan je špatným tepelným vodičem s tepelnou vodivostí pouze 11-17 W/m·K oproti ocelím, které mají tepelnou vodivost v průměru 50 W/m·K. Teplo, které se tak generuje při úběru materiálu, se nemůže rychle rozptýlit. Většina tepla se tak koncentruje v místě řezu, kde přechází do břitu rezného nástroje, který se pak může deformovat, a to má za následek jeho zkrácenou životnost.

Druhým faktorem je modul pružnosti, který je u titanu menší než u ocelí. Modul pružnosti u titanu je 116 Gpa a u konstrukčních ocelí 210 Gpa. Při obrábění se tak může chovat „pružně“, a tím může docházet k odchylování obrobku od rezného nástroje. Toto chování pak mohou vykazovat hlavně tenkostěnné profily, které mají při obrábění tendenci se bortit a vibrovat. Z tohoto důvodu je potřeba používat dostatečně tuhé obráběcí stroje a volit pevné upnutí obrobku.

Třetím faktorem je vysoká chemická reaktivita s většinou rezných materiálů. Ta při vysokých teplotách při obrábění způsobuje přivařování povrchu obrobku k reznému nástroji a následně dochází k zadírání a odlamování obráběného povrchu spolu s rychlým opotřebením rezného nástroje [3;5;6].

Při obrábění je také důležitá integrita obrobeného povrchu, jelikož mez únavy u titanových slitin ovlivňují povrchové vady více, než u jiných kovových materiálů. Toto je zejména důležité u broušení, které je třeba provést správně, jinak může dojít ke snížení meze únavy. Udržování ostrého nástroje je tak velmi důležité pro zachování optimální meze únavy titanu [3].

Pro broušení titanových slitin je doporučováno použití menších řezných rychlostí než při klasickém broušení ocelí. Doporučované abrazivum v případě ručního broušení je pro brusné kotouče karbid křemíku, pro broušení podélné nebo rovinné pak oxid hlinitý. Pro snížení zbytkového napětí na povrchu obráběné součásti je doporučováno používat hloubku řezu 0,025 mm/průchod [3].

Dále by se měly používat:

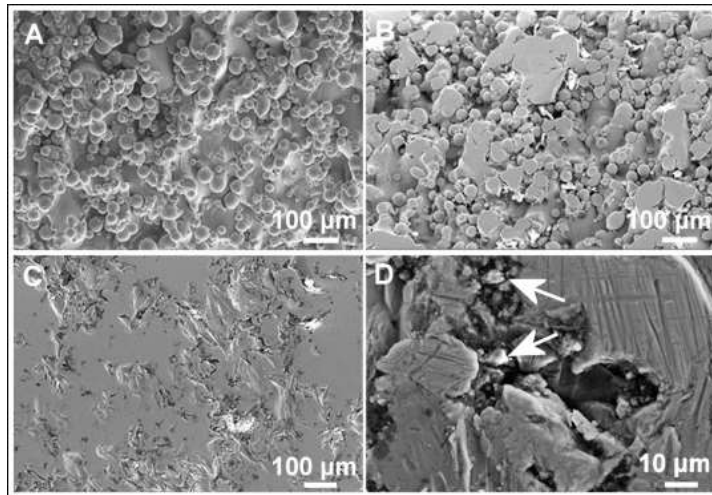
- Dobře orovnané brusné kotouče
- Co největší průměr a šířka brusného kotouče
- Tvrdší brusné kotouče

Pro snížení rizika vzplanutí při broušení titanu při použití brusného oleje, zejména při vyšších rychlostech, by se měla používat tato opatření:

- Dostatečné množství řezné kapaliny pro odvod tepla
- Filtry pro odstranění malých titanových částic z řezné kapaliny
- Časté čištění strojů od titanového prachu
- Častější výměna oleje než při běžném broušení ocelí

1.3 Omílání titanu

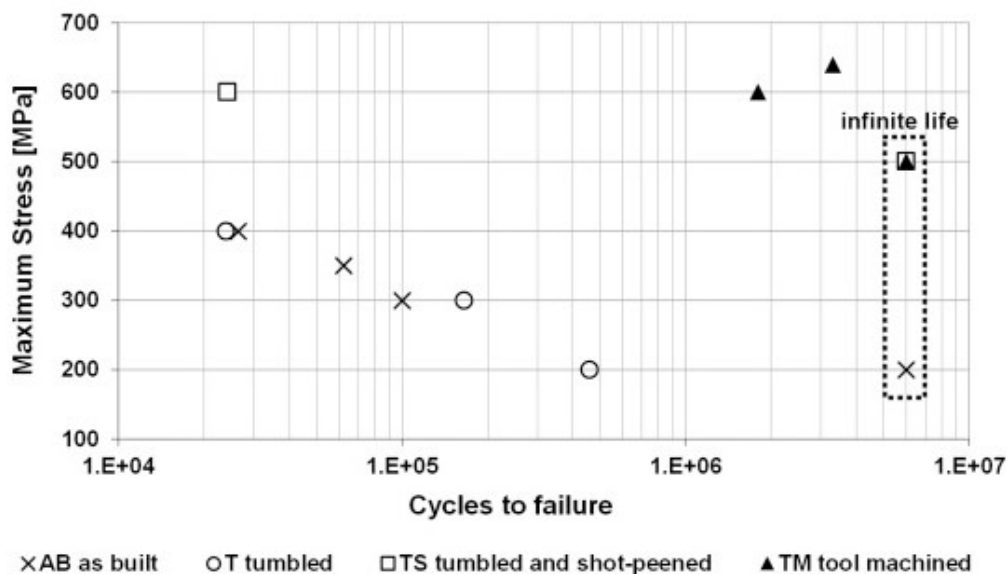
O omílání titanu není publikováno mnoho studií. Za zmínku však stojí studie, která se zabývá mezí únavy titanových zkušebních těles, vyrobených pomocí Powder Bed Fusion (PBF), které jsou následně upraveny pomocí různých dokončovacích operací [7]. Studie porovnává vliv neobrobeného, obrobeného, omílaného a omílaného a následně kuličkováného povrchu. Na následující obrázku je pohled na strukturu povrchu pomocí SEM po třech dokončovacích operacích, a to po obrábění (A), omílání (B) a omílání s následovným kuličkováním (C, D) [7].



Obrázek 3 -Struktura povrchu pořízená pomocí SEM [7].

Neobrobený drsný povrch (A) je tvořen sférickými částicemi o velikosti 5-50 µm. Na omílaném povrchu (B) je možné pozorovat malý podíl rovných ploch, a zároveň je možné pozorovat velký podíl původní struktury materiálu. Na omílaném a následně kuličkováném povrchu (C, D) již téměř není původní struktura materiálu viditelná. Je však možné pozorovat velké rovné plochy a různé rýhy a prohlubně. Na obrázku v části D můžeme pozorovat kuličkováný povrch při větším zvětšení, kde jsou již lépe patrné zbytky původní struktury a částice bohaté na Al. Tyto částice bohaté na Al označené šipkami byly vneseny do materiálu pomocí kuličkování, kde jako médium pro kuličkování byl použit korund (Al_2O_3) [7].

Z výsledků zobrazených na obrázku č. 4 je patrné, že různé způsoby úprav povrchu mají vliv na výslednou mez únavy. Rozdíl meze únavy mezi omílaným a neobrobeným povrchem nelze téměř pozorovat, v některých případech je až zanedbatelný. Oproti tomu je možné pozorovat zvýšení meze únavy až o 150 % u omílání s následným kuličkováním oproti pouhému omílání. Nejlepších výsledků pak dosahuje obrobený povrch, kde se nástrojem odstraňuje povrchová vrstva a s ní se redukuje nebo odstraňuje i povrchové trhliny. Takovýto povrch pak má jiný mechanismus poškození při dosažení meze únavy. U omílání s následným kuličkováním a u obrábění je tak dosahováno maximálního napětí až 500 MPa, při kterém je součást schopna mít teoreticky neomezenou životnost [7].



Obrázek 4 - Výsledky testu [7]

2 Omílací technologie

„Omílání je speciální proces leštění, při kterém se obrobky a lešticí prostředek dostávají do vzájemného pohybu otáčením nebo vibrační strojního zařízení. Úběr materiálu se děje třením a nárazy lešticího prostředku na povrch obrobku“ [8]. „Omílání je používáno tam, kde nejsou nároky na přesnost. Tímto způsobem je dosahováno lepšího vzhledu, potažmo lepší drsnosti povrchu, ale nezpřesňují se rozměry nebo geometrie obrobku. Použití omílání je vhodné například při velkém počtu malých obrobků, nebo u obrobků s obecnou tvarovou plochou, kde klasické metody nelze jednoduše aplikovat“ [9].

Omílání je možné dělit na 2 základní metody, a to na rotační a vibrační. První metodou je rotační omílání, při kterém jsou používány bubny s pohonem, který je roztáčí a jejich optimální obvodová rychlost se pohybuje kolem 55-60 m/min. Pro optimální pracovní podmínky je dobré dosáhnout naplnění bubnu obrobky z 60-65 %. Rotační omílání může oproti vibračnímu dosahovat 10 až 30násobného zvýšení výkonnosti. Tato metoda je vhodná převážně pro menší díly jako jsou čepy, mince, různé klipsy propisovacích tužek a podobně. Druhou metodou je vibrační omílání, u kterého je docíleno rozpořívání omílacího média pomocí vibrací. Při omílání je pak obecně dosahováno drsností povrchu Ra v rozmezí 0,4-0,1 um [8;10;11].



Obrázek 5 - Příklad kruhového vibrátoru [12]

V současné době výrobci omílacích zařízení nabízí spoustu vlastních řešení, která se hodí pro širokou škálu výrobků. Na trhu jsou výrobci nabízející stroje v klasickém provedení, jako např. omílací bubny, nebo naopak výrobci, kteří tuto základní technologii upravili a vnesli do ní něco nového, čímž rozšířili oblast použití klasického omílání. Těmto upraveným omílacím technologiím bude věnována samostatná kapitola. Na trhu je také nepřehledné množství různých brusných tělísek všech tvarů a velikostí v keramickém nebo plastovém provedení, ale i jiná brusná tělíska, jako jsou například skořápky, skleněné kuličky a podobně. A v neposlední řadě je na výběr také z mnoha různých kompoundů, které mají různé použití, od prevence koroze až po vyjasňování omílaných dílců [8].

2.1 Základní omílací technologie

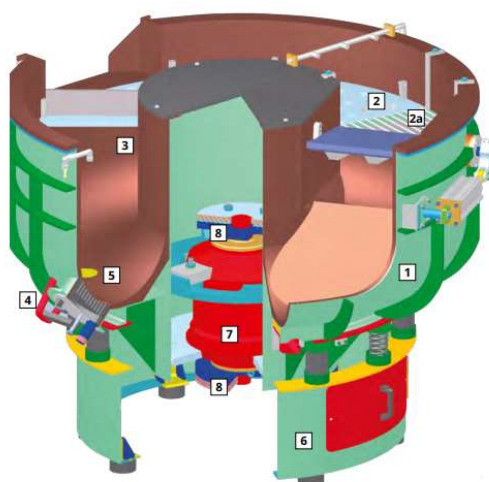
Mezi základní omílací technologie dostupné na trhu patří:

- Kruhové vibrátory
- Žlabové vibrátory
- Disková odstředivá zařízení

Tyto stroje fungují na základním principu omílání a nabízí je i menší výrobci. Liší se od sebe především tvarem zařízení (kruhové nebo žlabové) a způsobem omílání (rotační, vibrační nebo odstředivé) [8].

Kruhové vibrátory

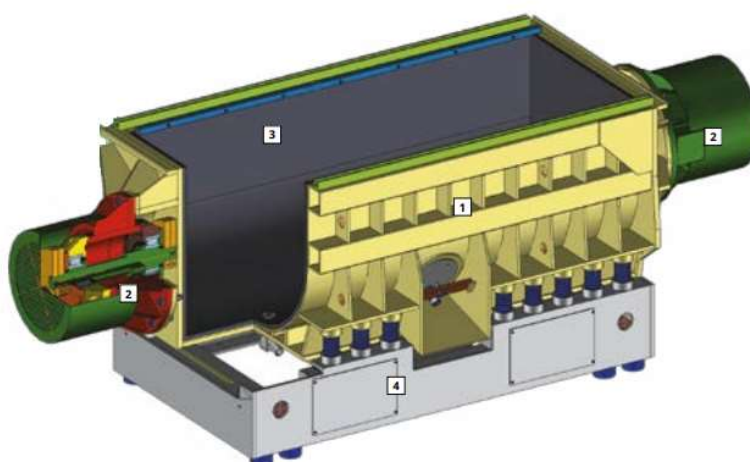
Kruhové vibrátory patří mezi základní tvar omílacích zařízení pro vibrační omílání. Dají se vyrábět v různém rozmezí velikostí od malých stolních vibrátorů s objemem pracovního bubnu 6 l, které jsou využívány například na leštění šperků, až po velké vibrátory s objemem až 3500 l, které jsou využívány například pro leštění hřídelů. Jejich konstrukce také může být uzpůsobena pro automatické linky [8;13;14].



Obrázek 6 - Řez kruhovým vibrátorem [14]

Žlabové vibrátory

Využívají se všude tam, kde i ty největší kruhové vibrátory jsou nedostatečné, zejména tam, kde nevyhovují rozměrům omílaného obrobku. Hodí se také na opracovávání velkých dílů náchylných na poškození. Nádoby žlabových vibrátorů se vyrábí v objemech 30–6000 l [15].



Obrázek 7 - Řez žlabovým vibrátorem [15]

Disková odstředivá zařízení

Jsou vhodná především pro drobné díly, jako jsou například podložky pro šrouby nebo šperky. Mohou však být použita i pro středně velké díly. Běžně jsou dostupná o objemu bubnu 18-50 l. V tomto případě je pracovní médium udáváno do pohybu pomocí rotujícího disku na dně nádoby. Mezera mezi diskem a nádobou pak určuje, jak velká brusná tělíska mohou být použita. V některých případech může být použito granulátu o průměru pouhých 0,2 – 0,4 mm [16].



Obrázek 8 - Diskové odstředivé zařízení [16]

Sušící zařízení

Jedná se o přídavnou technologii k omílacím zařízením, kdy je nutné omílaný obrobek osušit. K tomu slouží sušičky v různých provedeních, jako je vyhřívaná kruhová sušička, vibrační, bubnová nebo pásová sušička. Využívá se zde buďto proudu horkého vzduchu nebo sušícího média, které absorbuje vlhkost [13;17].

2.2 Modifikované omílací technologie

Tyto omílací technologie nabízí až větší specializovaní výrobci. Přidávají k základnímu omílání další techniky, jako je například protahování dílu skrze omílací médium, s možností současného natáčení či naklánění dle potřeby. Díly tak při těchto technologiích nejsou většinou vhozeny do omílacího média, ale jsou upevněny do přípravků nebo zachyceny například pomocí robotických manipulátorů. V následující části budou jednotlivé technologie podrobněji rozepsány.

2.2.1 Proudové omílání

Kinematika

U proudového omílání je obrobek upnut v držáku a ponořen do rotující nádoby s brusným nebo leštícím médiem. V průběhu omílání je možné obrobek ponořit do média pod potřebným úhlem a obrobek otáčet kolem své osy podle potřeby. Společně s velkými silami při tomto procesu nabízí proudové omílání intenzivnější, rychlejší a ekonomičtější opracování obrobku. Společnost OTEC pak nabízí dovybavení jednotek proudového omílání o technologii Pulsfinish (pulsní omílání), která je založena na přesně definovaném a prudce se měnícím relativním pohybu mezi médiem a obrobkem [18].

Možnosti technologie (výrobce OTEC):

- Maximální délka obrobku až 400 mm, s pulsním omíláním až 250 mm
- Maximální hmotnost obrobku až 15 kg
- Maximální rychlost rotace obrobku 40 ot/min, s pulsním omíláním 2000 ot/min
- Průměr procesní nádoby 780-1200 mm

Použití technologie:

- Leštění ozubených kol, lopatek turbín, šnekových pohonů
- Zaoblování řezných hran řezných nástrojů
- Obrobky se složitou geometrií
- Odjehlování
- Zaoblování
- Vyhlazování
- Leštění

Dosahované drsnosti

Pomocí této technologie je možné dosahovat drsností $R_a = 0,01 \mu\text{m}$ [18;19].



Obrázek 9 - Proudové omílací zařízení [18]

2.2.2 Vlečné omílání

Kinematika

Oproti proudovému omílání, kde je obrobek ponořen do rotujícího média, je zde pracovní médium stacionární a obrobek je naopak skrze médium protahován. K tomu je využit rotující karusel opatřený až dvanácti otočnými vřeteny, do kterých jsou upevněny speciální přípravky s obrobkem. Obrobek se poté ponoří do pracovního média a je jím protahován pomocí rotace kolem hlavní osy karuselu a zároveň je obrobek otáčen kolem své osy. Díky tomuto rychlému pohybu vzniká vysoký přitlačný tlak mezi obrobkem a médiem. V případě suchého procesu je používáno chladícího systému pro udržení nízké teploty při omílání. V případě mokrého procesu jsou použity vibrace k rovnoměrnému rozložení kapaliny [20;21].

Možnosti technologie (výrobce OTEC):

- Maximální délka obrobku 280 mm
- Maximální hmotnost obrobku 20 kg
- Maximálně 6 upínacích zařízení pro přípravky obrobků [20]

Možnosti technologie (výrobce ROSLER):

- Maximální délka obrobku 600 mm
- Možnost nastavení úhlu ponoření v rozmezí 0-25 stupňů
- Maximálně 12 upínacích zařízení pro přípravky obrobků [21]

Použití technologie:

- Vhodné pro hodnotné obrobky náchylné na poškození
- Držáky nástrojů
- Řezné nástroje
- Kolenní klouby
- Písty
- Turbínové lopatky
- Odjehlení
- Broušení
- Finální úprava s vysokým leskem [20;21]

Dosahované drsnosti

Výrobce Rösler neudává dosahované drsnosti. Výrobce OTEC uvádí dosahované drsnosti povrchu $R_a = 0,02 \text{ um}$, $R_z = 0,14 \text{ um}$ [22].



Obrázek 10 - Zařízení pro vlečné omílání [21]

2.2.3 Surf-Finisher

Kinematika

Jedná se o kombinaci proudového a vlečného omílání. „Buben s pracovním médiem rotuje kolem své osy, obrobek, který drží 6osé robotické rameno, má naprogramovanou trasu obrobku skrze rotující médium. Obrobek se tak může v průběhu procesu natáčet do požadovaných úhlů, případně může být protahován médiem po zadané trase.“ [9]

Možnosti technologie:

- Suchý nebo mokrý proces
- Možnost vysoké automatizace
- Možnost natočení a protahování obrobku skrze médium dle potřeby díky plně programovatelnému 6osému robotickému ramenu

Použití technologie:

- Kontrolované začišťování
- Odstraňování ostrých hran
- Dokončovací operace bez opracování nežádoucích povrchů
- Komplikované obrobky

Dosahované drsnosti

Výrobce Rösler udává, že Surf-Finisher (viz obrázek č. 11) je schopný na většině komplikovaných obrobků dosahovat drsností povrchu $Ra=0,04 \mu\text{m}$ [23;24].



Obrázek 11 - Surf-Finisher [24]

2.2.4 ISF®

Kinematika

ISF® neboli izotropické superfinišování bylo vyvinuto firmou REM Surface Engineering. Jde o chemicky urychlené omílání, kde účelem technologie je výroba vysoce kvalitních dílů s maximální možnou ochranou hran. Používají se například standardní kruhové vibrátory nebo vibrační žlaby. Pracovní médium pak mechanicky odebírá materiál a zároveň v procesu účinkují kyselá aditiva, která na obrobcích vytváří tenkou oxidovanou vrstvu, kterou opět pracovní médium mechanicky odebírá.

Možnosti technologie:

- Dle zvolené omílací technologie

Použití technologie:

- Turbínové lopatky
- Ozubená kola
- Klikové hřídele
- Závodní převodové díly
- Díly v letectví a kosmonautice

Dosahované drsnosti

Dle výrobce je možné dosahovat velmi jemných povrchů s drsností $R_a = 0,02 \mu\text{m}$, $R_z = 0,14 \mu\text{m}$ [25].

2.3 Omílací tělíska

Omílací tělíska tvoří hlavní složku pracovního média a určují tak jeho omílací vlastnosti. Vhodná volba tělísek je důležitá pro správnou funkčnost omílacího procesu. Tělíska se vyrábějí především ze dvou základních materiálů, a to je keramika nebo plast, dále se liší svým tvarem a velikostí a výslednou velikostí úběru materiálu. Všechny tyto aspekty je třeba zohlednit při vhodném výběru omílacích tělísek, aby bylo dosaženo požadovaného povrchu [26-29].

Keramická tělíska

Patří mezi základní omílací tělíska. Jsou dostupná v různých tvarech (trojúhelník, válec, kužel, hvězda apod.) v kombinaci s různou velikostí pohybující se od 2x2 mm (trojúhelník) až po největší 60x60 mm (trojúhelník). Jsou vhodná zejména pro odhrotování, broušení a leštění slitin oceli a tvrdých materiálů.



Obrázek 12 - Příklad keramických tělísek [26]

Plastová tělíska

Tato tělíska oproti keramickým mají zhruba poloviční gramáž. Vyrábí se opět v různých tvarech (pyramida, kužel, paraboloid, čočka a další speciální tvary) a v různých velikostech od velikosti 6x6 mm (trojúhelník, kužel) až po největší 80x80 mm (pyramida). Jejich použití je vhodné na omílání a broušení neželezných kovů, drahých kovů nebo nerezové oceli.



Obrázek 13 - Příklad plastových tělísek [26]

Méně běžné materiály

Při omílání je možné se setkat i s jinými materiály tělísek, než je keramika a plast.



Obrázek 14 - Příklad ocelových tělísek [26]

Druh	Použití
Ocelová tělíška	Leštění, leštění do vysokého lesku, tlakové odjehlování drahých kovů. Povrch materiálu pouze vyhlazují a zhutňují
Zirkonové kuličky	Leštění, leštění do vysokého lesku, tlakové odjehlování drahých a železitých kovů
Skleněné kuličky	Jemné odhroťování složitých částí, včetně vnitřních ploch
Dřevěné kostky Kukuřičný granulát	Pro proces sušení
Granulát z vlašských ořechů	Dokončovací leštění do zrcadlového lesku
Spékaná keramika	Jemnozrnny keramický materiál s velmi vysokou hustotou a odolností proti otěru pro leštění a jemné omílání obrobků z kalené oceli

Tabulka 3 - Méně běžné materiály při omílání a jejich použití

2.4 Kompoundy

Jedná se o druhou složku omílacího média, která je tvořena tekutými nebo práškovými aditivy. Kompoundy podporují proces omílání a jejich hlavním úkolem je například ochrana proti korozi u citlivých materiálů, čištění obrobku během procesu, odmašťování, leštění, tvorba pěny a zjasňující efekt. Po skončení omílání je důležité vodu smíchanou s kompoundy vyčistit, a proto je kladen důraz na to, aby tyto složky byly co nejlépe biologicky odbouratelné. Kompoundy je možné dělit na tekuté a práškové. Pro každý typ kompoundu výrobci udávají jeho pH, dávkování, popis, oblast použití a vhodnost daného typu pro konkrétní materiály nebo aplikace [26-29].

2.3 Lešticí a brusné pasty

Tyto pasty patří mezi další používané prostředky pro podpoření procesu omílání. V kombinaci s omílacími tělísky zvyšují tyto pasty brusný účinek. Opět je zde možné najít vlastní označení jednotlivých past výrobcí. Pro každou pastu pak výrobce uvádí oblast použití, vhodnost pro určité materiály, pH, brusný nebo lešticí účinek [26-29].



Obrázek 15 - Brusný prášek [26]

3 Omílací stroj SPM LPG1

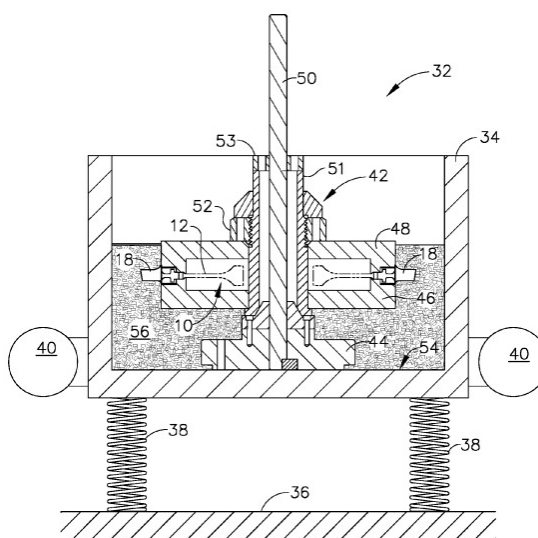
O omílacím stroji od firmy SPM se na webových stránkách výrobce nedají nalézt některé informace, které by vysvětlily princip fungování jejich stroje, případně složení pracovního média. Tyto informace byly získány z patentu [30], který je dostupný na internetu a z osobního poznatku fungování stroje při návštěvě firmy GE-Aviation, ve které probíhalo testování pro praktickou část této práce [30;31].



Obrázek 16 – Omílací stroj SPM LPG1 [31]

3.1 Rozbor technologie

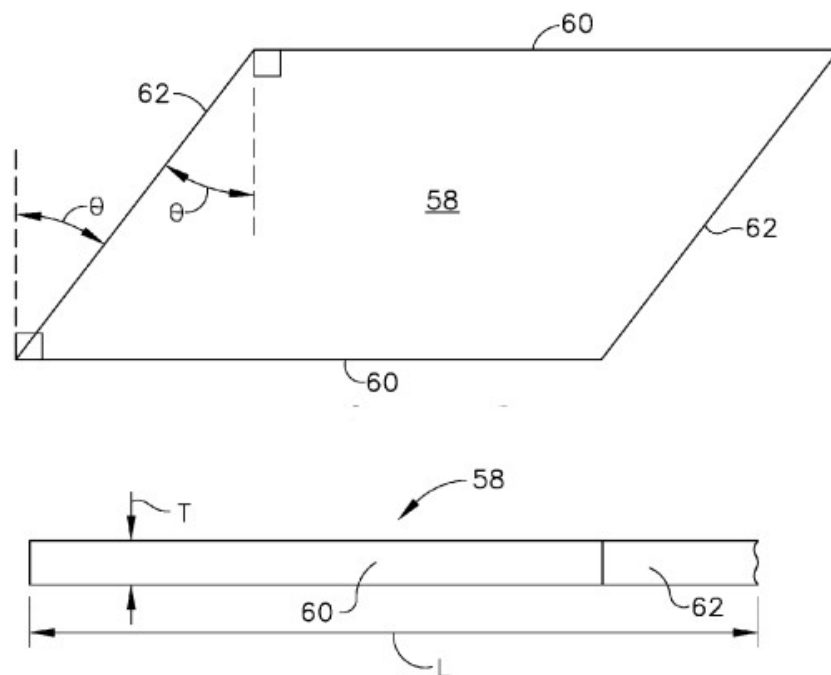
Stroj firmy SPM, na kterém probíhalo testování pro praktickou část, nese označení LPG1. V principu se jedná o vibrační omílání na mokro. Pracovní prostor je tvořen nádobou ve tvaru kvádru o rozměrech 500xH500xV600 mm. Na dně nádoby je umístěn elektromagnet, s jehož pomocí se do pracovního prostoru upínají přípravky s obrobky nebo přímo obrobky samotné. Maximální výška omílaného obrobku je 350 mm.



Obrázek 17 - Schéma pracovního prostoru [30]

Pomocí elektromotoru je docíleno rozvibrování pracovního prostoru, ve kterém obíhá pracovní médium kolem pomyslné horizontální osy ve středu nádoby, která je zároveň rovnoběžná s osou elektromotoru. Podle smyslu otáčení hřídele elektromotoru je možné ovlivňovat směr proudění pracovního média kolem osy jedním nebo druhým směrem. Během procesu omílání se standardně programuje pravidelná změna směru proudění média v poměru 1:1, aby došlo k rovnoměrnému omílání na celé ploše obrobku.

Pracovní médium se skládá ze tří částí. První jsou měděné plátky ve tvaru rovnoběžníku, kde tento tvar umožňuje plynulé obtékání kolem obrobku během lešticího procesu. Velikost měděných plátek se volí dle velikosti omílaného obrobku, pro větší obrobky jsou voleny větší plátky a opačně. V našem případě má měděný plátek tloušťku 1 mm, stranu dlouhou 5 mm, výšku 3 mm a úhel zkosení θ 30 stupňů. Tyto plátky pak tvoří 98 % hmotnostního objemu pracovního média.



Obrázek 18 - Návrh měděného plátku [30]

Druhá část je brusivo (korund) ve formě prášku, které zajišťuje broušení součásti a tvoří tak 0,05 % hmotnostního objemu. Dále se do pracovního média přidávají kompoundy, které tvoří 2 % hmotnostního objemu. Jedním kompoundem je tekutý sníh sloužící jako lubrikant a smáčedlo, které ulehčuje klouzání tělísek po sobě a zároveň slouží jako ochrana proti korozi. Druhým je saponát, který pomáhá čistit obrobek od třísek.

Pracovní cyklus se skládá z několika po sobě jdoucích částí:

- 1) Fáze plnění pracovním médiem
- 2) Fáze leštění
- 3) Fáze vyjasnění
- 4) Fáze praní
- 5) Fáze odsátí pracovního média

3.2 Klíčové parametry procesu

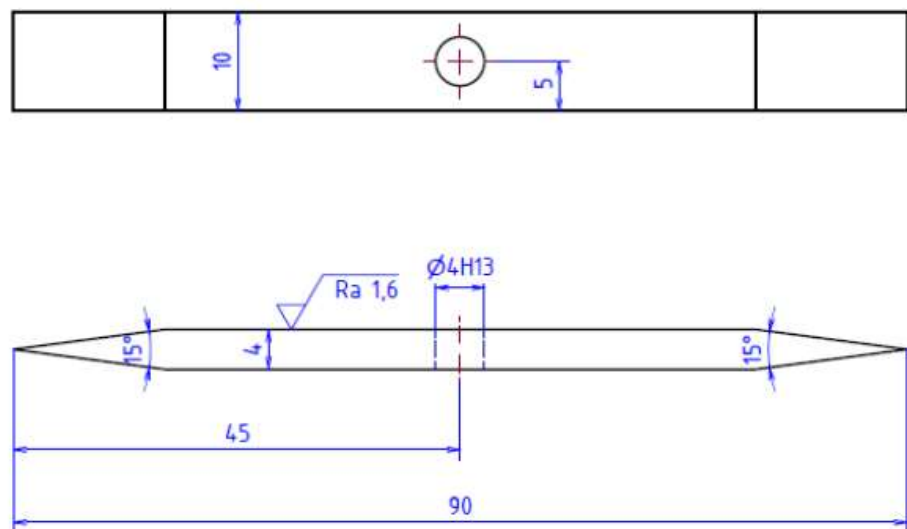
Pro správné nastavení testů je nutné si určit klíčové parametry procesu omílání, které je možné ovlivňovat. Z principu fungování stroje vyplývá, že součást je pevně uchycena na jednom místě a nedochází k jejímu pohybu. Prvním parametrem je tak umístění obrobku do pracovního prostoru a jeho orientace. Umístění bude ovlivňovat výšku pracovního média nad obrobkem, a orientace bude ovlivňovat rychlost proudění kolem obrobku. Je možné očekávat, že při umístění obrobku hlouběji bude vlivem většího tlaku pracovního média docházet k většímu úběru. To samé pak platí pro rychlost proudění pracovního média kolem obrobku. Bude-li rychlost větší, dá se očekávat větší úběr a naopak. Druhým parametrem bude množství přidaného abraziva, které bude ovlivňovat výsledný úběr při broušení. Třetím parametrem je čas omílání. Při delších časech je možné očekávat větší úběr materiálu.

4 Výroba zkušebních tělísek

V následující kapitole budou popsány použité stroje, nástroje, přípravky, polotovary a bude popsán výrobní postup zkušebních tělísek. Takto vyrobená tělíska byla používána při testech a následně na nich byly vyhodnocovány vlivy jednotlivých parametrů omílání ve stroji LPG1 od firmy SPM. Předem navržená tělíska nebylo vzhledem k měřeným parametrům nutné nějakým způsobem modifikovat, proto si zachovávají svůj původní navržený tvar. Jediná modifikace, která byla nutná pro měření zaoblení ostří, se musela provést až po samotném experimentu.

4.1 Polotovary

Jako materiál zkušebních tělísek byla zvolena slitina titanu Ti6Al4V, která je používána i pro lopatky kompresoru. Navrhnutá tělíska mají tloušťku 4 mm, délku 90 mm a šířku 10 nebo 20 mm (při výrobě došlo k úpravě několika rozměrů a z tohoto důvodu má několik vzorků šířku 10 mm a zbylé vzorky již šířku 20 mm, jejich tloušťka byla zmenšena na 3 mm). Na obou stranách zkušebních tělísek se nachází ostrý vrcholový úhel o velikosti 15 stupňů. Jako polotovary byl zvolen titanový plech o tloušťce 5 mm a o rozměrech 210x1000 mm, který byl následně dělen na pile a zarovnán na frézce.



Obrázek 19 - Navrhnuté zkušební tělísko [32]

4.2 Stroje, nástroje

V následující části budou popsány jednotlivé použité stroje, nástroje a přípravky.

Frézka VMC 500

VMC 500 je tříosá vertikální frézka. Vrtání bylo provedeno pomocí karbidového vrtáku od firmy Kennametal o průměru 4,3 mm.

Bruska BRH 20 CNC. - bruska na plocho

Jedná se přesnou rovinnou brusku s jednoduchým CNC řízením pro broušení v automatickém cyklu nebo s ručním ovládáním. Disponuje cykly pro všechny běžné způsoby rovinného broušení [33].

Základní technické parametry

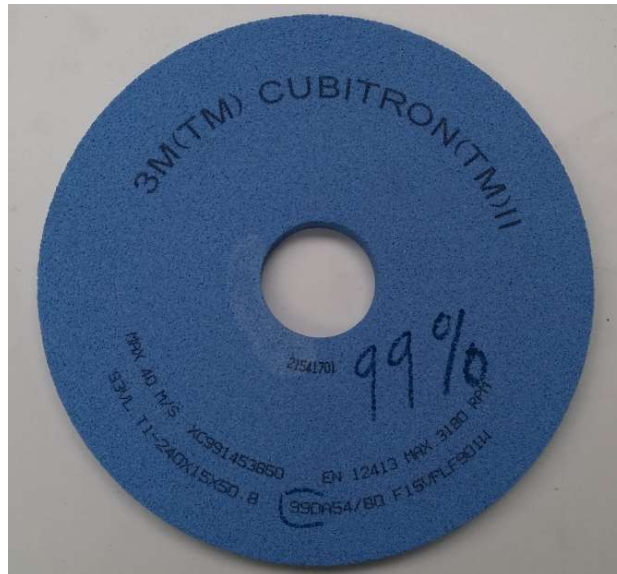
Rozměr pracovního stolu	200 x 600 mm
Podélný posuv stolu	600 mm
Příčný posuv stolu	250 mm
Vzdálenost osy kotouče od stolu	525 mm
Nejmenší inkrement přídavku (osa Y)	0,0005 mm
Rozlišení polohování příčné osy (osa Z)	0,001 mm
Maximální rychlost pohybu stolu	25 000 mm/min
Brousící kotouč	250x76x20 mm
Otáčky brousícího vřetena	2670, 3820 ot/min (plynulá změna otáček)
Výkon hlavního motoru	2,2 kW

Tabulka 4 - Základní technické parametry brusky BRH 20 CNC [33]



Obrázek 20 – Bruska na plocho BRH 20 CNC

Broušení bylo provedeno brusným kotoučem 3M Cubitron II – 99DA54/80 o průměru 240 mm, šířky 15 mm, s vnitřním otvorem na upnutí o průměru 50 mm. Kotouč je vyroben z umělého korundu s keramickým pojivem. Při broušení bylo použito brusné emulze RHENUS XY 100 RS. Je vhodná pro všechny brusné operace, nabízí také dobrou protikorozní ochranu [34;35].



Obrázek 21 - Brusný kotouč 3M Cubitron II

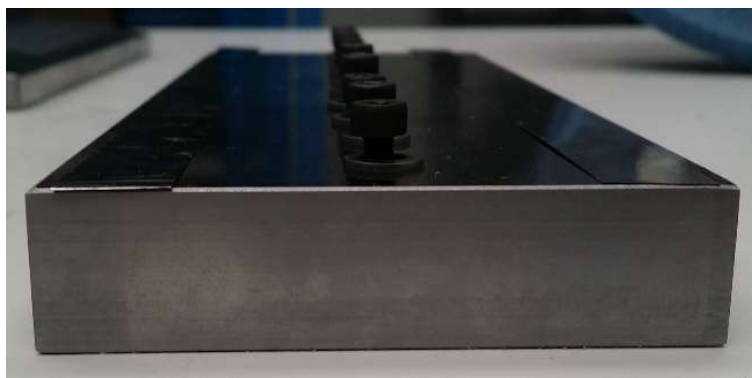
Aby bylo možné titanový plech zbrousit do požadovaného tvaru, bylo nutné použít následující přípravky.

Přípravek pro broušení horizontální plochy

Tento přípravek byl použit pro upnutí titanového plechu, aby se zajistila jeho co největší možná tuhost a nedocházelo tak k jeho deformaci při broušení. Plech byl na středu přitažen k přípravku pomocí šroubů M4 s podložkou skrze vyvrtané díry.



Obrázek 22 - Přípravek na upnutí plechu pro broušení rovinné plochy, pohled shora



Obrázek 23 - Přípravek na upnutí plechu pro broušení rovinné plochy, pohled z boku

Přípravek na broušení ostří

Jelikož ostří zkušební tělíska má úhel 15 stupňů, bylo nutné použít upravené přípravky se sklonem upínací plochy 7,5 stupně, aby bylo možné zkušební tělíska na rovinné brusce nabrousit s požadovaným sklonem ostří. Plech se opět upínal pomocí šroubů M4 s podložkou k přípravku.



Obrázek 24 - Přípravek na upnutí plechu pro broušení ostří, pohled z boku



Obrázek 25 - Přípravek na upnutí plechu pro broušení ostří, pohled shora

Drátořez

Vzorky byly řezány na drátořezu v externí firmě.

4.3 Výrobní postup

1) Vrtání

Nejdříve bylo nutné navrtat do plechu díry s roztečí 10 mm. K tomu byl použit karbidový vrták od firmy Kennametal o průměru 4,3 mm a tříosá vertikální frézka VMC 500. Plech byl upnut ve stroji pomocí svěráku. Byla použita řezná rychlost 50 m/min a posuv 0,05 mm/ot.

2) Broušení plochy

Pomocí navrtaných děr se pomocí šroubů M4 upnul plech na přípravek pro broušení. Poté se přípravek upnul do brusky. Při broušení byly použity následující řezné podmínky, které zobrazuje tabulka č. 5.

Řezné podmínky	
Řezná rychlost (v_c)	25 m/s
Rychlost podélného posuvu obrobku (v_f)	13 m/min
Příčný krok obrobku na průchod (z)	1,5 mm
Hrubování	
Pracovní záběr (a_e)	0,01 mm

Tabulka 5 - Řezné podmínky pro broušení plochy

Vysoká rychlost podélného posuvu obrobku byla zvolena z toho důvodu, aby se styk brusného kotouče s obrobkem minimalizoval a nevznikalo tak přebytečné teplo, které je nutné odvádět pomocí brusné emulze. Jelikož brusný kotouč má šířku 15 mm, bylo nutné nastavit příčný posuv kotouče po každém přejezdu, aby došlo k požadovanému zbrúšení celé plochy obrobku. Tento postup se musel opakovat celkem čtyřikrát, jelikož upnutí obrobku pomocí šroubů na jeho středu znemožňovalo obrousit jednu stranu obrobku na jedno upnutí. Tyto rovinné plochy byly pouze hrubovány.

3) Broušení vrcholového úhlu

Dále bylo nutné plech přeupnout na nový přípravek, který má rovnou plochu sklopenou pod úhlem 7,5 stupně, aby bylo možné docílit požadovaného vrcholového úhlu. Před broušením na čisto byl kotouč nejprve orovněn, aby se obnovila jeho původní geometrie. Po broušení na čisto bylo provedeno vyjiskření. 12 průchodů bylo zvoleno kvůli nedokonale tuhému upnutí obrobku, kdy se titanový plech může lehce prohýbat a kroutit a na méně průchodů by tak nemuselo dojít k dostatečnému vyjiskření. Tento postup se také musel opakovat celkem čtyřikrát ze stejných důvodů jako v druhém kroku. Řezné podmínky zobrazuje tabulka č. 6.

Řezné podmínky

Řezná rychlost (v_c)	25	m/s
Rychlost podélného posuvu obrobku (v_f)	13	m/min
Příčný krok obrobku na průchod (z)	1,5	mm

Hrubování

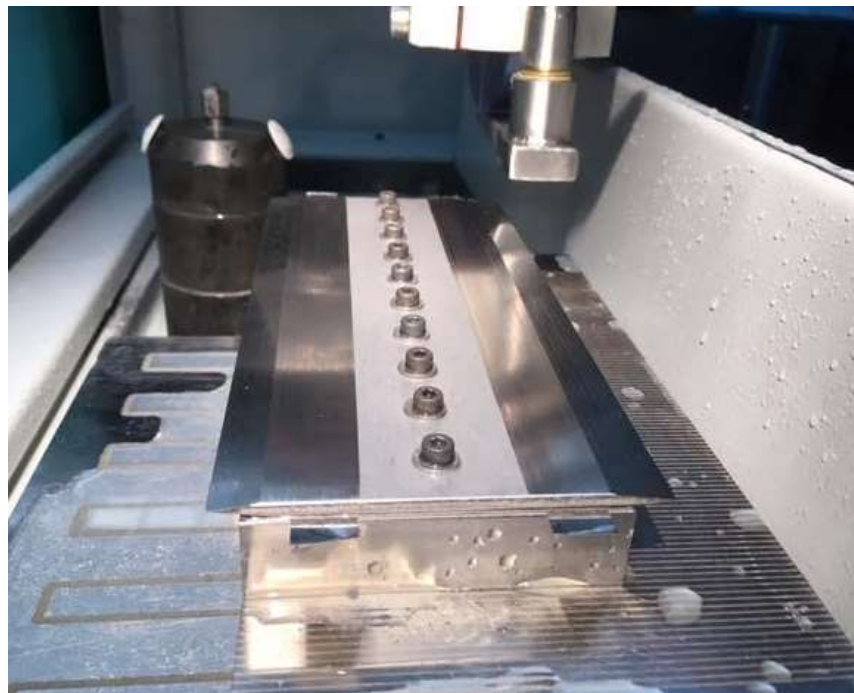
Pracovní záběr (a_e)	0,01	mm
Přídavek pro broušení na čisto	0,05	mm

Na čisto – nově ořovaný brusný kotouč

Pracovní záběr (a_e)	0,002	mm
Počet vyjiskření	12	

Tabulka 6 - Řezné podmínky pro broušení vrcholového úhlu

Na následujícím obrázku je pohled na upnutý titanový plech na přípravku po dokončení prvních tří výrobních kroků. Takto zbroušený plech se následně odeslal do externí firmy na drátořez, kde proběhlo nařezání zkušebních tělísek s požadovanou šířkou.



Obrázek 26 - Pohled na zbroušený titanový plech po prvních třech krocích výroby

4) – Nařezání plechu

Nařezání nabroušeného plechu proběhlo v externí firmě pomocí drátořezu.

Výsledné vzorky

Na následujících obrázcích jsou dokončená a nařezaná zkušební tělíska. Celkem bylo vyrobeno 19 zkušebních tělísek o šířce 10 mm, 36 tělísek o šířce 20 mm a 5 tělísek s atypickou šířkou vzniklou umístěním vzorku na krajích plechu.



Obrázek 27 - Dokončená zkušební tělíska šířky 10 mm



Obrázek 28 - Dokončená zkušební tělíska šířky 20 mm

4.4 Popis vzorků

Výsledné nařezané vzorky bylo nutné označit tak, aby po omílání byl stále čitelný jejich popis. Byl použit popisovač kovů Original Arkograf od firmy Schäfer, pomocí kterého byla popsána jednotlivá zkušební tělíska.



Obrázek 29 - Original Arkograf

Jelikož bylo nutné, aby bylo možné jednoznačně určit číslo vzorku a jeho strany, byl použit jednoduchý systém popisu zkušebních tělísek. Jedna strana byla popsána dle vzoru AXB, kde A označuje stranu A, X označuje číslo vzorku, B označuje stranu B.

Takto označené vzorky pak bylo možné jednoduše orientovat na zkušební rám ve stejném směru a také bylo možné je jednoduše upínat pro měření na souřadnicovém měřícím stroji, aniž by došlo k záměně stran.

Tři druhy popsaných vzorků



Obrázek 30 - Vzorky 1-19, šířka 10 mm



Obrázek 31 - Vzorky 20-37, šířka 20 mm



Obrázek 32 - Vzorky 56-60, různé šířky

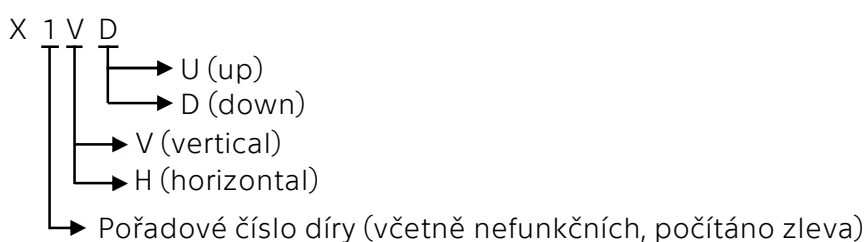
5 Příprava experimentu

5.1 Označení a upínání

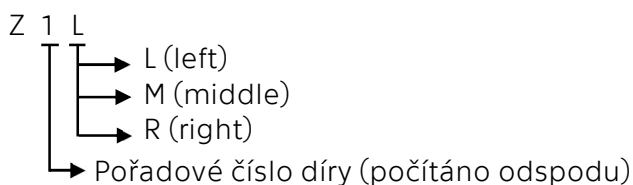
Označení

Před upnutím zkušebních těles na zkušební rám bylo nutné vymyslet označení jednotlivých pozic na zkušebním rámu. Pro tyto účely bylo použito označení pozic na zkušebním rámu následujícím způsobem.

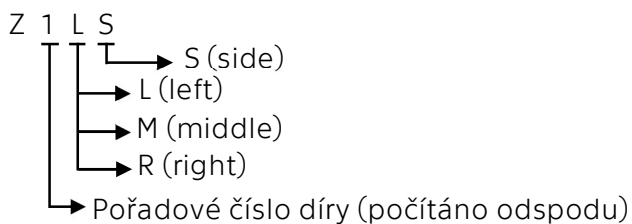
Vodorovné:



Svislé:

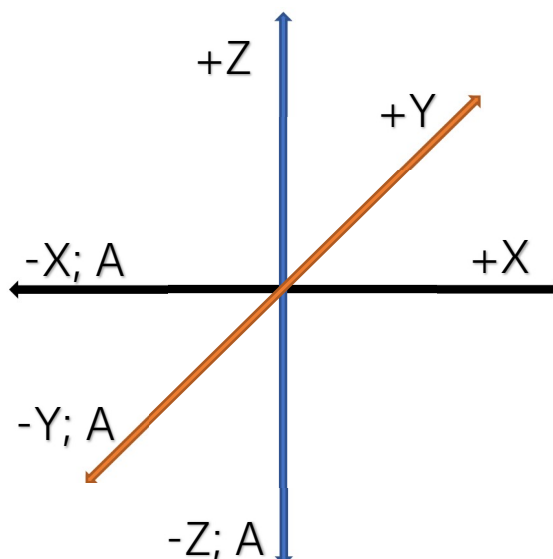


Svislé z boku:



Upínání zkušebních tělísek

Zkušební tělíška jsou na rám upínána vždy tak, aby strana A směřovala podle souřadného systému do záporného směru a strana B do kladného. Souřadný systém je zobrazen na obrázku č. 33. K upnutí vzorků ke zkušebnímu rámu bylo použito šroubů s vnitřním šestihranem M4x30, matice M4 a podložek.



Obrázek 33 - Souřadný systém rámu a orientace tělísek

Zároveň je nutné dodržovat upnutí tělíska k rámu tak, aby popsaná plocha byla vždy pohledová a nepopsaná plocha se dotýkala rámu. Na následujícím obrázku je patrný systém upínání tělísek, souřadnicový systém a popisky jednotlivých pozic.



Obrázek 34 - Osazení zkušebního rámu, souřadnicový systém a systém pozic

5.2 Způsoby měření

Volba místa pro měření

Pro co nejpresnější měření tloušťky zkušebního tělíska před a po omílání bylo nutné zvolit vhodné místo pro měření. Jelikož titanový plech byl upnut na středu pomocí šroubů, nemohl ho brusný kotouč přejet v jednom směru celou svou šířkou

a z tohoto důvodu byl přídavek na hloubku realizován pouze v jedné úvrati. Kvůli nerovnoměrnému opotřebení kotouče tak vznikla rovná plocha pouze tam, kde kotouč mohl projít celou svou šířkou. Z toho důvodu bylo místo měření zvoleno co nejbližší k začátku sklonu ostří.

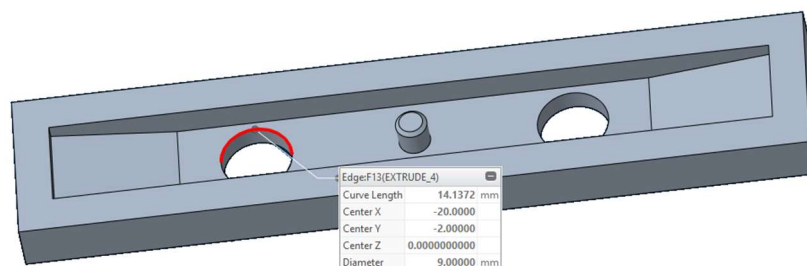


Obrázek 35 - Oblast vhodná pro měření

Návrhy způsobů měření úběrů

První varianta

Měření by probíhalo za pomoci mikrometru, aby bylo co nejjednodušší. Pro tento účel byl vymyšlen jednoduchý přípravek, který by se dal vytisknout pomocí SLA 3D tiskárny. V přípravku je umístěn kolík, pomocí kterého by bylo přes díru vycentrováno zkušební tělísko. Dále jsou v přípravku dva otvory, skrze které by se měřila tloušťka tělíska před a po omílání vždy ve stejném místě. Výhoda tohoto způsobu je rychlé a snadné měření téměř kdekoli bez potřeby složitých měřicích zařízení. Nevýhodou by byla větší chyba měření způsobená člověkem a omezený počet měřitelných bodů způsobený rozměrem dotyku mikrometru.



Obrázek 36 - Navrhnutý přípravek pro ruční měření



Obrázek 37 - Řez přípravkem s umístěným zkušebním tělískem (červeně)

Druhá varianta

Měření by probíhalo pomocí souřadnicového měřicího stroje Zeiss Prismo a programu Calypso. Zkušební tělísko by se vždy upínalo pomocí svěráku na stejné místo ve stejné orientaci a byl by spuštěn měřicí program, který by si zkušební tělísko vyrovnal a provedl měření. Výhoda tohoto způsobu spočívá ve velmi přesném měření a možnosti měřit více bodů na malé ploše. Nevýhodou je, že měření se nedá provádět kdekoli a je nutné disponovat souřadnicovým měřicím strojem.

Vybraná varianta

Výroba zkušebních tělísek z titanu nebyla jednoduchá, jelikož se titanový plech při broušení vlivem tepla a řezných sil různě ohýbal a kroutil, proto vzniklo několik zkušebních sad tělísek s různými nuancemi v rozměrech, jako je jejich délka nebo šířka. Bylo by tak nutné vytisknout několik sad přípravků pro ruční měření mikrometrem a následně jejich správné přiřazení k jednotlivým tělískům, aby došlo k měření tloušťky ve správném místě. Dalším omezením by byla možnost měřit tělíska v jednom bodě. Oproti tomu měření pomocí souřadnicového měřicího stroje má více výhod, jako například:

- větší přesnost měření
- lepší opakovatelnost
- možnost měřit na více místech
- není potřeba různých přípravků pro měření
- poloautomatické měření

Po zvážení všech výhod a nevýhod bylo zvoleno měření zkušebních tělísek pomocí souřadnicového měřicího stroje Zeiss Prismo. Měření tloušťky tak probíhalo na vyznačených místech na obrázku níže. Pro vzorky šířky 10 mm byly zvoleny 2 body na každé straně vzorku a pro vzorky šířky 20 mm pak 3 body na každé straně.

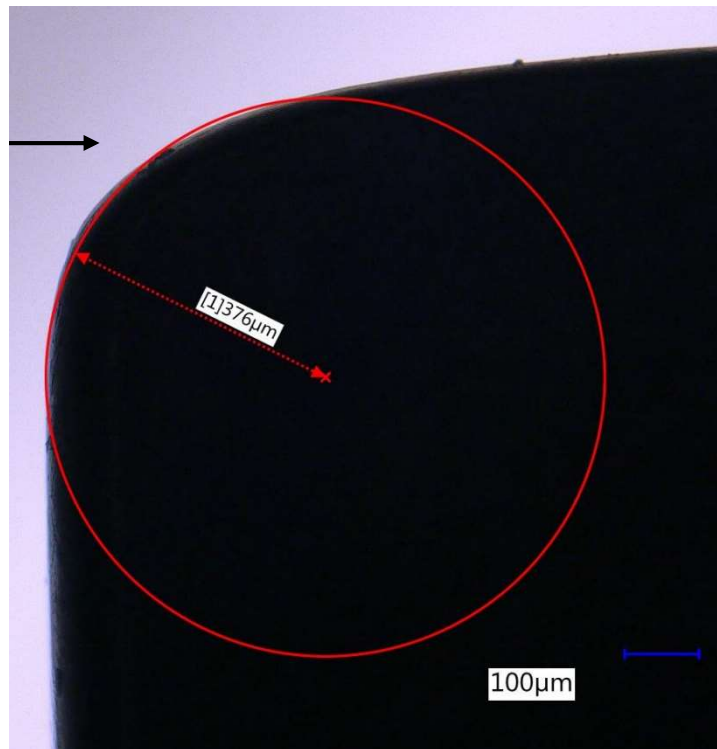


- Místa měření pro vzorek šířky 10 mm
- Místa měření pro vzorek šířky 20 mm

Obrázek 38 - Vyznačená místa pro měření tloušťky vzorku

Způsob měření zaoblení

Dalším parametrem, který byl sledován, bylo zaoblení špičky ostří. Pro jeho vyhodnocení bylo nutné vzorky zbrousit z důvodu velkého zaoblení jeho hran, které je patrné na obrázku č. 39. Kvůli takto zaoblené hraně nebylo možné mikroskop vhodně zaostřit na hranu ostří při pohledu ve směru šipky zobrazené na obrázku.



Obrázek 39 - Zaoblená hrana po omílání

Z tohoto důvodu byla hrana tělísek zbroušena o 0,5 mm, aby bylo možné pozorovat zaoblení špičky ostří. Na obrázku č. 40 je šipkou naznačen směr pohledu na zaoblení špičky ostří.



Obrázek 40 - Zbroušené vzorky pro vyhodnocení zaoblení ostří

Výsledný zbrošený vzorek byl pozorován pomocí mikroskopu VHX-6000. Vyhodnocení proběhlo ručně pomocí softwaru dodávaného k mikroskopu. Velikost zaoblení byla určována pomocí vepsané kružnice do špičky ostří.



Obrázek 41 - Mikroskop VHX-6000

Měření úbytku hmotnosti

Současně při měření úběrů materiálu byl měřen i úbytek hmotnosti. Pro tyto potřeby byla použita přesná váha od firmy Radwag WPS 110/C.



Obrázek 42 - Základní parametry váhy WPS 110/C

6 Experiment

Z rozboru technologie omílání od firmy SPM vyplynulo následující: Součást je pevně uchycena na jednom místě a nedochází k jejímu pohybu. Vliv na omílání tak můžou mít následující parametry:

- Výška naplnění měděnými plátky
- Množství přidaného abraziva měřené v gramech
- Čas omílání
- Umístění a orientace omílaného tělesa v prostoru
- Směr proudění abraziva

Na základě těchto parametrů je možné při testech ovlivňovat následující proměnné:

Umístění a orientace tělísek

Pomocí vhodného umístění tělísek je možné zjistit vliv umístění a orientace tělísek skrze celý pracovní prostor na úběr materiálu, zaoblení hran apod. Zkušební rám dovoluje umístit tělíska do různých výšek na středu pracovního prostoru a po jeho stranách. Z důvodu omezeného množství zkušebních tělísek bylo nutné zvolit chytré rozmístění na zkušební rám, pro zjištění všech potřebných míst, bez zbytečného opakování. Z tohoto důvodu byla tělíska umísťována například jen na levou stranu (náhodně vybraná strana), nikoli na pravou, jelikož zde předpokládáme stejný účinek omílacího média.

Doba omílání a množství abraziva

Dalším parametrem, který bude rozhodovat o velikosti úběru materiálu a zaoblení hran, bude doba omílání a množství abraziva.

6.1 Hypotézy

Při vyhodnocování testů byla sledována platnost následujících hypotéz. Tyto hypotézy pomohou lépe vyhodnotit vliv umístění a orientace zkušebních tělísek v pracovním prostoru.

1. Hypotéza – Úběr roste s hloubkou

První hypotéza předpokládá, že vzorky na spodku rámu v horizontální orientaci (rovina YX) budou mít větší úběr než vzorky na vrcholu. Větší úběr bude způsoben větším tlakem pracovního média, který bude růst s narůstající hloubkou pod volnou hladinou měděných plátek.

2. Hypotéza – Úběr klesá směrem k ose oběhu

Druhá hypotéza předpokládá, že vzorky v teoretické ose oběhu pracovního média budou mít menší úběr. Tento menší úběr bude způsoben menší rychlostí oběhu pracovního média blíže k teoretické ose oběhu. Čím dále bude zkušební tělísko umístěno od osy oběhu, tím by mělo mít větší úběr oproti vzorku umístěného v ose. Budou sledovány vzorky v orientaci YZ a XZ umístěné na pozicích Z_L a Z_LS.

3. Hypotéza – Větší úběr v orientaci YZ oproti XZ

Třetí hypotéza předpokládá, že vzorky v orientaci YZ budou mít větší úběr než vzorky v orientaci XZ. Větší úběr v orientaci YZ bude způsoben rychlejším obtékáním pracovního média. Tok média v rovině YZ bude přímo dopadat na ostří zkušebního tělíska, které bude tok rovnoměrně s malým odporem rozdělovat a nebude tak téměř docházet ke zpomalování proudění. V případě orientace XZ bude médium narážet na velkou plochu zkušebního tělíska a může tak docházet ke zpomalování pracovního média a k jeho hromadění před zkušebním tělískem, to bude mít za následek menší úběry. Budou sledovány vzorky v orientaci YZ a XZ umístěné na pozicích Z_L a Z_LS.

4. Hypotéza – Úběr klesá směrem ke stranám

Čtvrtá hypotéza předpokládá, že vzorky umístěné na kraji zkušebního rámu budou mít menší úběr než vzorky na středu. Menší úběr bude způsoben pomalejším tokem pracovního média, které u krajů bude zpomalováno stěnami pracovního prostoru. Budou sledovány vzorky na pozicích Z_L; Z_LS a Z_M; Z_MS v orientaci YZ a XZ.

5. Hypotéza – Úběr roste s hloubkou

Pátá hypotéza předpokládá, že vzorky na spodku rámu ve vertikální orientaci (rovina XZ) budou mít větší úběr než vzorky na vrcholu. Větší úběr bude způsoben větším tlakem pracovního média, který bude růst s narůstající hloubkou.

6. Hypotéza – Menší úběr u stěny

Šestá hypotéza sleduje předpoklady 4. hypotézy blíže ke krajům pracovního prostoru. Tato hypotéza předpokládá, že strana A, která je blíže ke krajům, bude mít výrazně menší úběr než strana B, která je od krajů více vzdálená. Budou sledovány vzorky na pozicích Z_L v orientaci XZ.

6.2 První test

První test byl proveden tak, aby se určil vliv pozice a orientace zkušebních tělísek na co nejvíce místech v pracovním prostoru. Zkušební rám byl osazen celkem 15 vzorky. Pro možnost změn dalších procesních parametrů se zvolila vhodná délka omílání a množství abraziva tak, aby bylo možné čas a množství abraziva ubrat, nebo naopak přidat, a zároveň aby byl výsledek pozorovatelný. Osazený rám byl vyfocen a je zobrazen na obrázku č. 43. V tabulce č. 7 je zapsáno osazení rámu, kde má každý vzorek přiřazenou svoji pozici.

Podmínky testu

Délka omílání 120 minut, 1320 g abraziva.

Osazení rámu

Číslo vzorku	Pozice	Číslo vzorku	Pozice
3	X4VU	14	Z1LS
7	X9HD	15	Z10L
8	X10VU	16	Z11LS
9	X7HU	17	X3HD
10	Z5M	18	Z1L
11	Z6LS	19	Z5L
12	Z5MS	60	X10VD
13	X3HU		

Tabulka 7 - Osazení rámu – první test



Obrázek 43 - Osazení rámu – první test

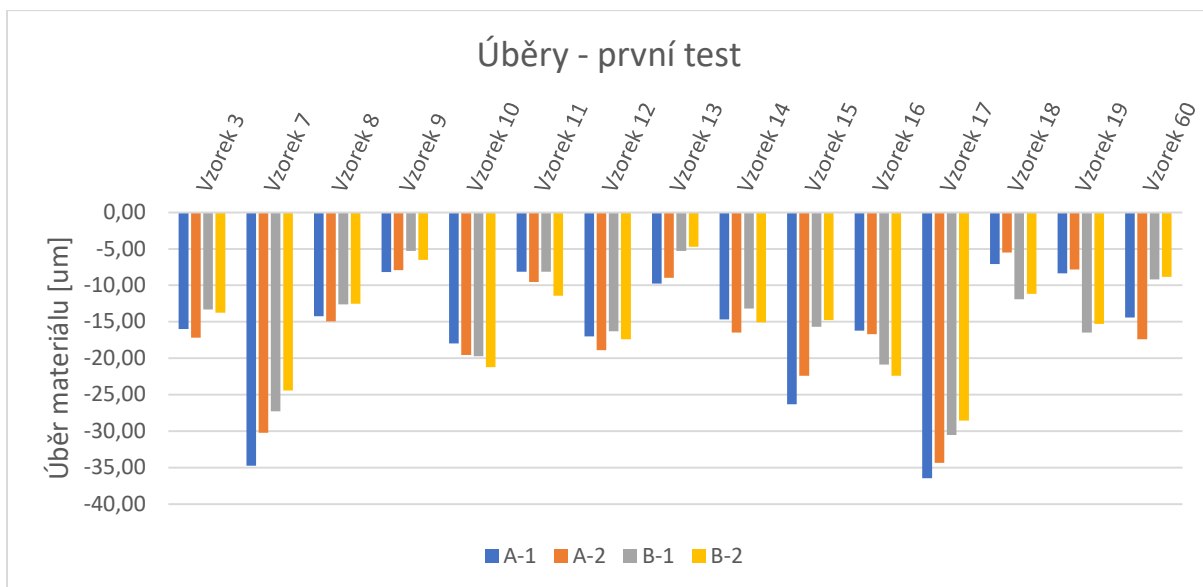
6.2.1 Výsledky

Úběry materiálu

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty pro první test. A-1 a A-2 značí naměřené hodnoty na straně A, B pak značí naměřené hodnoty na straně B. V tabulce jsou zaznamenány hodnoty měření před omíláním, po omílání a jejich rozdíl neboli úběr. Výsledné hodnoty jsou pro lepší porovnání zaneseny do grafu.

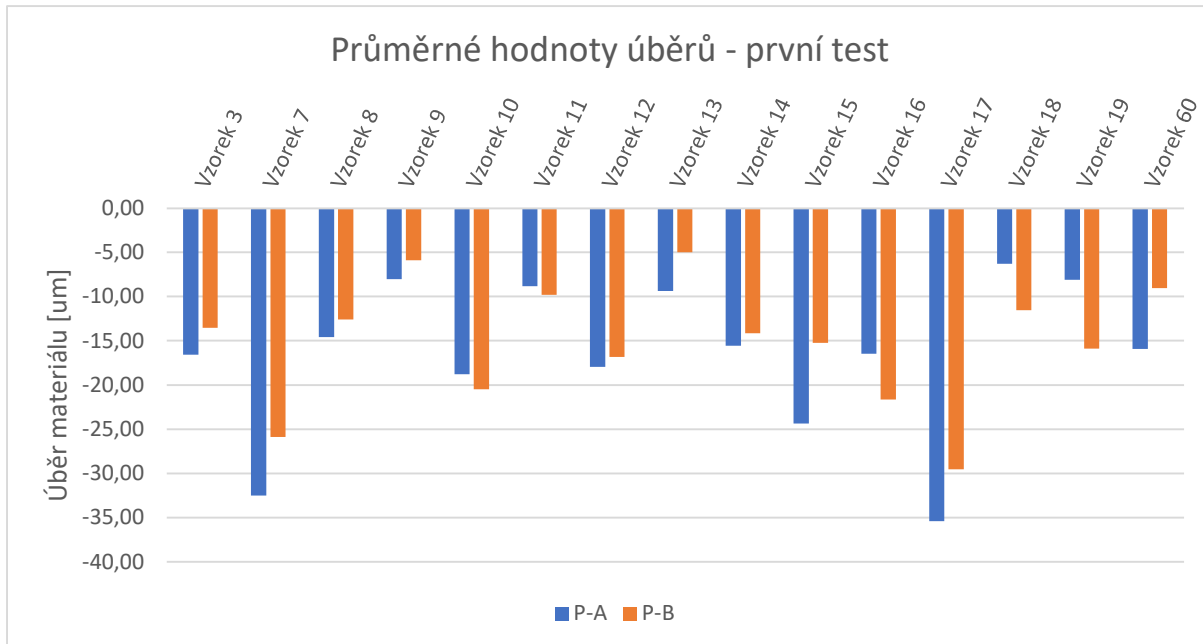
Hodnoty v mm	Vzorek 3			Vzorek 7			Vzorek 8		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	3,0748	3,0589	-0,0160	3,0634	3,0287	-0,0348	3,0571	3,0429	-0,0142
A-2	3,0757	3,0585	-0,0172	3,0619	3,0317	-0,0302	3,0555	3,0406	-0,0149
B-1	3,0445	3,0312	-0,0133	3,0216	2,9943	-0,0273	3,0145	3,0019	-0,0126
B-2	3,0450	3,0313	-0,0138	3,0217	2,9972	-0,0244	3,0135	3,0009	-0,0125
	Vzorek 9			Vzorek 10			Vzorek 11		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	3,0589	3,0507	-0,0082	3,0634	3,0454	-0,0180	3,0579	3,0498	-0,0081
A-2	3,0578	3,0499	-0,0079	3,0649	3,0454	-0,0196	3,0571	3,0476	-0,0095
B-1	3,0216	3,0163	-0,0053	3,0305	3,0108	-0,0197	3,0195	3,0114	-0,0082
B-2	3,0238	3,0173	-0,0065	3,0330	3,0118	-0,0212	3,0210	3,0096	-0,0114
	Vzorek 12			Vzorek 13			Vzorek 14		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	3,0745	3,0574	-0,0170	3,0548	3,0450	-0,0098	3,0614	3,0467	-0,0147
A-2	3,0721	3,0532	-0,0189	3,0550	3,0460	-0,0090	3,0600	3,0435	-0,0165
B-1	3,0410	3,0247	-0,0163	3,0125	3,0072	-0,0053	3,0204	3,0072	-0,0132
B-2	3,0383	3,0209	-0,0174	3,0134	3,0087	-0,0047	3,0209	3,0058	-0,0151
	Vzorek 15			Vzorek 16			Vzorek 17		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	3,0576	3,0313	-0,0263	3,0724	3,0562	-0,0162	3,0627	3,0262	-0,0365
A-2	3,0577	3,0353	-0,0224	3,0728	3,0561	-0,0167	3,0620	3,0276	-0,0344
B-1	3,0126	2,9969	-0,0157	3,0436	3,0228	-0,0209	3,0169	2,9863	-0,0305
B-2	3,0126	2,9978	-0,0148	3,0440	3,0216	-0,0224	3,0152	2,9866	-0,0285
	Vzorek 18			Vzorek 19			Vzorek 60		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	3,0698	3,0627	-0,0071	3,0494	3,0411	-0,0084	2,9943	2,9799	-0,0144
A-2	3,0681	3,0626	-0,0055	3,0525	3,0447	-0,0078	2,9902	2,9728	-0,0174
B-1	3,0391	3,0272	-0,0119	3,0058	2,9894	-0,0165	3,0468	3,0376	-0,0092
B-2	3,0361	3,0249	-0,0112	3,0086	2,9932	-0,0153	3,0450	3,0361	-0,0089

Tabulka 8 – Naměřené hodnoty úběrů pro první test



Graf 1 - Výsledné hodnoty úběru prvního testu

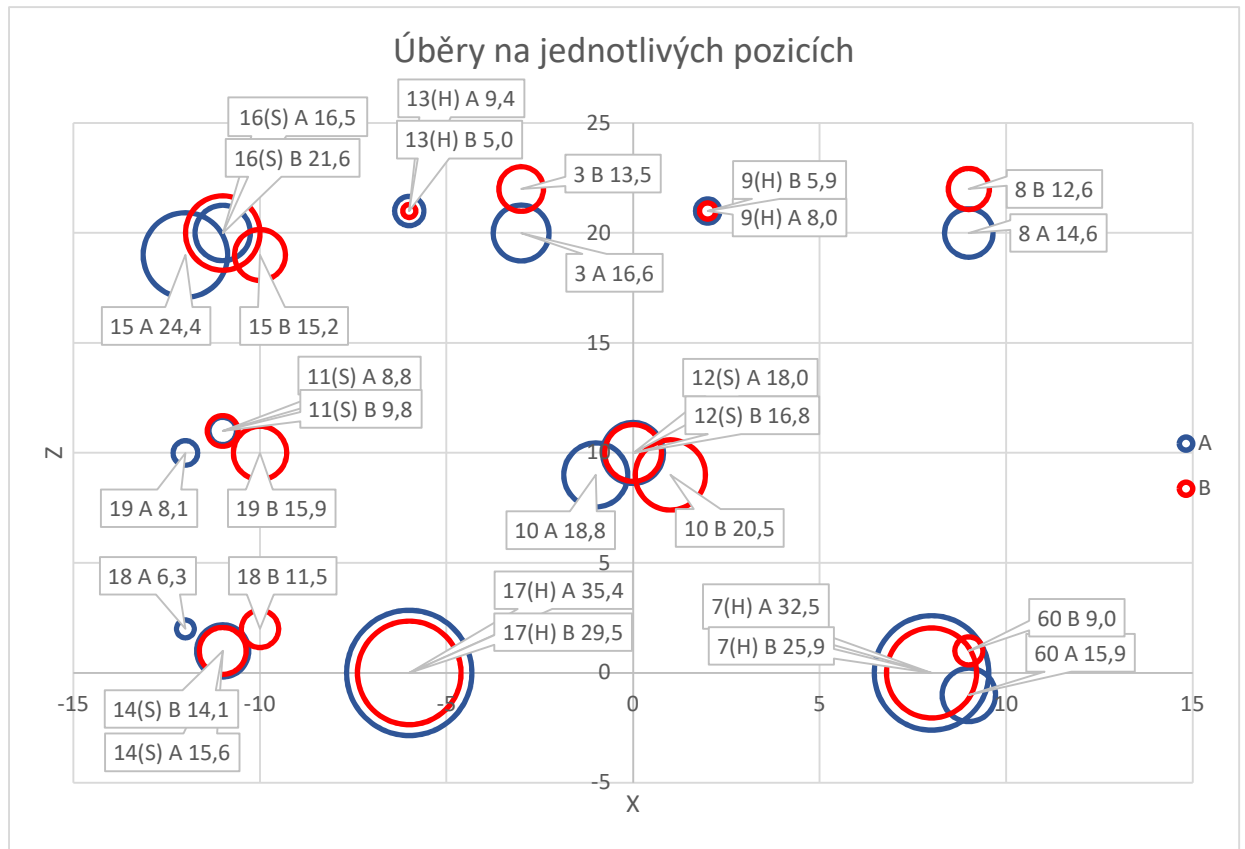
V grafu č. 1 jsou zobrazeny přenesené hodnoty z tabulky č. 8. Je možné zde pozorovat rozdílné úběry materiálů pro různé vzorky. Jelikož průměrný rozdíl hodnot mezi A(B)-1 a A(B)-2 činí maximálně 1,7 um (maximální rozdíl 4,5 um u vzorku 7A), jsou pro lepší přehlednost a následující práci s čísly výsledné hodnoty zaokrouhleny a zobrazeny v grafu č. 2.



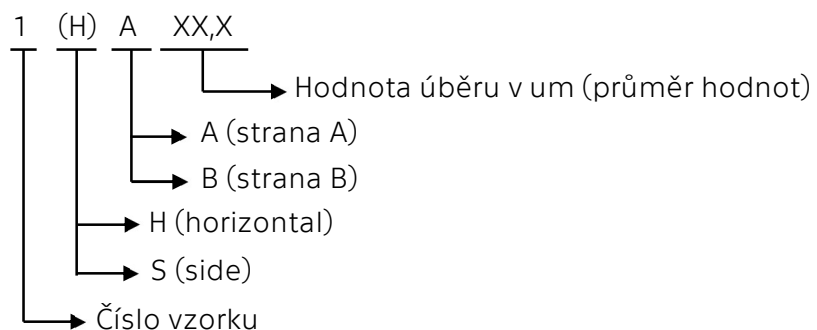
Graf 2 - Výsledné průměrné hodnoty prvního testu

Z výsledků je patrné, že úběry se liší v závislosti na orientaci a umístění vzorku. Vliv je pozorovatelný i na jednotlivých vzorcích, kde je možné pozorovat rozdílné hodnoty na straně A a B. Výsledná data byla také umístěna do bublinového grafu (graf č. 3). Pro

lepší přehlednost jsou bubliny tvořené kružnicemi. Rozmístění kružnic odpovídá rozmístění vzorků na rámu při pohledu do roviny XZ. Střed rámu je umístěn v ose x na hodnotě 0. Kružnice jsou vždy ve dvojici A a B označující naměřené hodnoty na straně A a na straně B. Soustředné kružnice znamenají, že ostří je orientováno směrem do roviny XZ a měřené hodnoty tak jsou z tohoto pohledu v jednom bodě. Pro tento případ je v popisku bubliny dodatek H (horizontal) nebo S (side) pro jednoznačné určení orientace. Systém značení pro kružnicový graf je zobrazen na obrázku č. 44.



Graf 3 - Zobrazení úběrů na jednotlivých místech rámu



Obrázek 44 - Značení pro kružnicový graf

6.2.2 Vyhodnocení úběru materiálu

Z naměřených hodnot je možné určit vliv pozice a orientace na úběr materiálu. Pro vyhodnocení byly používány zmíněné hypotézy z kapitoly 6.1 a pomocí naměřených průměrných hodnot ověřena jejich platnost. Jednotlivé hypotézy, které zde byly vyhodnoceny, se dají jednoduše sledovat na již zmíněném kružnicovém grafu č. 3. V následujících tabulkách (č. 9 a č. 10) jsou zhodnoceny hypotézy pro úběr na stranách A a B.

Vliv výšky v orientaci YX (shora dolů)								
1. Hypotéza – Vzorky na spodku rámu budou mít větší úběr než vzorky na vrcholu								
	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)
Platí	A13	9,4	vs	A17	35,4			
Platí	A9	8,0	vs	A7	32,5			
Vliv výšky v orientaci YZ (shora dolů)								
2. Hypotéza – Vzorky budou mít v teoretické ose oběhu menší úběr								
Platí	A16	16,5	vs	A11	8,8	Vs	A14	15,6
Vliv výšky v orientaci XZ (shora dolů)								
2. Hypotéza – Vzorky budou mít v teoretické ose oběhu menší úběr								
Neplatí	A15	24,4	vs	A19	8,0	Vs	A18	6,3
Vliv orientace YZ vs XZ								
3. Hypotéza – Vzorky v orientaci YZ budou mít větší úběr než vzorky XZ								
	Číslo vzorku	Orientace	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Orientace	Úběr (um)	
Neplatí	A16	YZ	16,5	vs	A15	XZ	24,4	
Platí	A11	YZ	8,8	vs	A19	XZ	8,0	
Platí	A14	YZ	15,6	vs	A18	XZ	6,3	
Vliv polohy v ose X								
4. Hypotéza – Vzorky na kraji mají menší úběr než vzorky na středu								
	Kraj				Střed			
Platí	A11	YZ	8,8	vs	A12	YZ	18,0	
Platí	A19	XZ	8,0	vs	A10	XZ	18,8	
Vliv výšky vertikálně (shora dolů)								
5. Hypotéza – Vzorky umístěné nahoře budou mít menší úběr než ty dole								
	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)			
Platí	B8	12,6	vs	A60	15,9			
Neplatí	A8	14,6	vs	B60	9,0			

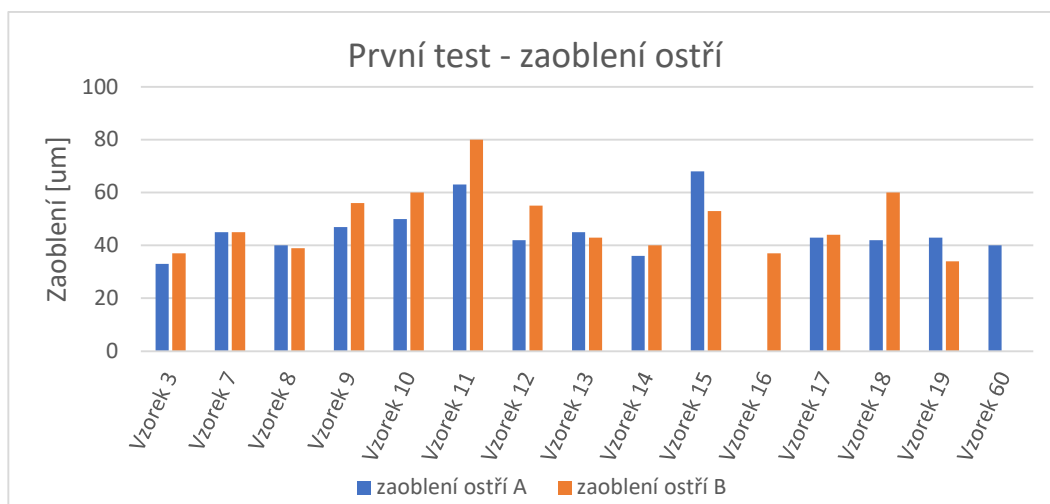
Tabulka 9 - Vyhodnocení hypotéz pro stranu A (1. test)

Vliv výšky v orientaci YX (shora dolů)								
1. Hypotéza – Vzorky na spodku rámu budou mít větší úběr než vzorky na vrcholu								
	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)
Platí	B13	5	vs	B17	29,5			
Platí	B9	5,9	vs	B7	25,9			
Vliv výšky v orientaci YZ (shora dolů)								
2. Hypotéza – Vzorky budou mít v teoretické ose oběhu menší úběr								
Platí	B16	21,6	vs	B11	9,8	vs	B14	14,2
Vliv výšky v orientaci XZ (shora dolů)								
2. Hypotéza – Vzorky budou mít v teoretické ose oběhu menší úběr								
Neplatí	B15	15,2	vs	B19	18,9	vs	B18	11,5
Vliv orientace YZ vs XZ								
3. Hypotéza – Vzorky v orientaci YZ budou mít větší úběr než vzorky XZ								
	Číslo vzorku	Orientace	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Orientace	Úběr (um)	
Platí	B16	YZ	21,6	vs	B15	XZ	15,2	
Neplatí	B11	YZ	9,8	vs	B19	XZ	15,9	
Platí	B14	YZ	14,2	vs	B18	XZ	11,5	
Vliv polohy v ose X								
4. Hypotéza – Vzorky na kraji mají menší úběr než vzorky na středu								
	Kraj			-	Střed			
Platí	B11	YZ	9,8	vs	B12	YZ	16,9	
Platí	B19	XZ	15,9	vs	B10	XZ	20,5	

Tabulka 10 - Vyhodnocení hypotéz pro stranu B (1. test)

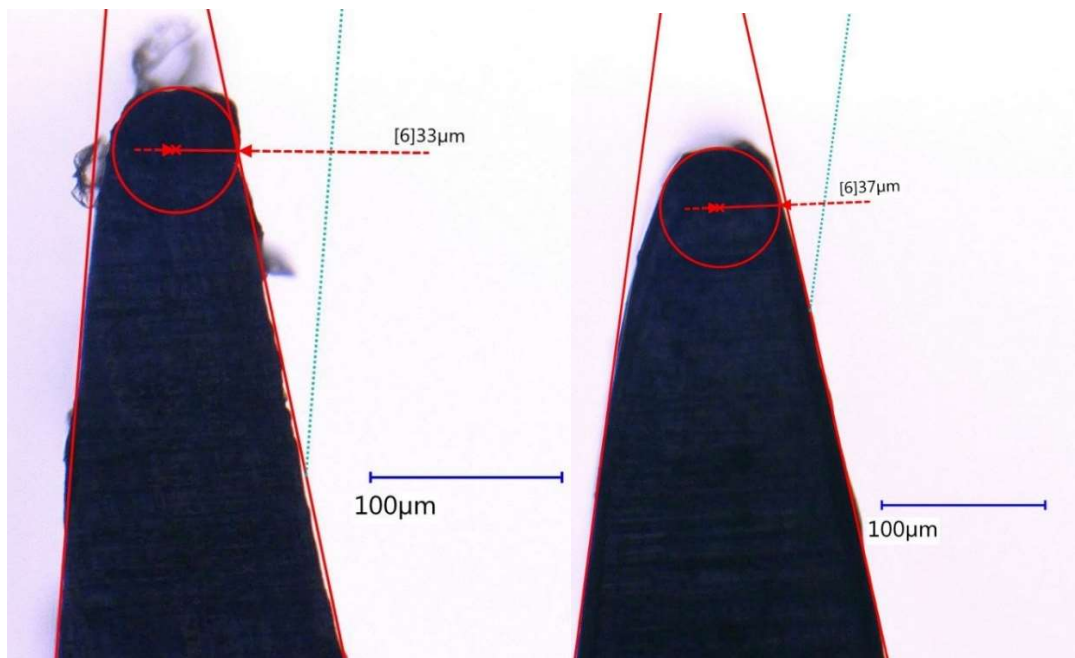
Zaoblení ostří

V grafu č. 4 je zobrazeno naměřené zaoblení ostří. Po bližším prozkoumání nebyl nalezen významný vliv polohy a orientace zkušebního tělíska na zaoblení ostří. Průměrné zaoblení činí 47 um. Jelikož měření probíhalo ručně pomocí softwaru dodávaného k mikroskopu, mohlo dojít k nepřesnostem měření.

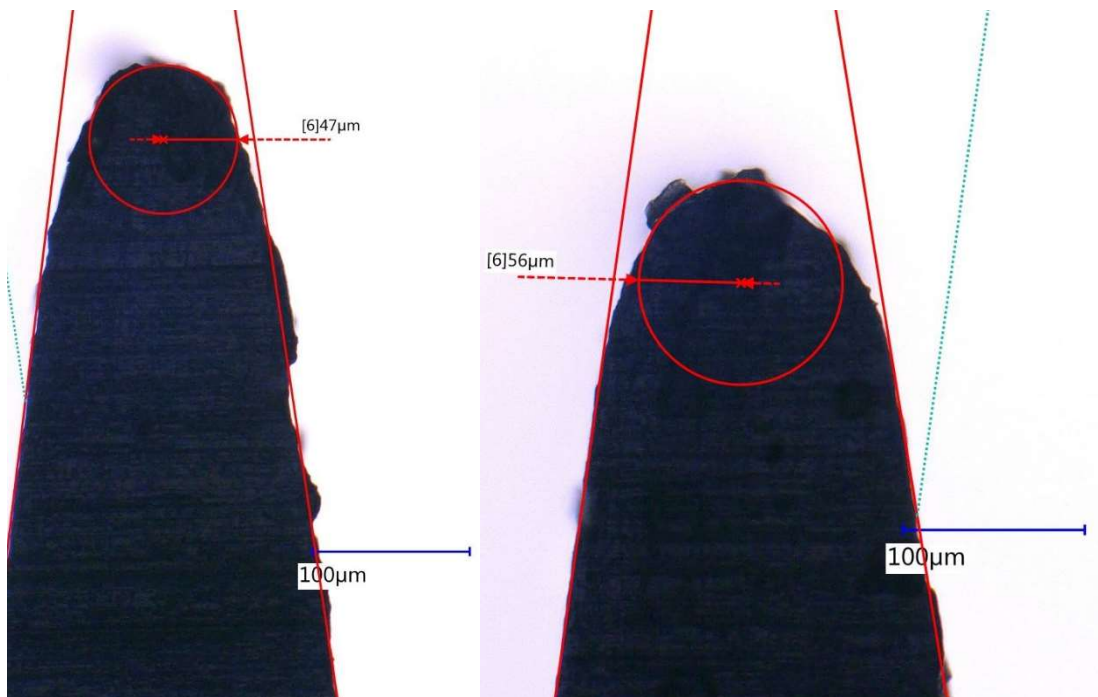


Graf 4 - Zaoblení ostří (1. test)

Při měření bylo postupováno podle pravidla snažit se do špičky ostří umístit co největší vepsanou kružnici, ale jelikož ostří měla různá zaoblení a různá zkosení, nebylo vždy možné zaoblení jednoznačně určit. Na následujících obrázcích (č. 45-48) jsou zobrazeny některé měřené dvojice ostří a způsob jejich vyhodnocování. Na obrázcích je možné pozorovat měřítko odpovídající zvolenému zvětšení, dvě rovné čáry, které svírají úhel 15 stupňů, a vepsanou kružnici do ostří, která určuje poloměr zaoblení.

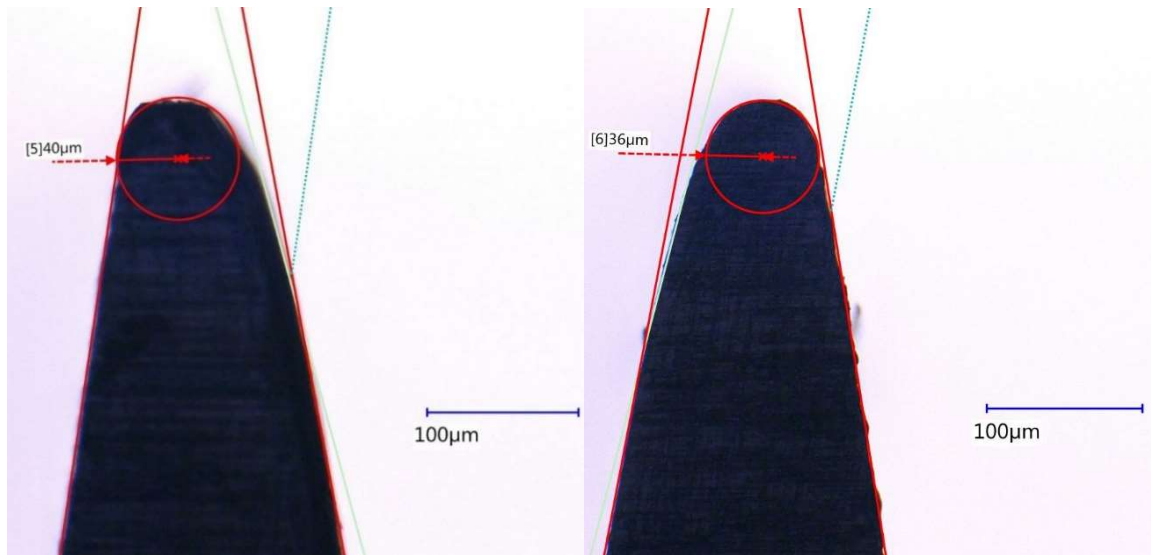


Obrázek 45 – Zaoblení ostří vzorku 3, ostří A (vlevo) a ostří B (vpravo)



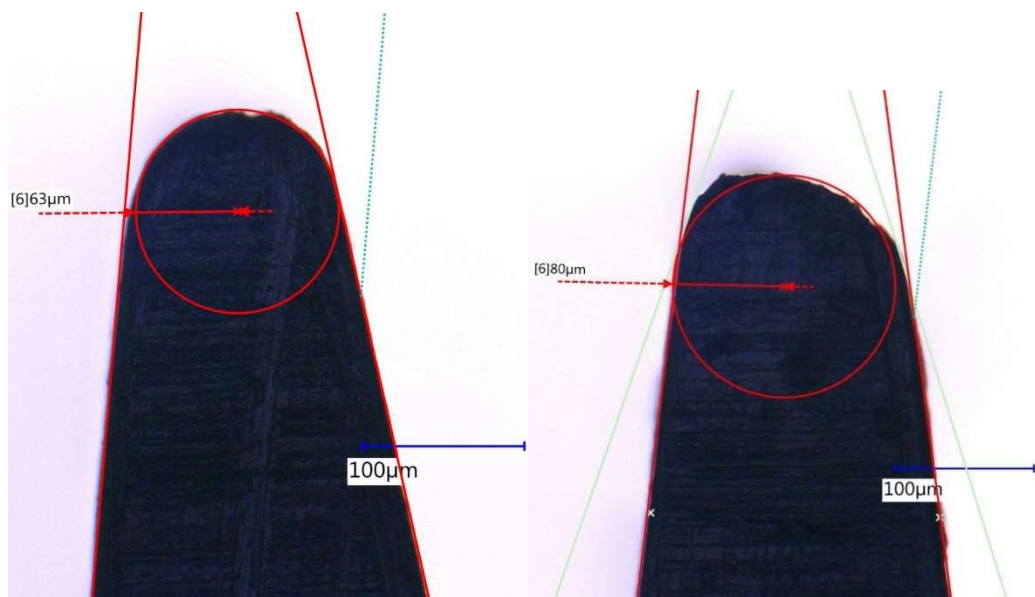
Obrázek 46 - Zaoblení ostří vzorku 9, ostří A (vlevo) a ostří B (vpravo)

U některých vzorků je patrné, že omílací médium zaobluje ostří více z jedné strany, zatímco druhá strana bývá netknutá. Toto zaoblení způsobuje směr oběhu omílacího média, které naráží na plochu ostří, na které je pak větší úběr materiálu, než na ploše na druhé straně ostří. Omílací médium však měnilo svůj směr toku každých 15 minut, dalo by se předpokládat, že toto zaoblení bude rovnoměrné, avšak není tomu tak.



Obrázek 47 - Zaoblení ostří vzorku 14, ostří A (vlevo) a ostří B (vpravo)

Jedná-li se o vzorky umístěné na boku rámu, ostří rozdělují rovnoměrně proud média po jeho stranách. Dalo by se předpokládat, že ostří bude rovnoměrně zaoblené, avšak na vzorku 14 (Z1LS) je možné pozorovat větší zaoblení ostří směrem od středu k bokům pracovního prostoru.



Obrázek 48 - Zaoblení ostří vzorku 11, ostří A (vlevo) a ostří B (vpravo)

Vzorek 11 (Z6LS), který je umístěn výše oproti vzorku 14, tento jev nevykazuje. Jelikož různé vzorky vykazují různé zaoblení, nebyla nalezena v těchto vlivech jednoznačná spojitost s orientací.

6.3 Druhý test

Tento test byl proveden za stejných podmínek jako test první, aby byla ověřena opakovatelnost.

Podmínky testu

Délka omílání 120 minut, 1320 g abraziva

Osazení rámu

Číslo vzorku	Pozice	Číslo vzorku	Pozice
1	Z11LS	25	Z5M
4	Z10L	26	Z5L
5	Z1L	27	X3HD
6	Z1LS	28	Z7LS
20	X10VU	29	X3HU
21	X7HU	30	X4VU
22	X9HD	58	X10VD
23	Z6MS	59	X1VD

Tabulka 11 - Osazení rámu pro druhý test



Obrázek 49 - Osazení rámu – druhý test

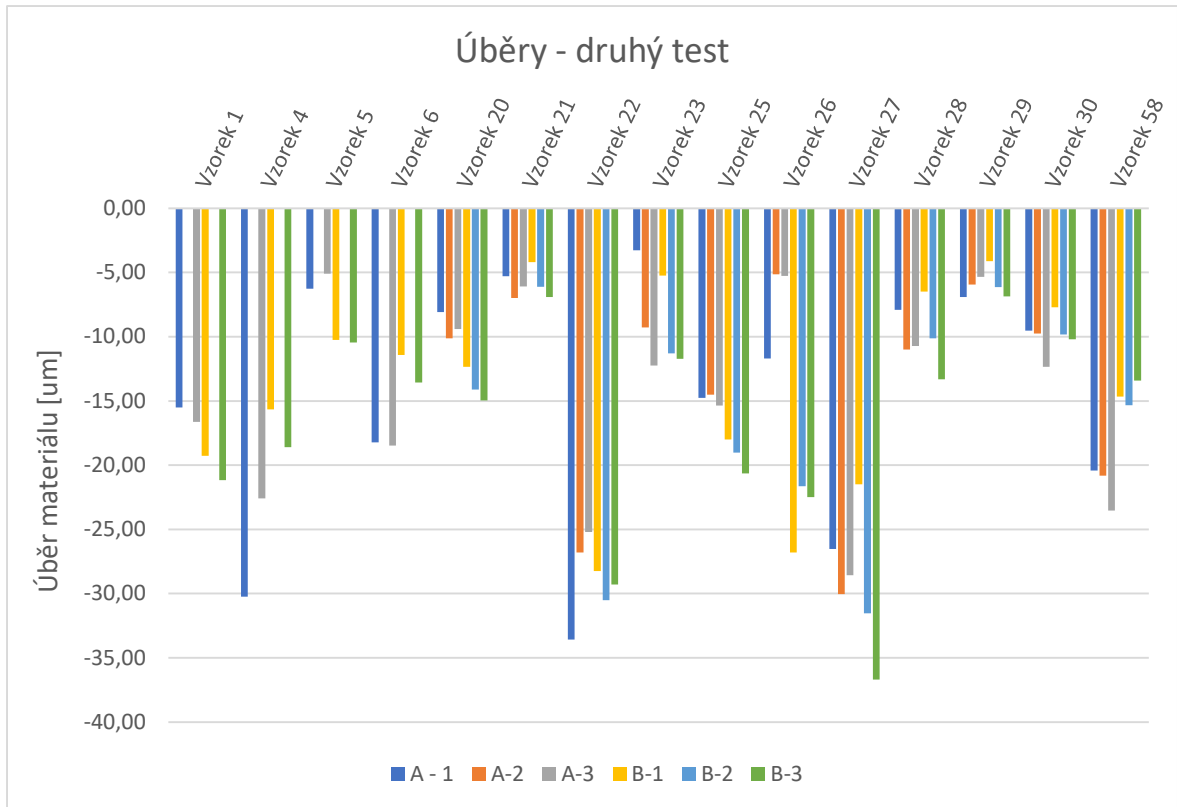
6.3.1 Výsledky

Úběry materiálu

Hodnoty v mm	Vzorek 1			Vzorek 4			Vzorek 5		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	3,0614	3,0459	-0,0155	3,0632	3,033	-0,0302	3,0578	3,0515	-0,0063
A-3	3,0611	3,0445	-0,0166	3,0583	3,036	-0,0226	3,0582	3,0531	-0,0051
B-1	3,0281	3,0088	-0,0193	3,0125	2,997	-0,0156	3,0195	3,0092	-0,0103
B-3	3,0255	3,0044	-0,0212	3,0128	2,994	-0,0186	3,0199	3,0095	-0,0105
	Vzorek 6			Vzorek 20			Vzorek 21		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	3,0582	3,0399	-0,0182	2,9814	2,9733	-0,0081	2,9900	2,9847	-0,0053
A-2	/	/	/	2,9794	2,9692	-0,0101	2,9874	2,9805	-0,0070
A-3	3,0617	3,0432	-0,0185	2,9757	2,9663	-0,0094	2,9852	2,9792	-0,0061
B-1	3,0240	3,0126	-0,0114	3,0382	3,0259	-0,0123	3,0464	3,0422	-0,0042
B-2	/	/	/	3,0366	3,0224	-0,0141	3,0450	3,0389	-0,0061
B-3	3,0288	3,0152	-0,0136	3,0354	3,0204	-0,0150	3,0436	3,0367	-0,0069
	Vzorek 22			Vzorek 23			Vzorek 25		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	2,9719	2,9383	-0,0336	2,9757	2,9724	-0,0033	2,9890	2,9742	-0,0148
A-2	2,9684	2,9416	-0,0268	2,9755	2,9662	-0,0093	2,9878	2,9733	-0,0145
A-3	2,9654	2,9402	-0,0252	2,9754	2,9631	-0,0123	2,9877	2,9723	-0,0154
B-1	3,0291	3,0008	-0,0283	3,0168	3,0116	-0,0052	2,9944	2,9764	-0,0180
B-2	3,0285	2,9980	-0,0305	3,0166	3,0053	-0,0113	2,9955	2,9765	-0,0190
B-3	3,0278	2,9985	-0,0293	3,0160	3,0043	-0,0117	2,9981	2,9775	-0,0206
	Vzorek 26			Vzorek 27			Vzorek 28		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	2,9996	2,9879	-0,0117	3,0004	2,9739	-0,0265	2,9887	2,9808	-0,0079
A-2	2,9996	2,9945	-0,0051	2,9983	2,9682	-0,0301	2,9877	2,9767	-0,0110
A-3	2,9982	2,9929	-0,0053	2,9961	2,9675	-0,0286	2,9855	2,9748	-0,0107
B-1	3,0011	2,9743	-0,0268	3,0003	2,9788	-0,0215	2,9911	2,9846	-0,0065
B-2	3,0037	2,9821	-0,0216	2,9998	2,9682	-0,0315	2,9928	2,9827	-0,0101
B-3	3,0036	2,9811	-0,0225	3,0004	2,9637	-0,0367	2,9943	2,9810	-0,0133
	Vzorek 29			Vzorek 30			Vzorek 58		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	2,9912	2,9843	-0,0069	2,9748	2,9653	-0,0095	2,9995	2,9791	-0,0204
A-2	2,9901	2,9842	-0,0059	2,9728	2,9630	-0,0097	2,9985	2,9777	-0,0208
A-3	2,9908	2,9854	-0,0053	2,9724	2,9601	-0,0123	2,9990	2,9754	-0,0235
B-1	3,0037	2,9996	-0,0041	3,0182	3,0105	-0,0077	3,0048	2,9901	-0,0147
B-2	3,0049	2,9988	-0,0061	3,0189	3,0091	-0,0098	3,0058	2,9905	-0,0153
B-3	3,0065	2,9997	-0,0069	3,0193	3,0091	-0,0102	3,0056	2,9922	-0,0134

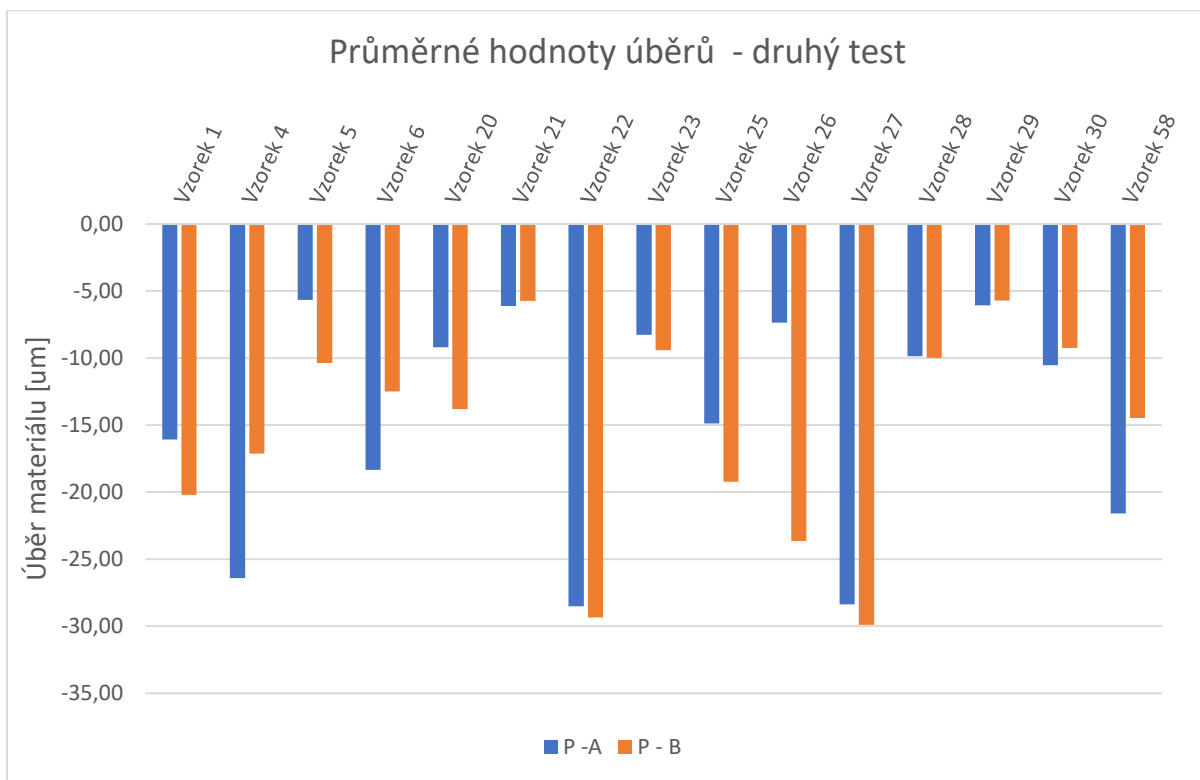
Tabulka 12 - Naměřené hodnoty úběrů pro druhý test

V tabulce č. 12 jsou uvedeny naměřené hodnoty pro druhý test. A-1, A-2 a A-3 značí naměřené hodnoty na straně A, B pak značí naměřené hodnoty na straně B. V tabulce jsou zaznamenány hodnoty měření před omíláním, po omílání a jejich rozdíl neboli úběr.



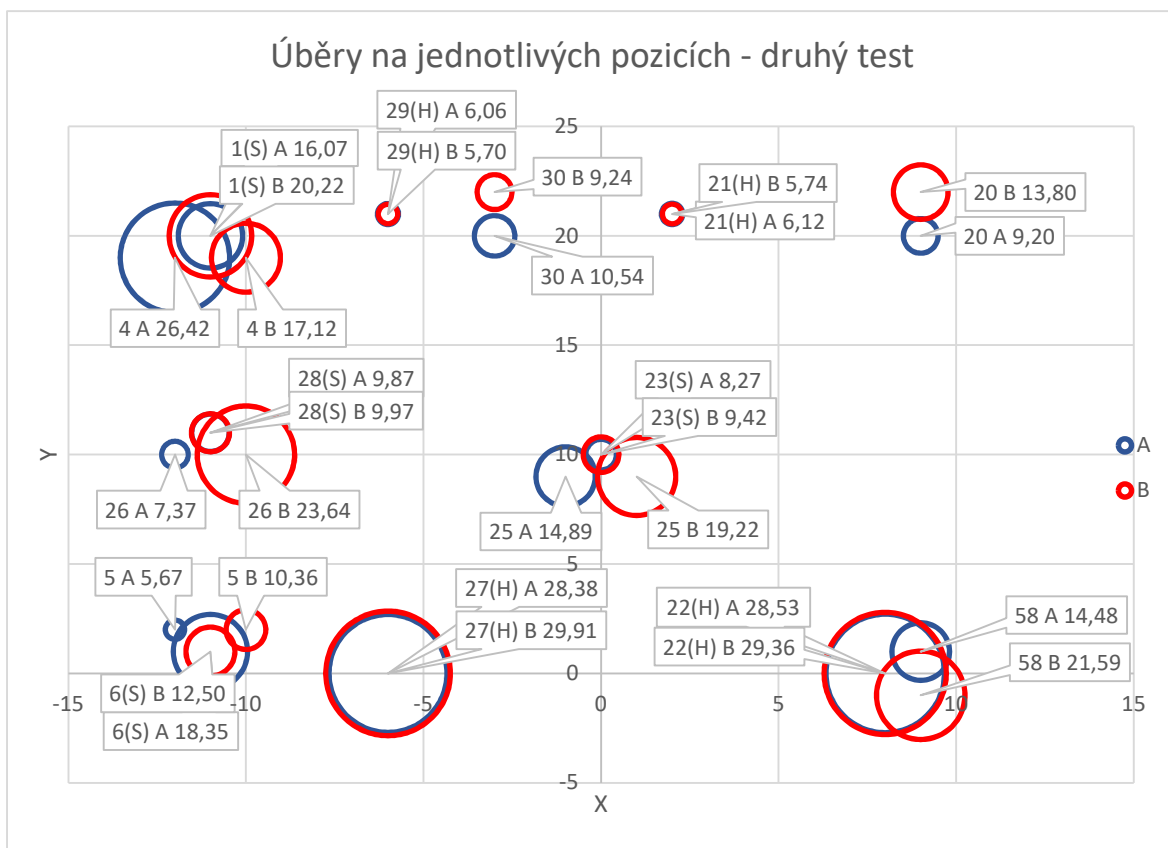
Graf 5 - Výsledné hodnoty úběru druhého testu

V grafu č. 5 jsou zobrazeny přenesené hodnoty z tabulky č. 12. Stejně jako u prvního testu, je možné pozorovat rozdílné úběry materiálů pro různé vzorky. Při porovnání výsledků z prvního testu s výsledky druhého testu, je patrné, že výsledné hodnoty jsou velice podobné, což značí dobrou opakovatelnost testů a měření. Jelikož průměrný rozdíl hodnot mezi A(B)-1, A(B)-2 a A(B)-3 činí maximálně 2,9 um (maximální rozdíl 15,2 um u vzorku 27 B), jsou pro lepší přehlednost a následující práci s čísly výsledné hodnoty zaokrouhleny a zobrazeny v grafu č. 6.



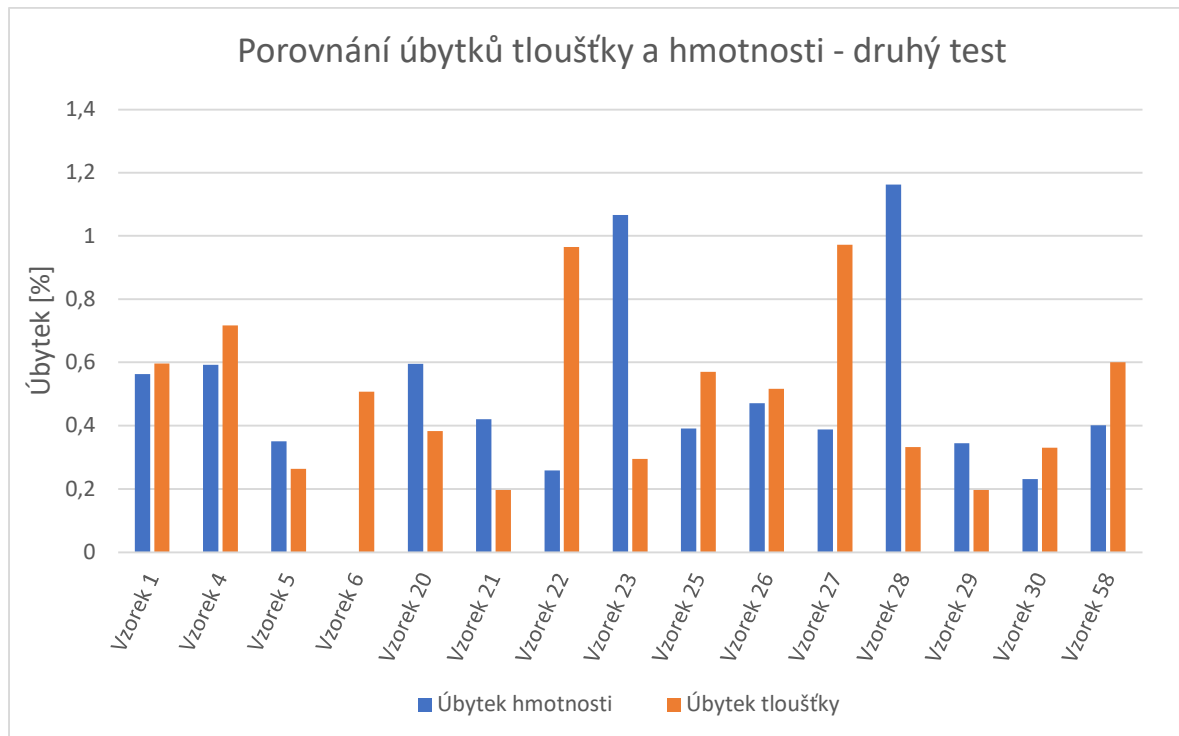
Graf 6- Výsledné průměrné hodnoty druhého testu

Stejně jako u prvního testu jsou výsledná data pro lepší přehlednost zobrazena v kružnicovém grafu č. 7.



Graf 7 - Zobrazení úběrů na jednotlivých místech rámu (druhý test)

Pro druhý test proběhlo i měření úbytků hmotnosti jednotlivých vzorků. Výsledné hodnoty jsou zaneseny do grafu č. 8 v podobě procentuálního úbytku. Porovnáme-li úbytek hmotnosti s úbytkem tloušťky, zjistíme, že velikost úbytku hmotnosti je téměř úměrná k velikosti úbytku tloušťky. Tímto se také potvrzuje správnost měření a zjištěných výsledků.



Graf 8 – Porovnání úbytků tloušťky a hmotnosti (druhý test)

6.3.2 Vyhodnocení úběru materiálu

Z naměřených hodnot je opět určen vliv pozice a orientace na úběr materiálu pomocí stejných hypotéz. Hypotézy budou vyhodnoceny v následujících tabulkách (č. 13 a č. 14) pro úběr na stranách A a B.

Vliv výšky v orientaci YX (shora dolů)								
1. Hypotéza – Vzorky na spodku rámu budou mít větší úběr než vzorky na vrcholu								
	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)
Platí	A29	6,1	vs	A27	28,4			
Platí	A21	6,1	vs	A22	28,5			
Vliv výšky v orientaci YZ (shora dolů)								
2. Hypotéza – Vzorky budou mít v teoretické ose oběhu menší úběr								
Platí	A1	16,1	vs	A28	9,9	Vs	A6	18,4
Vliv výšky v orientaci XZ (shora dolů)								
2. Hypotéza – Vzorky budou mít v teoretické ose oběhu menší úběr								
Neplatí	A4	26,4	vs	A26	7,4	Vs	A5	5,7
Vliv orientace YZ vs XZ								
3. Hypotéza – vzorky v orientaci YZ budou mít větší úběr než vzorky XZ								
	Číslo vzorku	Orientace	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Orientace	Úběr (um)	
Neplatí	A1	YZ	16,1	vs	A4	XZ	26,4	
Platí	A28	YZ	9,9	vs	A26	XZ	7,4	
Platí	A6	YZ	18,4	vs	A5	XZ	5,7	
Vliv polohy v ose X								
4. Hypotéza – Vzorky na kraji mají menší úběr než vzorky na středu								
	Kraj				Střed			
Neplatí	A28	YZ	9,9	vs	A23	YZ	8,3	
Platí	A26	XZ	7,4	vs	A25	XZ	14,9	
Vliv výšky vertikálně (shora dolů)								
5. Hypotéza – vzorky umístěné nahoře budou mít menší úběr než ty dole								
	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)			
Platí	A20	9,2	vs	A58	21,6			

Tabulka 13 - Vyhodnocení hypotéz pro stranu A (2. test)

Vliv výšky v orientaci YX (shora dolů)								
1. Hypotéza – Vzorky na spodku rámu budou mít větší úběr než vzorky na vrcholu								
	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)
Platí	B29	5,7	vs	B27	29,9			
Platí	B21	5,7	vs	B22	29,4			
Vliv výšky v orientaci YZ (shora dolů)								
2. Hypotéza – Vzorky budou mít v teoretické ose oběhu menší úběr								
Platí	B1	20,2	Vs	B28	10,0	vs	B6	12,5
Vliv výšky v orientaci XZ (shora dolů)								
2. Hypotéza – Vzorky budou mít v teoretické ose oběhu menší úběr								
Neplatí	B4	17,0	Vs	B26	23,6	Vs	B5	10,4
Vliv orientace YZ vs XZ								
3. Hypotéza – vzorky v orientaci YZ budou mít větší úběr než vzorky XZ								
	Číslo vzorku	Orientace	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Orientace	Úběr (um)	
Platí	B1	YZ	20,2	vs	B4	XZ	17,1	
Neplatí	B28	YZ	10,0	Vs	B26	XZ	23,6	
Platí	B6	YZ	12,5	Vs	B5	XZ	10,4	
Vliv polohy v ose X								
4. Hypotéza – Vzorky na kraji mají menší úběr než vzorky na středu								
	Kraj				Střed			
Neplatí	B28	YZ	10	Vs	B23	YZ	9,4	
Neplatí	B26	XZ	23,6	Vs	B25	XZ	19,2	
Vliv výšky vertikálně (shora dolů)								
5. Hypotéza – vzorky umístěné nahoře budou mít menší úběr než ty dole								
	Číslo vzorku	Úběr (um)	-	Číslo vzorku	Úběr (um)			
Platí	B20	13,8	Vs	B58	14,5			

Tabulka 14 - Vyhodnocení hypotéz pro stranu B (2. test)

Zaoblení ostří

Vzhledem k neprůkazným výsledkům zaoblení ostří z prvního testu bylo u druhého testu od měření zaoblení ustoupeno.

6.4 Zhodnocení prvních dvou testů

Prvními testy byla ověřena opakovatelnost a přesnost tohoto měření. Z výsledků je možné říct, že proces omílání vykazuje stabilní výsledky až na pár výjimek, které mohou být způsobeny různými faktory. Shrnutí obou testů a platností hypotéz je zobrazeno v následující tabulce.

Hypotéza		1. Test		2. Test	
		A	B	A	B
1. Při orientaci YX úběr roste s hloubkou	I. vzorek	✓	✓	✓	✓
	II. vzorek	✓	✓	✓	✓
2. V teoretické ose oběhu je menší úběr	YZ orientace	✓	✓	✓	✓
	XZ orientace	x	x	x	x
3. Povrchy v orientaci YZ mají větší úběry než v XZ	Nahoře	x	✓	x	✓
	Střed	✓	x	✓	x
	Dole	✓	✓	✓	✓
4. Ve středu je větší úběr než při kraji	YZ orientace	✓	✓	x	x
	XZ orientace	✓	✓	✓	x
5. Při vertikální orientaci vzorku úběr roste s hloubkou	XZ	x	✓	✓	✓
6. V blízkosti stěny (vzorky A) je nižší úběr než na B vzorcích vlivem rozložení rychlosti	I. Nahoře	x	x	x	x
	II. Střed	✓	✓	✓	✓
	III. Dole	✓	✓	✓	✓

Tabulka 15 - Shrnutí výsledků (1. a 2. test)

Z tabulky hypotéz vyplývá, že většina stanovených předpokladů byla správná. Pro 1. hypotézu platí veškeré předpoklady. S rostoucí hloubkou tak opravdu roste úběr v orientaci YX. Pro 2. hypotézu předpoklady platí pouze v orientaci YZ. V orientaci XZ pak toto neplatí ve všech případech, jelikož největší úběr se nachází paradoxně v teoretické ose oběhu. 3. hypotéza je pak pravdivá v 66 % případů, avšak vykazuje opakovatelné chování. 4. hypotéza pak byla plně pravdivá pro první test a pro druhý vykazovala odlišnosti, které mohly být způsobeny chybou měření. 5. hypotéza platí v 75 % případů, avšak rozdíly jsou velice nevýrazné, a tak tato hypotéza nemusí být vždy pravdivá. Pro poslední 6. hypotézu platí výsledky pro střední a spodní vzorky. Horní vzorky měly menší úběr na straně B, která se nacházela dále od krajů, nejspíše kvůli rámu, který brzdil tok média, a tak na tomto místě docházelo k menším úběrům.

6.5 Testy pro zjištění vlivu času a množství abraziva

První dva testy prokázaly opakovatelnost měření. Proto jsou další provedené testy zaměřené na vliv času a množství abraziva. Z důvodu menšího počtu vzorků byla zvolena 4 místa, na které byly umístěny nové vzorky. Vzorky jsou voleny tak, aby rozdíl byly co nejvíce pozorovatelné a aby zahrnuly vliv výšky a polohy na kraji a na středu.

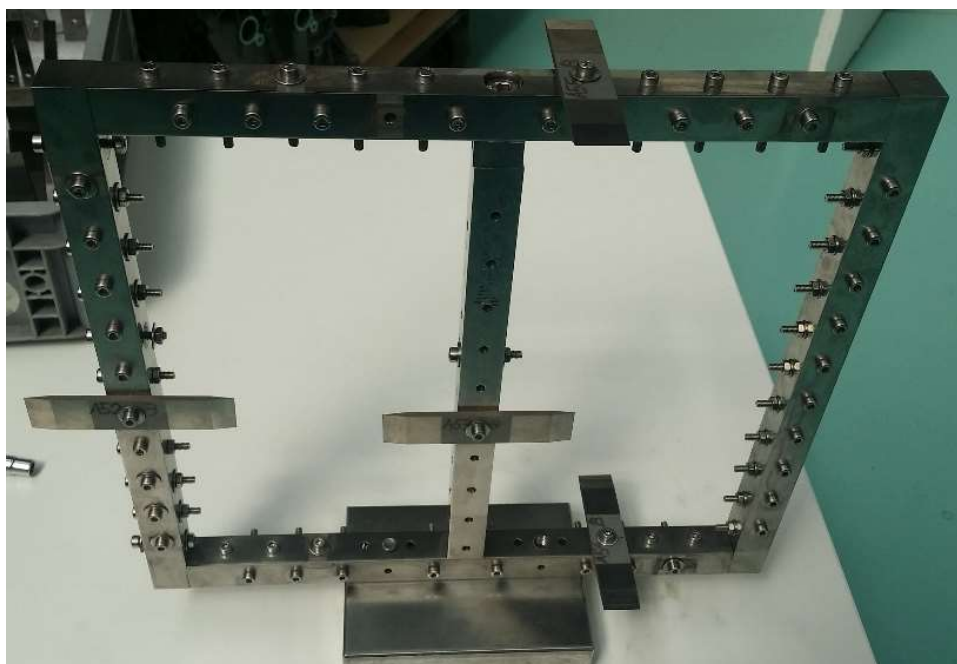
Podmínky testů

3. Délka omílání 60 minut, 1320 g abraziva
4. Délka omílání 240 minut, 1320 g abraziva
5. Délka omílání 120 minut, 400 g abraziva
6. Délka omílání 120 minut, 2400 g abraziva
7. Délka omílání 120 minut, 0 g abraziva

Osazení rámu

Test	Číslo vzorku	Pozice	Číslo vzorku	Pozice
3	52	Z5L	55	X7HU
	53	Z5M	54	X9HD
4	32	Z5L	31	X7HU
	33	Z5M	34	X9HD
5	37	Z5L	35	X7HU
	36	Z5M	38	X9HD
6	41	Z5L	39	X7HU
	40	Z5M	42	X9HD
7	44	Z5L	46	X7HU
	45	Z5M	43	X9HD

Tabulka 16 - Osazení rámu pro zbývající testy



Obrázek 50 - Osazení rámu – testy 3-7

6.5.1 Výsledky úběrů materiálu

V následujících tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty pro testy 3-7. V tabulkách jsou zaznamenány hodnoty měření před omíláním, po omílání a jejich rozdíl neboli úběr. Výsledné hodnoty jsou pro lepší porovnání zaneseny do grafu.

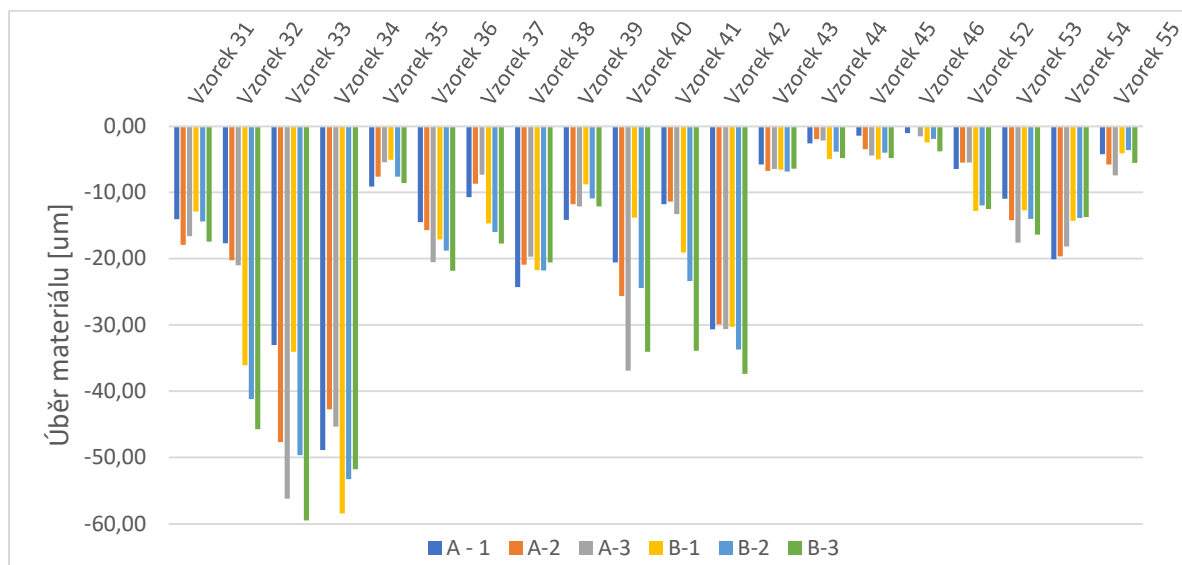
Hodnoty v mm	Vzorek 31			Vzorek 32			Vzorek 33		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	Úběr
A-1	2,9900	2,9759	-0,0141	2,9921	2,9745	-0,0176	2,9944	2,9614	-0,0330
A-2	2,9895	2,9716	-0,0179	2,9914	2,9711	-0,0202	2,9945	2,9468	-0,0477
A-3	2,9876	2,9710	-0,0166	2,9896	2,9686	-0,0210	2,9954	2,9392	-0,0562
B-1	2,9905	2,9777	-0,0129	2,9997	2,9636	-0,0361	2,9920	2,9579	-0,0340
B-2	2,9899	2,9755	-0,0144	2,9999	2,9587	-0,0412	2,9938	2,9442	-0,0496
B-3	2,9919	2,9745	-0,0174	2,9988	2,9531	-0,0457	2,9959	2,9365	-0,0595
	Vzorek 34			Vzorek 35			Vzorek 36		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	Úběr
A-1	3,0577	3,0088	-0,0489	3,0115	3,0024	-0,0091	3,0499	3,0355	-0,0145
A-2	3,055873	3,01316	-0,0427	3,0075	2,9998	-0,0076	3,0471	3,0314	-0,0157
A-3	3,0548	3,0095	-0,0453	3,0051	2,9996	-0,0054	3,0444	3,0239	-0,0205
B-1	3,0153	2,9569	-0,0584	2,9886	2,9835	-0,0050	3,0085	2,9915	-0,0171
B-2	3,014918	2,961657	-0,0533	2,9898	2,9822	-0,0076	3,0071	2,9883	-0,0188
B-3	3,0113	2,9595	-0,0518	2,9920	2,9834	-0,0086	3,0052	2,9834	-0,0218
	Vzorek 37			Vzorek 38			Vzorek 39		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	Úběr
A-1	3,0036	2,9929	-0,0107	2,9526	2,9283	-0,0243	2,9544	2,9403	-0,0141
A-2	3,0031	2,9944	-0,0087	2,9509	2,9300	-0,0209	2,9519	2,9401	-0,0118
A-3	3,0026	2,9952	-0,0073	2,9484	2,9287	-0,0197	2,9537	2,9416	-0,0121
B-1	2,9921	2,9775	-0,0147	2,9728	2,9511	-0,0217	2,9763	2,9675	-0,0088
B-2	2,9927	2,9767	-0,0160	2,9759	2,9541	-0,0218	2,9741	2,9632	-0,0109
B-3	2,9929	2,9751	-0,0177	2,9776	2,9570	-0,0205	2,9738	2,9617	-0,0121
	Vzorek 40			Vzorek 41			Vzorek 42		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	Úběr
A-1	2,9303	2,9097	-0,0206	2,9453	2,9336	-0,0118	2,9393	2,9086	-0,0307
A-2	2,9354	2,9098	-0,0257	2,9443	2,9329	-0,0114	2,9366	2,9068	-0,0299
A-3	2,9420	2,9051	-0,0369	2,9421	2,9288	-0,0133	2,9332	2,9025	-0,0306
B-1	2,9628	2,9490	-0,0138	2,9790	2,9599	-0,0191	2,9790	2,9487	-0,0303
B-2	2,9626	2,9382	-0,0244	2,9807	2,9573	-0,0234	2,9791	2,9453	-0,0337
B-3	2,9658	2,9317	-0,0341	2,9810	2,9471	-0,0339	2,9791	2,9417	-0,0374

Tabulka 17 - Výsledky testů 3-7

Hodnoty v mm	Vzorek 43			Vzorek 44			Vzorek 45		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	2,9745	2,9688	-0,0058	2,9755	2,9729	-0,0026	2,9678	2,9664	-0,0014
A-2	2,9746	2,9679	-0,0068	2,9762	2,9742	-0,0020	2,9673	2,9638	-0,0035
A-3	2,9751	2,9687	-0,0065	2,9759	2,9737	-0,0022	2,9676	2,9631	-0,0044
B-1	2,9281	2,9215	-0,0066	2,9433	2,9383	-0,0050	2,9501	2,9451	-0,0050
B-2	2,9261	2,9192	-0,0069	2,9459	2,9421	-0,0038	2,9519	2,9479	-0,0040
B-3	2,9259	2,9195	-0,0064	2,9478	2,9430	-0,0048	2,9526	2,9478	-0,0048
	Vzorek 46			Vzorek 52			Vzorek 53		
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr
A-1	2,9743	2,9733	-0,0010	3,0352	3,0288	-0,0065	3,0218	3,0109	-0,0110
A-2	2,9742	2,9743	0,0001	3,0365	3,0310	-0,0055	3,0226	3,0084	-0,0142
A-3	2,9747	2,9732	-0,0015	3,0375	3,0320	-0,0055	3,0239	3,0063	-0,0176
B-1	2,9313	2,9288	-0,0025	2,9772	2,9644	-0,0128	2,9598	2,9471	-0,0127
B-2	2,9338	2,9318	-0,0019	2,9809	2,9690	-0,0120	2,9598	2,9459	-0,0140
B-3	2,9382	2,9344	-0,0038	2,9828	2,9703	-0,0125	2,9612	2,9448	-0,0164
	Vzorek 54			Vzorek 55					
	výchozí	po leštění	úběr	výchozí	po leštění	úběr			
A-1	3,0189	2,9988	-0,0201	3,0433	3,0391	-0,0042			
A-2	3,0188	2,9991	-0,0197	3,0455	3,0397	-0,0058			
A-3	3,0183	3,0001	-0,0182	3,0482	3,0408	-0,0074			
B-1	2,9561	2,9418	-0,0143	2,9879	2,9838	-0,0041			
B-2	2,9555	2,9416	-0,0139	2,9906	2,9870	-0,0036			
B-3	2,9558	2,9421	-0,0137	2,9942	2,9887	-0,0055			

Tabulka 18 - Výsledky testů 3-7, pokračování

V grafu č. 9 jsou zobrazeny přenesené hodnoty z tabulky č. 17 a 18. I nyní je možné pozorovat v některých případech velice rozdílné úběry mezi místy měření A-1 až A-3 nebo B-1 až B-3.



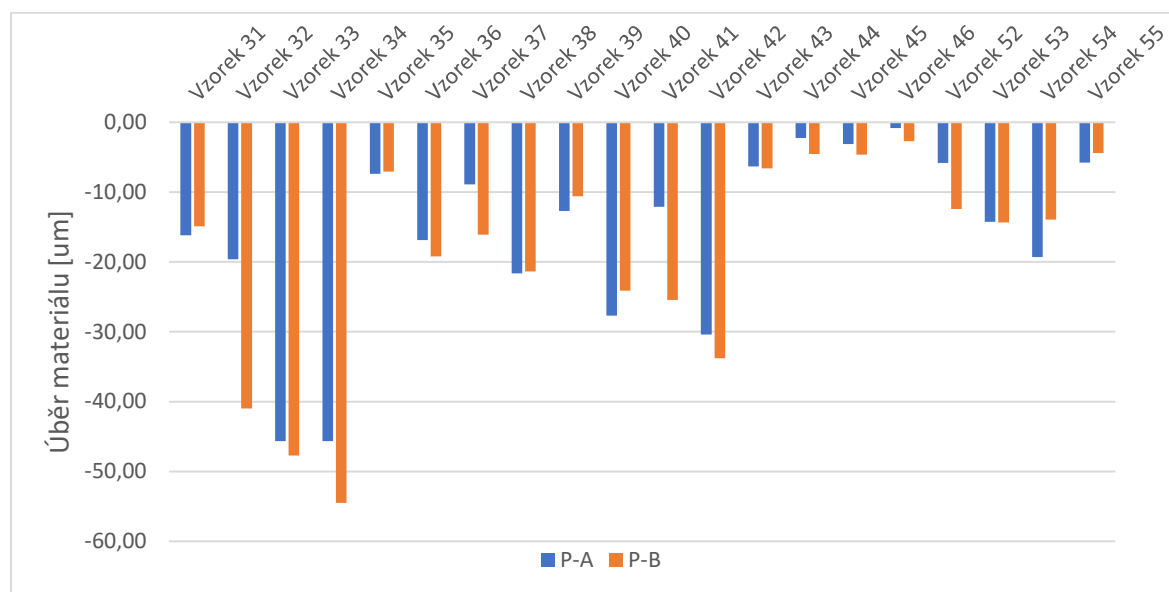
Graf 9 - Výsledné hodnoty úběru testů 3-7

Je možné pozorovat, že tyto rozdíly nabývají na velikosti při celkových větších úběrech, jako tomu je například u vzorku č. 33. Tento vzorek byl umístěn na pozici Z5M a je patrné, že jeho úběry rostou od A-1 po A-3, to samé platí pro stranu B. V následující tabulce č. 19 je zobrazen průměr rozdílů úběrů a maximální rozdíl pro každou sadu vzorků.

Test	Průměrný rozdíl [um]	Maximální rozdíl [um]
3	1,6	6,6
4	6,9	25,4
5	2,5	6,0
6	5,5	20,2
7	0,9	3,0

Tabulka 19 - Rozdíly úběrů na jednotlivých tělískách

Průměrný rozdíl úběrů činí méně než 7 um a maximální rozdíly činí také méně než 7 um, s výjimkou u testů 4 a 6, kde vzorky 33 a 40 (oba na pozici Z5M) mají maximální rozdíl řádově vyšší. Za předpokladu malých rozdílů úběru byly hodnoty zprůměrovány pro lepší přehlednost a jsou zobrazeny v grafu č. 10.

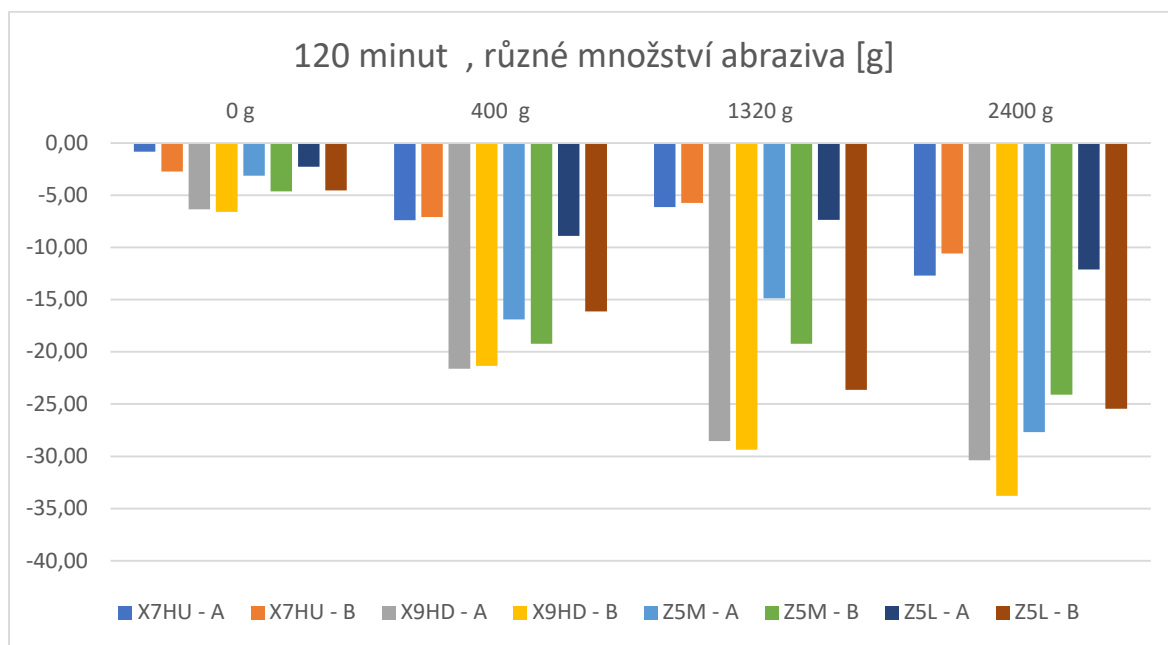


Graf 10 - Výsledné průměrné hodnoty testů 3-7

Tyto průměrné hodnoty jsou následně použity pro porovnání všech testů mezi sebou a pro určení vlivu času a množství abraziva na jednotlivé pozice vzorků.

6.5.2 Vliv času omílání a množství abraziva

Graf č. 11 zobrazuje porovnání různého množství abraziva. Porovnávány jsou testy s konstantním časem omílání, který byl 120 minut. Zleva je možné pozorovat úběry pro test s 0 gramy abraziva, následují testy se 400, 1320 a 2400 gramy. Mezi sebou pak jsou porovnány vzorky na stejných pozicích pro strany A a B. Z výsledků je patrné, že omílání bez abraziva nemá téměř žádný efekt. Přidá-li se do omílacího procesu 400 g abraziva, výsledný úběr je až 3,7x (medián) větší oproti 0 g.



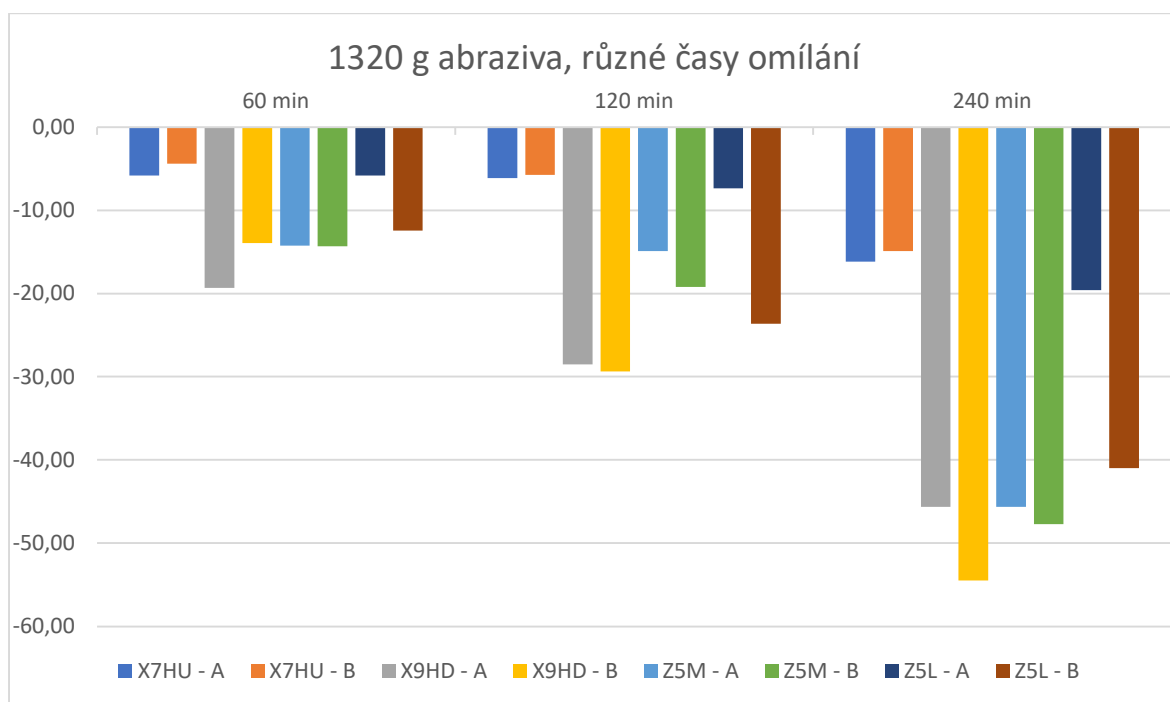
Graf 11 - Porovnání testů – konstantní čas 120 minut, proměnné množství abraziva

V tabulce č. 20 jsou uvedeny mediány násobků zvýšení úběrů oproti 0 g abraziva a poté oproti 400 g abraziva, které je výrobcem doporučeno jako optimální množství abraziva, a při kterém udává, že při navyšování tohoto množství nedochází k velkému zvětšování úběru. Toto tvrzení potvrdil jak předchozí graf č. 11, tak i následující tabulka č. 20, kde je možné pozorovat, že navýšení úběrů oproti 400 g se zvyšuje maximálně 1,7x, přičemž je nutné použít 6násobné množství abraziva.

Množství abraziva	Zvětšení úběru oproti 0 g (medián)	Zvětšení úběru oproti 400 g (medián)	Zvětšení úběru oproti 400 g (minimální)	Zvětšení úběru oproti 400 g (maximální)
0	-	0,26x	0,11x	0,38x
400	3,7x	-	-	-
1320	4,4x	1x	0,80x	1,40x
2400	5,3x	1,5x	1,30x	1,70x

Tabulka 20 - Porovnání zvýšení úběrů

V následujícím grafu č. 12 je porovnání změn úběrů při konstantním množství abraziva a různých časech omílání. Z grafu je patrné, že s rostoucím časem roste i velikost úběru materiálu.



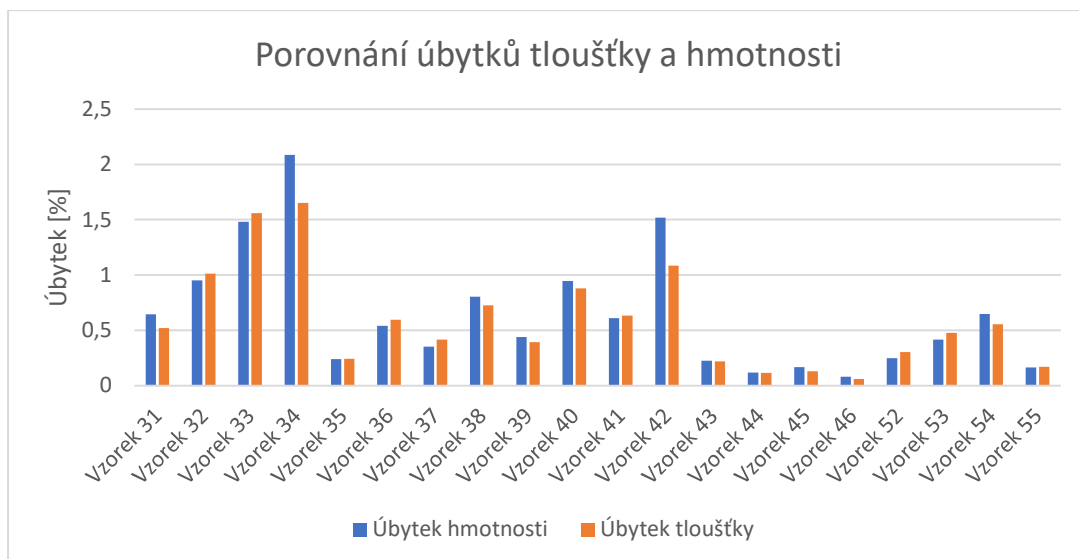
Graf 12 - Porovnání testů – konstantní množství abraziva 1320 g, proměnný čas

V tabulce č. 21 je uvedeno navýšení úběru abraziva oproti základnímu času 60 minut. Pokud se zvýší čas omílání 4x z 60 minut na 240, dojde k nárůstu úběru 3,3x. Z výsledků je patrné, že při navýšení časů omílání jsou získány lepší výsledky poměru čas/úběr, než je tomu při poměru množství abraziva/úběr.

Čas omílání	Zvětšení úběru oproti 60 min (medián)	Zvětšení úběru oproti 60 min (minimální)	Zvětšení úběru oproti 60 min (maximální)
120	1,3	1,0	2,1
240	3,3	2,4	3,9

Tabulka 21 - Porovnání zvětšení úběrů

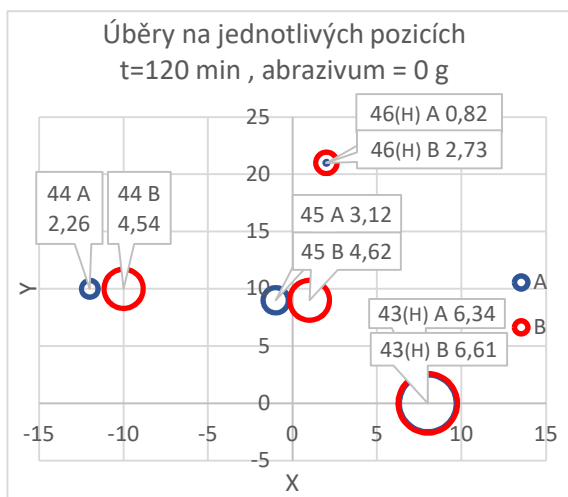
V grafu č. 13 je možné opět pozorovat procentuální porovnání úbytků hmotnosti a tloušťky. Stejně jako u testu č. 2, i zde je možné pozorovat podobné poměry úbytků tloušťky ku úbytku hmotnosti. Více odlišné poměry úbytků mohou být způsobeny větším úběrem na bocích zkušebních tělísek, který zde není započítáván.



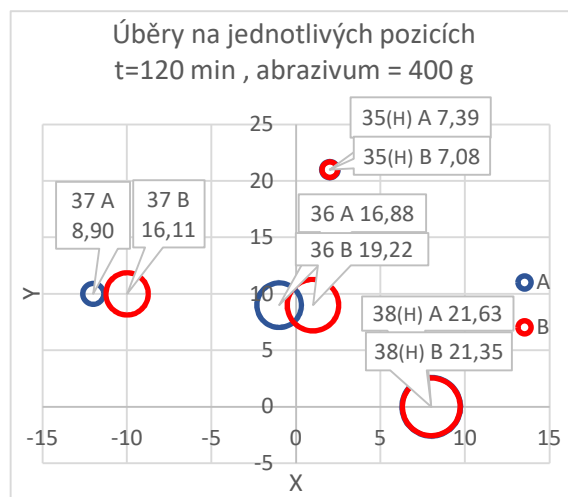
Graf 13 – Porovnání úbytků tloušťky a hmotnosti (3-7 test)

6.5.3 Rovnice úběrů v závislosti na poloze

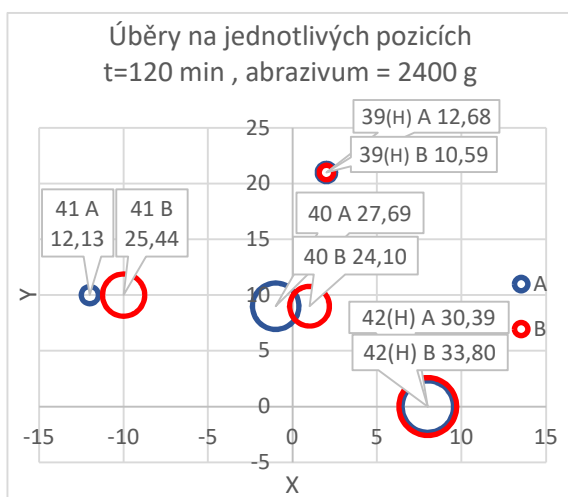
Na následující stránce jsou zobrazeny kružnicové grafy s úbytky tloušťky na jednotlivých pozicích pro předešlé testy. Z grafů je jasně patrné opakovatelné chování na všech měřených pozicích. Z tohoto důvodu byly pro tyto hodnoty sestaveny rovnice popisující chování vzorků ve směru osy X a osy Y na středu zkušebního rámu pomocí softwaru Microsoft Excel.



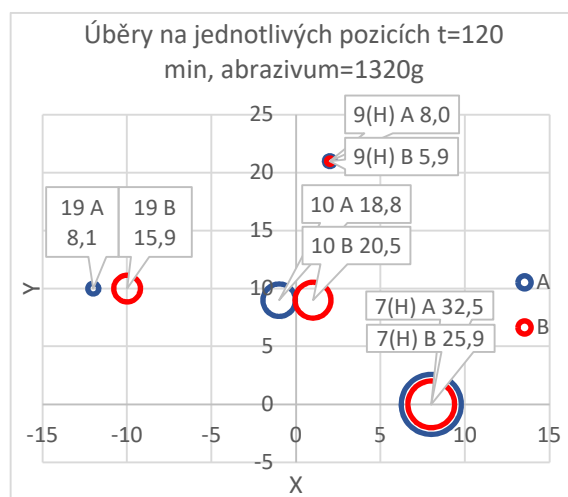
Graf 14 - Úbytky tloušťky (Test 7)



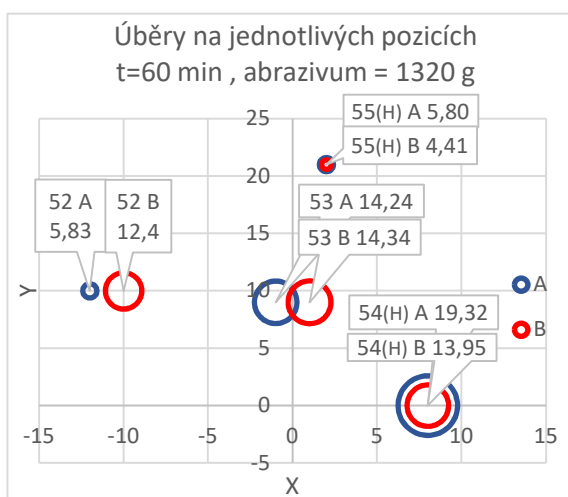
Graf 15 - Úbytky tloušťky (Test 5)



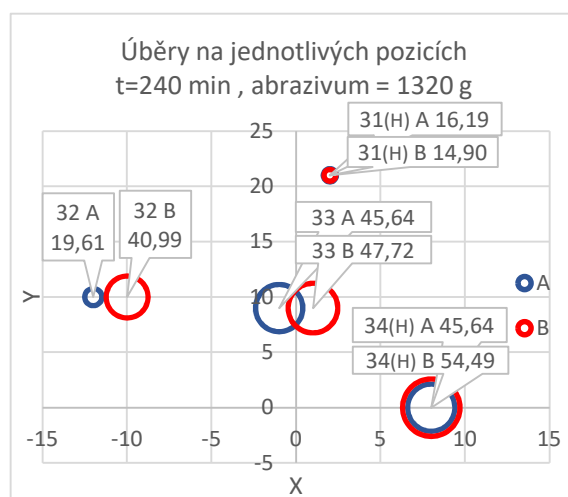
Graf 16 - Úbytky tloušťky (Test 6)



Graf 17 - Úbytky tloušťky (Test 1)

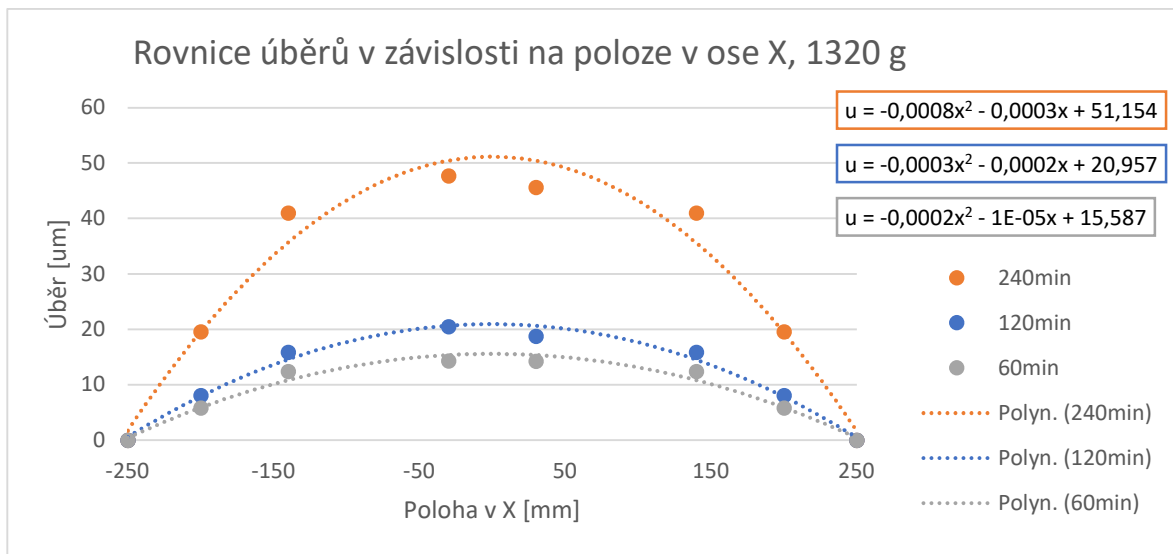


Graf 18 - Úbytky tloušťky (Test 3)



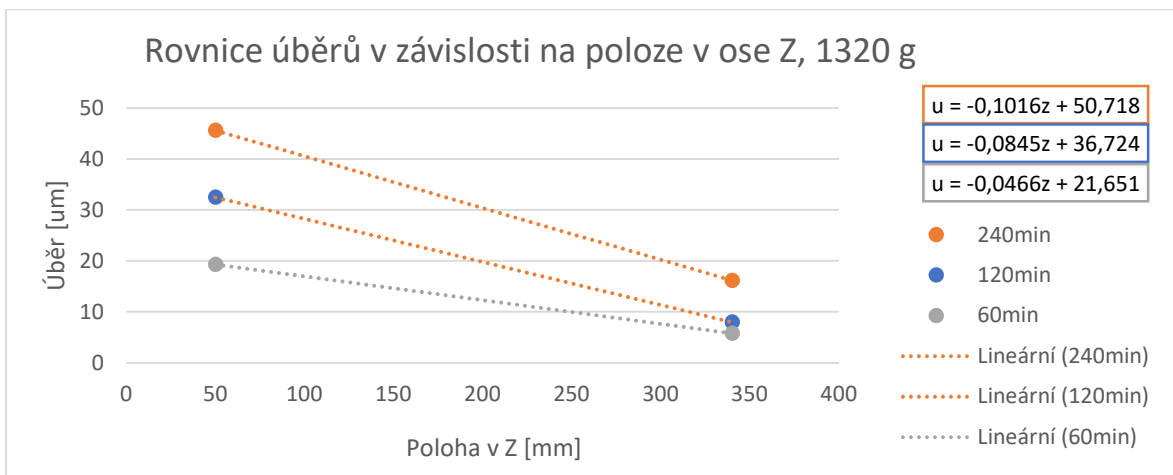
Graf 19 - Úbytky tloušťky (Test 4)

V následujícím grafu č. 20 jsou zobrazeny rovnice popisující úběr na jednotlivých pozicích pro osu X pro vzorky umístěné na středu rámu při použití 1320 g abraziva a v různých časech omílání. Jednotlivé úběry byly proloženy pomocí funkce spojnice trendu se zvolením polynomicke funkce druhého řádu. Na ose X v bodě 0 se nachází střed rámu, který je zároveň středem pracovního prostoru. Hodnoty na ose X určují vzdálenost od středu, kde nejzazší bod je kraj pracovního prostoru na hodnotě 250 mm. Vzhledem k chování vzorků během testů je na stěně pracovního prostoru předpokládána nulová rychlost proudění pracovního média a tím i nulový úběr.



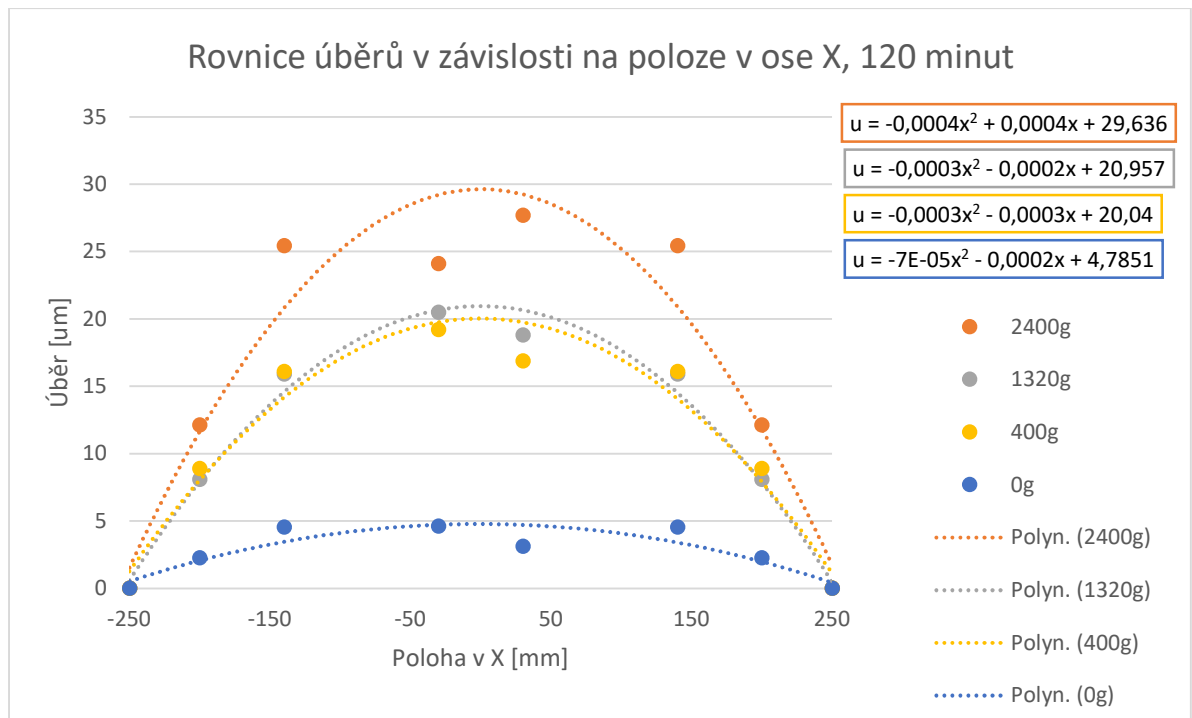
Graf 20 - Rovnice úběrů v ose X pro 1320 g abraziva

Na grafu č. 21 jsou zobrazeny rovnice úběrů v ose Z pro tělíska umístěná na středu rámu při použití 1320 g abraziva při různých časech omílání. Jednotlivé úběry byly proloženy lineární spojnicí trendů. Tělíska umístěna nejnižše na rámu se nacházela 50 mm nad dnem pracovního prostoru. Nejvýše umístěná tělíska byla ve výšce 340 mm.



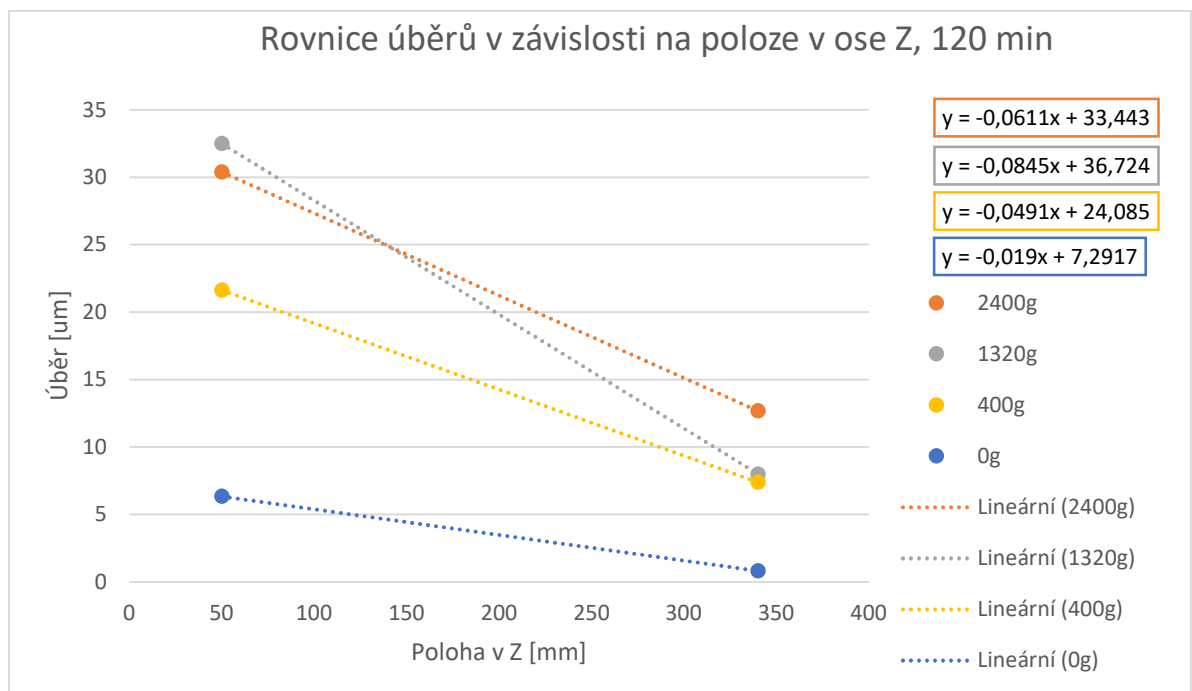
Graf 21 - Rovnice úběrů v ose Z pro 1320 g abraziva

Graf č. 22 zobrazuje rovnice úběrů v ose X pro konstantní čas omílání 120 minut a s různým množstvím použitého abraziva.



Graf 22 - Rovnice úběrů v ose Z pro čas omílání 120 min

Graf č. 23 zobrazuje rovnice úběrů v ose Z pro konstantní čas omílání 120 minut a různé množství abraziva.



Graf 23 - Rovnice úběrů v ose Z pro čas omílání 120 min

6.6 Vizuální porovnání deformace ostří

Po provedení všech testů byla pozorována na vzorcích umístěných horizontálně na spodku rámu výrazná deformace ostří. Tato deformace je zobrazena na následujících obrázcích. Deformace se nacházela pouze na těchto vzorcích, na jiných pozicích nebyla pozorována. Je možné, že byla způsobena velkým tlakem pracovního média na dně pracovního prostoru. Na obrázku č. 51 je vidět vzorek č. 31, který reprezentuje všechny nedeformované vzorky. Oproti deformovaným vzorkům je patrná rovná linie ostří.



Obrázek 51 - Nedeformovaný vzorek č. 31



Obrázek 52 - Deformované ostří A (vzorek č. 34), pohled shora



Obrázek 53 - Deformované ostří A (vzorek č. 34), pohled zdola



Obrázek 54 - Deformované ostří A (vzorek č. 43), pohled shora



Obrázek 55 - Deformované ostří A (vzorek č. 43), pohled zdola

7 Závěr

Úvod této práce se věnuje titanu a jeho slitinám. V práci je uvedeno jeho použití v letectví. Následují vlastnosti titanových slitin a jejich vliv na obrábění a broušení. Z této části pak byla využita doporučení pro broušení titanu při vlastní výrobě zkušebních tělísek. Poslední část zabývající se titanem se věnovala studii, která se zabývala vlivy různých dokončovacích operací na mez únavy pro vzorky z titanové slitiny. Tyto vzorky byly tištěny pomocí technologie PBF. Mezi třemi dokončovacími operacemi se nacházelo omílání, které je v jiné modifikaci využíváno v praktické části této práce. Druhá část se věnuje průzkumu dostupných omílacích zařízení. Třetí část se věnuje omílacímu stroji LPG1 od firmy SPM. Je zde popsán systém fungování stroje, pracovní médium a kompoundy použité při procesu omílání. Dále jsou identifikovány klíčové parametry procesu, které byly použity pro praktickou část.

Praktická část této práce se věnuje výrobě zkušebních tělísek a provedení samotného experimentu. První dva testy s plným obsazením rámu sloužily k vyhodnocení hypotéz, které byly stanoveny před samostatným experimentem na základě identifikace klíčových parametrů procesu omílání a ke zjištění opakovatelnosti testů. Na základě testů byla potvrzena opakovatelnost a také většina hypotéz. Neplatné hypotézy mohly být způsobeny vlivem rámu, na který byla upnuta zkušební tělíska, který mohl ovlivňovat tok pracovního média anebo jinými neznámými vlivy. Zároveň byl zjištěn vliv polohy a orientace zkušebního tělíska na úběr materiálu. U následujících pěti testů byly měněny parametry procesu, jako byl čas omílání a množství abraziva. Na základě prvních dvou testů byly zvoleny vhodné čtyři pozice zkušebních tělísek, které pokryly vliv výšky a vzdálenosti od středu pracovního prostoru. Z výsledků je patrné, že navýšení času omílání dosahuje lepších výsledků než navýšení množství abraziva. Při zvýšení času se dosahovalo lepšího poměru, kde při navýšení času omílání 4x se dosahovalo 3,3x většího úběru. Naopak při navýšení množství abraziva 6x se dosahovalo 1,5x většího úběru. Dále byly zjištěny rovnice popisující úběr na ose X a Z pro jednotlivé testy.

8 Seznam použité literatury

1. PETERS, M., J. KUMPFERT, C.H. WARD a C. LEYENS. Titanium Alloys for Aerospace Applications. *Advanced Engineering Materials*. 5(6), 419-427. DOI: 10.1002/adem.200310095. ISSN 14381656. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.200310095>
2. JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-800-1041-673.
3. DONACHIE, Matthew J. *Titanium: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2000. ISBN 08-717-0686-5.
4. MACHINEABILITY RATINGS. In: *Quaker Chemical Corporation* [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: https://pl.quakerchem.com/wp-content/uploads/pdf/skill_builders/no10_machineability_ratings.pdf
5. Titanium, Ti. *Online Materials Information Resource - MatWeb* [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=66a15d609a3f4c829cb6ad08f0dafc01&ckck=1>
6. Titanium, Ti. *Online Materials Information Resource - MatWeb* [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=098700ed63b24b14bd3bfdbec937489f>
7. DENTI, L., E. BASSOLI, A. GATTO, E. SANTECCHIA a P. MENGUCCI. Fatigue life and microstructure of additive manufactured Ti6Al4V after different finishing processes. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2019, 755, 1-9 [cit. 2020-07-03]. DOI: 10.1016/j.msea.2019.03.119. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509319304320>
8. ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
9. DVOŘÁK, David. *Přehled moderních technologií dokončování obecných tvarových ploch*. Praha: ČVUT 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
10. Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, 16.05.2002 [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-proupravu-povrchu.html>
11. Odstředivá zařízení. Rösler – specialista pro úpravy povrchů [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/cz-cs/produkty/omilaci-stroje/odstredivazarizeni/>

12. Kruhové vibrátory. Rösler – specialista pro úpravy povrchů [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/cz-cs/produkty/omilaci-stroje/kruhovevibratory/>
13. Závod mechaniky strojů Avalon [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://cz.avalon-machines.pl/>
14. Rotary vibrators [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: https://cz.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/CZ_CS_Rotary_vibrator_GB_145.pdf
15. Tub vibrators [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: https://cz.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/CZ_CS_Tub_vibrators_GB_129.pdf
16. DISC FINISHING UNITS [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: https://www.otec.de/fileadmin/uploads/Downloads/Prospekte/PB_CF_Element_EN.pdf
17. Dryers [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: https://cz.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/CZ_CS_Dryers_GB_148.pdf
18. Proudová omílací zařízení. OTEC Präzisionsfinish GmbH: otec.de [online]. [cit. 2018-06-24]. Dostupné z: <https://www.otec.de/cz/produkty/omilani/proudova-omilacizarizeni/>
19. OTEC Präzisionsfinish GmbH: Automatická řada SF. OTEC Präzisionsfinish GmbH: otec.de [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://www.otec.de/cz/produkty/omilani/proudova-omilacizarizeni/automaticka-rada-sf/>
20. VLEČNÁ OMÍLACÍ ZAŘÍZENÍ – VÝROBNÍ ŘADA DF. OTEC Präzisionsfinish GmbH: otec.de [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://www.otec.de/cz/produkty/omilani/vlečna-omilaci-zarizeni/vyrobnirada-df/>
21. Drag finishing [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: https://cz.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/CZ_CS_Drag_Finishing_GB_164.pdf
22. DF-5 - deburring, smoothing & polishing of knee joints - mass finishing with OTEC. In: Youtube [online]. 11. 12. 2014 [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://youtu.be/3HGcUkYpwCg>
23. Surf-Finisher. Rösler – specialista pro úpravy povrchů [online]. [cit. 2018-06-24]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/cz-cs/produkty/omilaci-stroje/surf-finisher/>
24. Surf-Finisher [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: https://cz.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/CZ_CS_SurfFinisher_GB_269.pdf

25. Technologie ISF®: Velmi jemné povrchy. Rösler – specialista pro úpravy povrchů [online]. [cit. 2018-06-24]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/czcs/technologie-opracovani/isfr/>
26. MEDIA AND COMPOUNDS. In: *Walther Trowal LLC - USA* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: https://dzm.54b.myftpupload.com/wp-content/uploads/2019/10/bro_mediacompounds_2014.pdf
27. Procesní média. *OTEC Präzisionsfinish GmbH: otec.de* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.otec.de/cz/produkty/procesni-media/>
28. Consumables. In: *Rösler* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: https://cz.rosler.com/fileadmin/Files/Prospekte/Gleitschlifftechnik/CZ_CS_Technologicke_prostredky_GB_130.pdf
29. MEDIA & COMPOUND. BV Products [online]. [cit. cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <http://www.bvproducts.com.au/media-compound>
30. *Polishing method for turbine components* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US20170361422A1>
31. *S.P.M. Mould Polishing System* [online]. [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <http://www.spm-polish.com/products.php?id=5>
32. MAMRILLA, Dávid. Návrh a výroba přípravků pro technologické zkoušky SPM leštění. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Pitrmuc
33. BRH 20 CNC. *Mikronex* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BRH20CNC.pdf>
34. *3M™ Cubitron™ II Gear Grinding Wheels* [online]. 2012 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://multimedia.3m.com/mws/media/8420200/3mtm-cubitron-ii-gear-grinding-wheels-brochure-pdf.pdf>
35. *R.rhenus XY 100 RS* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <http://www.pingyiao.com/en/rhenus/rh5/pdf/r.rhenus%20XY%20100%20RS.pdf>

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Procentuální podíl hliníkových, titanových a ocelových slitin a CFRP na hmotnosti velkých moderních letadel a plynových turbínových motorů [1].....	6
Obrázek 2 - Navýšení maximální provozní teploty titanových slitin [1].....	7
Obrázek 3 -Struktura povrchu pořízená pomocí SEM [7].	11
Obrázek 4 - Výsledky testu [7]	12
Obrázek 5 - Příklad kruhového vibrátoru [12]	13
Obrázek 6 - Řez kruhovým vibrátorem [14].....	14
Obrázek 7 - Řez žlabovým vibrátorem [15]	14
Obrázek 8 - Diskové odstředivé zařízení [16]	15
Obrázek 9 - Proudové omílací zařízení [18].....	17
Obrázek 10 - Zařízení pro vlečné omílání [21].....	18
Obrázek 11 - Surf-Finisher [24].....	19
Obrázek 12 - Příklad keramických tělísek [26].....	21
Obrázek 13 - Příklad plastových tělísek [26]	21
Obrázek 14 - Příklad ocelových tělísek [26].....	21
Obrázek 15 - Brusný prášek [26].....	22
Obrázek 16 – Omílací stroj SPM LPG1 [31].....	23
Obrázek 17 - Schéma pracovního prostoru [30].....	23
Obrázek 18 - Nákres měděného plátku [30]	24
Obrázek 19 - Navrhnuté zkušební tělísko [32].....	26
Obrázek 20 – Bruska na plochu BRH 20 CNC	27
Obrázek 21 - Brusný kotouč 3M Cubitron II	28
Obrázek 22 - Přípravek na upnutí plechu pro broušení rovinné plochy, pohled shora	28
Obrázek 23 - Přípravek na upnutí plechu pro broušení rovinné plochy, pohled z boku	29
Obrázek 24 - Přípravek na upnutí plechu pro broušení ostří, pohled z boku.....	29
Obrázek 25 - Přípravek na upnutí plechu pro broušení ostří, pohled shora.....	29
Obrázek 26 - Pohled na zbroušený titanový plech po prvních třech krocích výroby....	31
Obrázek 27 - Dokončená zkušební tělíska šířky 10 mm.....	32
Obrázek 28 - Dokončená zkušební tělíska šířky 20 mm.....	32

Obrázek 29 - Original Arkograf	32
Obrázek 30 - Vzorky 1-19, šířka 10 mm.....	33
Obrázek 31 - Vzorky 20-37, šířka 20 mm	33
Obrázek 32 - Vzorky 56-60, různé šířky	33
Obrázek 33 - Souřadný systém rámu a orientace tělísek	35
Obrázek 34 - Osazení zkušebního rámu, souřadnicový systém a systém pozic	35
Obrázek 35 - Oblast vhodná pro měření	36
Obrázek 36 - Navrhnutý přípravek pro ruční měření.....	36
Obrázek 37 - Řez přípravkem s umístěným zkušebním tělískem (červeně).....	36
Obrázek 38 - Vyznačená místa pro měření tloušťky vzorku	37
Obrázek 39 - Zaoblená hrana po omílání.....	38
Obrázek 40 - Zbroušené vzorky pro vyhodnocení zaoblení ostří	38
Obrázek 41 - Mikroskop VHX-6000.....	39
Obrázek 42 - Základní parametry váhy WPS 110/C.....	39
Obrázek 43 - Osazení rámu – první test.....	42
Obrázek 44 - Značení pro kružnicový graf	45
Obrázek 45 – Zaoblení ostří vzorku 3, ostří A (vlevo) a ostří B (vpravo)	48
Obrázek 46 - Zaoblení ostří vzorku 9, ostří A (vlevo) a ostří B (vpravo)	48
Obrázek 47 - Zaoblení ostří vzorku 14, ostří A (vlevo) a ostří B (vpravo).....	49
Obrázek 48 - Zaoblení ostří vzorku 11, ostří A (vlevo) a ostří B (vpravo).....	49
Obrázek 49 - Osazení rámu – druhý test	50
Obrázek 50 - Osazení rámu – testy 3-7	58
Obrázek 51 - Nedeformovaný vzorek č. 31	68
Obrázek 52 - Deformované ostří A (vzorek č. 34), pohled shora	68
Obrázek 53 - Deformované ostří A (vzorek č. 34), pohled zdola	68
Obrázek 54 - Deformované ostří A (vzorek č. 43), pohled shora	68
Obrázek 55 - Deformované ostří A (vzorek č. 43), pohled zdola	68

10 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Mechanické vlastnosti slitin titanu při pokojové teplotě, jejich vlastnosti a využití [2].....	8
Tabulka 2 - Hodnocení obrobitelnosti [3].....	9
Tabulka 3 - Méně běžné materiály při omílání a jejich použití.....	22
Tabulka 4 - Základní technické parametry brusky BRH 20 CNC [33]	27
Tabulka 5 - Řezné podmínky pro broušení plochy.....	30
Tabulka 6 - Řezné podmínky pro broušení vrcholového úhlu	31
Tabulka 7 - Osazení rámu – první test	42
Tabulka 8 – Naměřené hodnoty úběrů pro první test.....	43
Tabulka 9 - Vyhodnocení hypotéz pro stranu A (1. test)	46
Tabulka 10 - Vyhodnocení hypotéz pro stranu B (1. test).....	47
Tabulka 11 - Osazení rámu pro druhý test	50
Tabulka 12 - Naměřené hodnoty úběrů pro druhý test.....	51
Tabulka 13 - Vyhodnocení hypotéz pro stranu A (2. test).....	55
Tabulka 14 - Vyhodnocení hypotéz pro stranu B (2. test).....	56
Tabulka 15 - Shrnutí výsledků (1. a 2. test)	57
Tabulka 16 - Osazení rámu pro zbývající testy	58
Tabulka 17 - Výsledky testů 3-7	59
Tabulka 18 - Výsledky testů 3-7, pokračování	60
Tabulka 19 - Rozdíly úběrů na jednotlivých tělískách.....	61
Tabulka 20 - Porovnání zvýšení úběrů.....	62
Tabulka 21 - Porovnání zvětšení úběrů.....	63

11 Seznam grafů

Graf 1 - Výsledné hodnoty úběru prvního testu	44
Graf 2 - Výsledné průměrné hodnoty prvního testu	44
Graf 3 - Zobrazení úběrů na jednotlivých místech rámu	45
Graf 4 - Zaoblení ostří (1. test)	47
Graf 5 - Výsledné hodnoty úběru druhého testu	52
Graf 6 - Výsledné průměrné hodnoty druhého testu	53
Graf 7 - Zobrazení úběrů na jednotlivých místech rámu (druhý test).....	53
Graf 8 – Porovnání úbytků tloušťky a hmotnosti (druhý test).....	54
Graf 9 - Výsledné hodnoty úběru testů 3-7	60
Graf 10 - Výsledné průměrné hodnoty testů 3-7	61
Graf 11 - Porovnání testů – konstantní čas 120 minut, proměnné množství abraziva	62
Graf 12 - Porovnání testů – konstantní množství abraziva 1320 g, proměnný čas	63
Graf 13 – Porovnání úbytků tloušťky a hmotnosti (3-7 test).....	64
Graf 14 -Úbytky tloušťky (Test 7).....	65
Graf 15 - Úbytky tloušťky (Test 5).....	65
Graf 16 - Úbytky tloušťky (Test 6).....	65
Graf 17 - Úbytky tloušťky (Test 1).....	65
Graf 18 - Úbytky tloušťky (Test 3).....	65
Graf 19 - Úbytky tloušťky (Test 4).....	65
Graf 20 - Rovnice úběrů v ose X pro 1320 g abraziva	66
Graf 21 - Rovnice úběrů v ose Z pro 1320 g abraziva	66
Graf 22 - Rovnice úběrů v ose Z pro čas omílání 120 min	67
Graf 23 - Rovnice úběrů v ose Z pro čas omílání 120 min	67

12 Seznam symbolů a zkratek

3D	[-]	trojrozměrný (systém)
A ₅	[%]	tažnost
a _e	[mm]	pracovní záběr
CFRP	[-]	carbon-fiber-reinforced polymer
ISF	[-]	izotropické superfinišování
PBF	[-]	powder bed fusion
R _a	[um]	střední aritmetická úchylka povrchu
R _m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
R _{p02}	[MPa]	smluvní mez kluzu
R _z	[um]	maximální úchylka povrchu
RŽS	[-]	rozpouštěcí žíhání a stárnutí
SEM	[-]	<i>scanning electron microscope</i>
SLA	[-]	stereolitografie
t	[min]	čas
TS	[-]	tažení za studena
v _c	[m/s]	řezná rychlost
v _f	[m/min]	rychlost podélného posuvu obrobku
VT	[-]	válcování za tepla
z	[mm]	příčný krok obrobku na průchod
Ž	[-]	žíhání