



Diplomová práce

Topografie a drsnost povrchu při mikrofrézování

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Autor práce:

Bc. Dominika Čadková

Vedoucí práce:

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Topografie a drsnost povrchu při mikrofrézování

Jméno a příjmení:

Bc. Dominika Čadková

Osobní číslo:

S21000218

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Zadávající katedra:

Katedra obrábění a montáže

Akademický rok:

2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o problematice mikroobrábění se zaměřením na mikrofrézování.
2. Volba obráběného materiálu, řezných nástrojů (mikrofréz) a řezných podmínek bez procesního média.
3. Návrh metodiky experimentů pro mikrofrézování bez procesního média.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků z hlediska vytvořené topografie a drsnosti povrchu (mikrostrukturovaný povrch) v rámci mikrofrézování. Potenciál/uplatnění vytvořeného mikrostrukturovaného povrchu.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce:

Jazyk práce:

tištěná/elektronická

Čeština

Seznam odborné literatury:

1. ZHANG, Shaojian, et al. Advances in ultra-precision machining of micro-structured functional surfaces and their typical applications. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 142: 16-41.
2. BILÍK, O. Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění. Ostrava: Vysoká škola báňská ? TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80?7078?228?5.
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.
4. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. Jakost obráběných povrchů. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80?7044?539?4.
5. CHEN, Ni, et al. Advances in micro milling: From tool fabrication to process outcomes. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 160: 103670.

Vedoucí práce:

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže

Datum zadání práce:

2. října 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 2. dubna 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. et Ing. Štěpánka
Dvořáčková, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Anotace

Diplomová práce se zabývá problematikou mikrofrézování a shrnuje dosavadní poznatky o této problematice. Hlavním cílem diplomové práce je obrození hierarchických mikrostruktur s využitím mikrofrézování a následné zkoumání dosažené přesnosti. Práce je rozdělena do 3 hlavních částí – teoretická část, metodická část a experimentální část.

Teoretická část obsahuje nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky. Definiuje technologii mikrofrézování, porovnává ji s konvenčním frézováním a shrnuje dosavadní poznatky.

Metodická část práce popisuje přípravu vzorků a metodiku prováděných experimentů. Dále popisuje použité stroje, zařízení, nástroj a obráběný materiál.

Experimentální část práce je věnována samotné realizaci experimentů. Je zde uvedena výroba vzorků, naměřené hodnoty, replikace vzorků.

Klíčová slova

Mikroobrábění, mikrofrézování, velikostní efekt, hierarchické mikrostruktury, proces replikace, repliky.

Annotation

The diploma thesis deals with the issue of micro-milling and summarizes the current findings on this issue. The main goal of the thesis is the machining of hierarchical microstructures using micromilling and the subsequent investigation of the achieved accuracy. The work is divided into 3 main parts – theoretical part, methodological part and experimental part.

All necessary basic terms concerning researched topic are mentioned in the theoretical part of the thesis. It defines the micromilling technology, compares it with conventional milling and summarizes the findings so far.

The methodological part of the thesis describes the preparation of samples and the methodology of the experiments. It also describes the machines, equipment, tool and machined material used.

The experimental part of the work is dedicated to the actual implementation of the experiments. Sample production, measured values, sample replication are listed here.

Keywords

Micromachining, micromilling, size effect, hierarchical microstructures, replication process, replicas.

Poděkování

Děkuji vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. et. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. za její odbornou pomoc, ochotu, cenné rady a čas, který mi při zpracování této diplomové práce věnovala. Dále bych chtěla poděkovat paní doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D. a Ing. Arturovi Knapovi a Bc. Martinovi Váňovi za jejich rady, čas a úsilí, které mi poskytli.

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Teoretická část	14
2.1	Technologie mikrofrézování	14
2.1.1	Srovnání mikrofrézování s konvenčním frézováním	16
2.1.2	Mechanismus úběru materiálu	19
2.1.3	Velikostní efekt	22
2.2	Mikrofrézy.....	24
2.2.1	Požadavky na mikrofrézy a jejich materiály	26
2.2.2	Řezné materiály mikrofréz	28
3	Metodika experimentu	33
3.1	Obráběný materiál.....	33
3.2	Nástroj.....	33
3.3	Obráběcí stroj.....	34
3.4	Řezné podmínky.....	37
3.5	Měřicí zařízení	37
3.6	Popis měřených parametrů.....	38
3.6.1	Mikro rozměry	38
3.6.2	Drsnost povrchu	38
3.7	Statistické vyhodnocení dat.....	39
3.8	Příprava vzorků a výběr reliéfů.....	39
3.9	Replikace vzorků.....	45
4	Experimentální část.....	46
4.1	Vzorek č. 1 – reliéf typu vln.....	46
4.1.1	Výroba a řezné podmínky	46
4.1.2	Měření profilu a plošné drsnosti.....	47
4.1.3	Replika	50
4.2	Vzorek č. 2 – reliéf typu kuželů	52
4.2.1	Výroba a řezné podmínky	52
4.2.2	Měření profilu a plošné drsnosti.....	53
4.2.3	Replika	56
4.3	Vzorek č. 3 – reliéf typu komolých jehlanů.....	58
4.3.1	Výroba a řezné podmínky	58
4.3.2	Měření profilu a plošné drsnosti.....	58
4.3.3	Replika	62
4.4	Vzorek č. 4 – reliéf typu podlouhlých válců	64
4.4.1	Výroba a řezné podmínky	64

4.4.2	Měření profilu a plošné drsnosti.....	65
4.4.3	Replika	68
4.5	Výroba mikrostruktur ČVUT	70
5	Diskuze.....	73
6	Závěr	81
	Seznam použité literatury.....	83

Seznam použitých zkratk a symbolů

2D	[-]	Dvourozměrný
3D	[-]	Třírozměrný
A	[%]	Tažnost
a_p	[mm]	Hloubka řezu
a_e	[mm]	Šířka řezu
AW	[-]	A určuje hliník, W určuje tvářené výrobky
CAD	[-]	Počítačem podporované navrhování
CAM	[-]	Počítačem řízená výroba
CBN	[-]	Kubický nitrid bóru
CNC	[-]	Počítačem řízený obráběcí stroj
ČVUT	[-]	České vysoké učení technické v Praze
D	[mm]	Průměr nástroje
d	[mm]	Průměr stopky nástroje
d_l	[mm]	Průměr paprsku laseru
EN	[-]	Evropská norma
f	[kHz]	Frekvence
f_z	[mm]	Posuv na zub
FGD	[-]	Jemnozrný diamant
FIB	[-]	Fokusaný iontový paprsek
h	[mm]	Tloušťka nedeformované třísky
h_m	[mm]	Minimální tloušťka nedeformované třísky
h_p	[μ m]	Hloubka profilu
L	[mm]	Celková délka
L_1	[mm]	Funkční délka
MUCT	[mm]	Minimální tloušťka nedeformované třísky
n	[ot/min]	Otáčky vřetene stroje
NC	[-]	Číslicově řízený
NCD	[-]	Nanokrystalický diamant
P	[W]	Výkon laseru
p_p	[μ m]	Rozteč profilu
PKD	[-]	Polykrystalický diamant
PKNB	[-]	Polykrystalický kubický nitrid bóru
PLA	[-]	Pulzní laserová ablace
R	[mm]	Poloměr zaoblení břítu
r_p	[μ m]	Průměr jednotlivých prvků reliéfu
R_a	[μ m]	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
R_m	[MPa]	Pevnost v tahu
R_{max}	[mm]	Maximální zbytková výška
$R_{p0,2}$	[MPa]	Mez kluzu
R_{teor}	[mm]	Teoretická zbytková výška
R_z	[μ m]	Největší výška profilu drsnosti
S_a	[μ m]	Plošná drsnost
SEM	[-]	Skenovací elektronový mikroskop
SGS	[-]	Studentská grantová soutěž
SK	[-]	Slinutý karbid
SNOP	[-]	(Soustava) stroj-nástroj-obrobek-přípravek

TUL	[-]	Technická univerzita v Liberci
τ_p	[fs]	Doba pulsu
UCT	[-]	Nedeformovaná (maximální) tloušťka třísky
USP	[-]	Ultrakrátký pulsní laser
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
v_f	[mm/min]	Rychlost posuvu
WEDM	[-]	Elektroerozivní řezání drátem
\bar{x}	[-]	Výběrový aritmetický průměr
γ_{eff}	[°]	Efektivní úhel čela
γ	[°]	Úhel čela nástroje

1 Úvod

Poptávka po miniaturizovaných produktech a zařízení roste. Výroba miniaturních produktů a mikroproduktů, o rozměrech v rozmezí několika desítek nanometrů až několika milimetrů, je stále více poptávaná.

V současné době jsou využívána mikrovýrobní řešení WEDM (*elektroerozivní řezání drátem*), PLA (*pulzní laserová ablace*) nebo FIB (*fokuzovaný iontový paprsek*). Tyto výrobní metody je však obtížné nastavit nebo přesně ovládat. Problematikou u těchto technologií je také jejich použitelnost na konkrétní typ materiálu. Například metodu WEDM lze použít pouze pro vodivé materiály.

Mikrofrézování je jednou z nejspolehlivějších mikrovýrobních řešení. Mikrofrézy dosahují vysoké integrity obroběného povrchu a rozměrové nebo geometrické přesnosti. S využitím víceosého řízení lze obrobit komplexní obrysy. Mikrofrézování má velmi široké uplatnění v lékařském průmyslu při výrobě čipů do inzulínových pump, v dentálním průmyslu, v elektrotechnice na výrobu mikroslotů u mobilních telefonů.

Mikrofrézování je rychle se rozvíjející technologie a velmi aktuální problematika. Zvyšující se poptávka žene tuto technologii kupředu, a proto je nutné tuto problematiku nadále zkoumat a vyvíjet.

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou mikrofrézování a zkoumá hierarchicky vytvořenou strukturu s různými mikrovzory v měřítku 200 μm . Různorodost mikrovzorů závisela na jejich velikosti, výšce a rozteči mezi jednotlivými prvky vybraných vzorů.

Hlavním cílem diplomové práce je obrobění hierarchických mikrostruktur s využitím mikrofrézování a následné zkoumání dosažené přesnosti.

Diplomová práce je rozdělena do čtyř částí: teoretické, metodické, experimentální a závěrečné. Teoretická část práce souvisí se současným stavem řešené problematiky, charakterizuje proces mikrofrézování, jeho podstatu a vysvětluje důležité vlivy, které jej ovlivňují.

Metodická část diplomové práce se věnuje popisu a přípravě experimentu. Definuje použité stroje a zařízení, nástroj, obráběný materiál, řezné podmínky, přípravu vzorků a popisuje proces replikace.

Experimentální část se zabývá výrobou hierarchických mikrostruktur pomocí technologie mikrofrézování a dosaženými výsledky z hlediska mikropřesnosti.

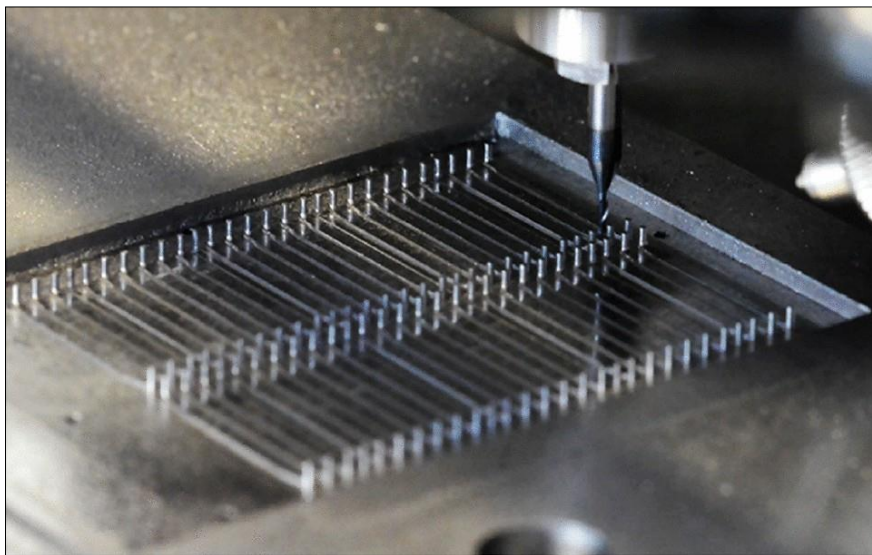
Závěrečná část zhodnocuje a diskutuje výsledky získané v rámci realizovaného výzkumu.

2 Teoretická část

V teoretické části práce jsou shrnuty dosavadní poznatky o problematice mikrofrézování. Je vysvětlena její podstata, přednosti, nedostatky a je porovnávána s konvenčním frézováním. Dále jsou zde popsány poznatky o nástrojích – mikrofrézách, jejich požadavky a rezné materiály, ze kterých se mikrofrézy vyrábějí.

2.1 Technologie mikrofrézování

Mikrofrézování je z hlediska kinematiky podobné jako konvenční frézování. Jedná se o mechanický proces odstraňování materiálu pomocí geometricky definovaných břitů v podobě třísek, kde nedeformovaná (nebo maximální) tloušťka třísky UCT (z anglického „Undeformed Chip Thickness“) je velikostně řádově v mikrometrech a méně. Je to dokončovací metoda, u které se dosahuje drsnosti povrchu menší než $Ra = 0,1 \mu\text{m}$, zatímco u konvenčního frézování se drsnost povrchu pohybuje nad $Ra = 1,6 \mu\text{m}$. [1] Běžné drsnosti povrchu $Ra = 0,1 \mu\text{m}$ se dosahuje u dokončovacích metod obrábění, jako je lapování nebo superfinišování.



Obr. 2.1 - Mikrofluidní forma: 4 pole po 28 kolících o průměru 0,8 mm a výšce 2 mm [2]

Nástroje pro mikrofrézování jsou jedinečné, mají velikost průměru menší než 1 mm, poloměr břitu je obvykle 0,1 – 10 μm . Malý průměr nástrojů vyžaduje extrémně vysoké otáčky a vysokou tuhost vřetena stroje. [1]

Přestože mikrofrézování lze provádět na konvenčním CNC obráběcím centru dodatečnou montáží vysokorychlostního vřetena, ideálně by se mikrofrézování mělo provádět na precizních frézkách nebo speciálně navržených strojích, určených pro účel mikrofrézování s vysokou tuhostí a běžně používanými provozními otáčkami vyšší než 100 000 ot. /min. [3]

Tvorba třísek při mikrofrézování je komplikovaná a specifická pro obráběný materiál. Každý materiál vyžaduje pro správné tvoření třísky vlastní metodiku. Zde je rozhodující správný výběr nástroje, materiál nástroje, povlak a geometrie. Vše musí být zohledněno tak, aby se nejen utvořila správná tříška, ale také aby se odstranila z pracovní zóny. V zásadě platí, že čím menší je průměr nástroje, tím důležitější je tvorba třísky a její odvod. Bezpečný a účinný odvod třísek pomáhá vytvořit spolehlivý proces obrábění. [1, 3, 4] Pochopení mechanismů tvorby třísek u mikrofrézování je důležité pro zlepšování kvality obráběných dílů.

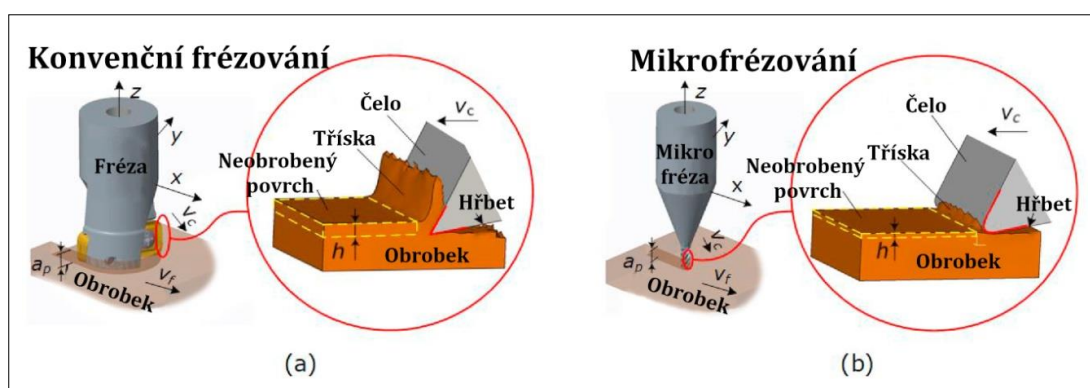


Obr. 2.2 - Proces mikrofrézování [5]

Aplikace procesní kapaliny při mikrofrézování je složitá. Moderní strategie chlazení obvykle zahrnují použití vysokotlakého chladicího média, který se však obvykle nepoužívá v aplikacích s malými nástroji, protože samotný tlak chladicí kapaliny by mohl stačit k poškození nástroje. Při těchto operacích se používá vzduch nebo vzduchová či olejová mlha. [4]

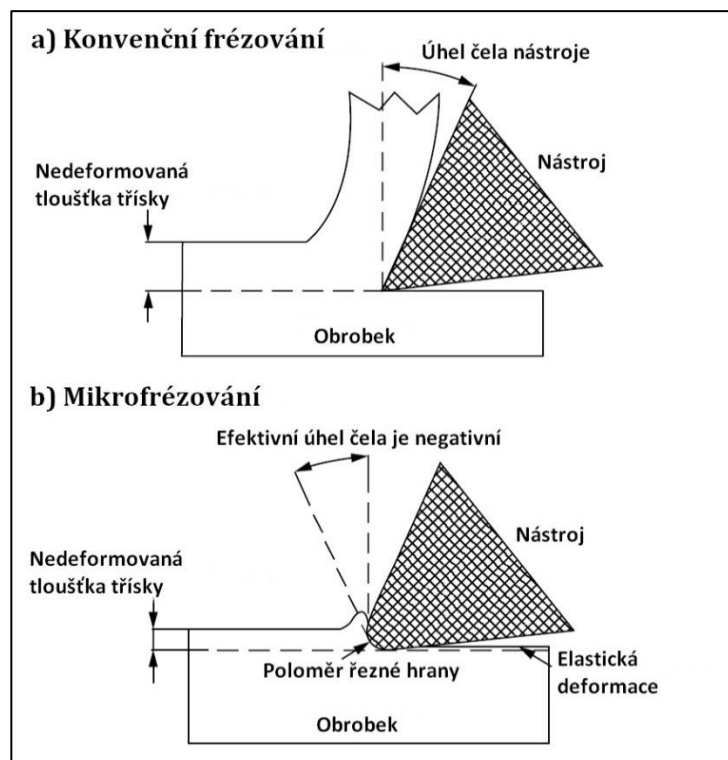
2.1.1 Srovnání mikrofrézování s konvenčním frézováním

Mikrofrézování v porovnání s konvenčním frézováním má malou tloušťkou nedeformované (*maximální*) třísky UCT, vyšší nároky nejen na obráběcí stroj ale i na CAM hardware, z důvodu přesnějšího výpočtu drah. Vlivem malých rozměrů nástrojů a velikosti UCT dochází k nežádoucím jevům, nazvaných pod pojmem velikostní efekt (*z ang. „size effect“*), které se u konvenčního frézování až tolik neprojevují. Mikrofrézy jsou spíše vyráběny z tvrdších a pevnějších materiálů a jejich geometrie je zjednodušená a může být dokonce i asymetrická. Z důvodu malých rozměrů a přísných tolerancí v řádu μm je výroba mikrofréz složitější a nákladnější. Při mikrofrézování se musí brát v potaz i vliv struktury materiálu obrobku, především velikost a tvrdost zrna. [1, 3]



Obr. 2.3 - Porovnání a) konvenčního frézování s b) mikrofrézováním [1]

Obecně nelze říci, že mikrofrézování je pouhým zmenšením konvenčního frézování (*makrofrézování*), neboť některé zanedbatelné chování u makrofrézování činí u mikrofrézování zanedbatelné. To má za následek odlišné a komplikované chování při úběru materiálu v procesu mikroobrábění. Při obrábění v makro měřítku je tloušťka nedeformované třísky UCT obecně větší než poloměr břitu nástroje, proto lze hranu břitu zanedbat a nástroje lze považovat za ostré, viz obr. 2.4. V tomto případě se úběr materiálu realizuje účinkem maximálního smykového napětí. V momentě, kdy se UCT sníží na řádově stejnou velikost jako poloměr řezné hrany nástroje, nástroj již nelze považovat za ostrý a efektivní úhel čela bude negativní. Při úběru materiálu pak dochází spíše ke stlačování materiálu než ke střížnému mechanismu. [3]

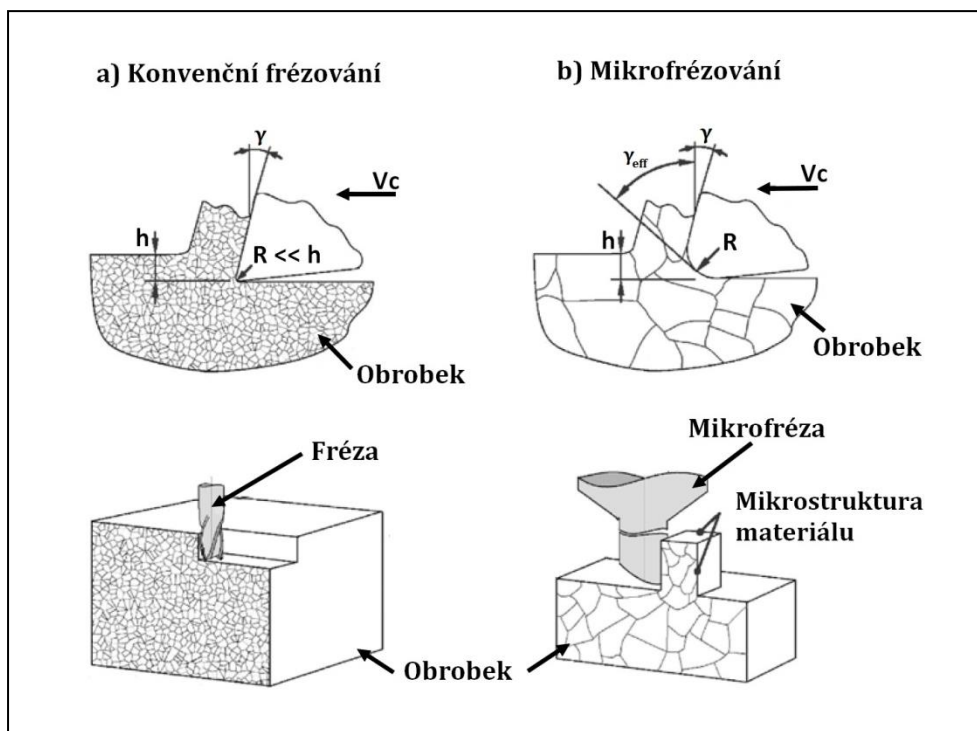


Obr. 2.4 – Schématické znázornění interakce nástroj-obrobek: a) konvenční frézování, b) mikrofrézování [3]

Na rozdíl od konvenčního frézování se během procesu mikrofrézování **tloušťka nedeformované třísky UCT** stává srovnatelnou s poloměrem řezné hrany nástroje či velikosti zrn obráběného materiálu, čímž vzniká řada kritických problémů, jako:

- 1) efekt poloměru řezné hrany,
- 2) efektivní úhel čela se stává negativním,
- 3) minimální tloušťka třísky,
- 4) vliv mikrostruktury.

Tyto problémy jsou velmi důležité a lze je všechny kategorizovat jako tzv. velikostní efekt („*size effect*“), více popsán v kapitole 2.1.3. [1, 3]



Obr. 2.5 – Znázornění a porovnání velikosti struktury obráběného materiálu u konvenčního frézování a mikrofrézování, vyplývající velikostní efekt způsobený vlivem zmenšení poloměru řezného nástroje, který je srovnatelný s tloušťkou nedeformované třísky či velikostí zrn obráběného materiálu [3]

Měrná řezná energie, energie potřebná k odstranění jednotkového objemu materiálu obrobku, je u mikrofrézování desetkrát větší než u konvenčního frézování. Větší měrná řezná energie je způsobena velkým poměrem poloměru břitu k UCT. [1]

Přednosti mikrofrézování jsou:

- vysoká přesnost obrobku,
- vysoká kvalita,
- výroba vysoce náročných dílů s mikrostrukturou,
- široký aplikační potenciál.

Nedostatky mikrofrézování jsou:

- obtížně předvídatelný proces kvůli velikostnímu efektu,
- obtížně monitorovatelný proces kvůli relativně malým silám a opotřebení,
- mikrofrézování klade nové nároky na CAM, především na výpočet mikrodrah a jejich přesnosti,

- během procesu mikroobrábění není řezná část nástroje vizuálně vidět a ani slyšet,
- složité odstranění otřepů vzniklých během mikrofrézování. [3, 6]

Na základě zjištěných poznatků je zpracována tab. 2.1, ve které jsou pro bližší představu uvedeny orientační hodnoty pro konvenční frézování a mikrofrézování.

Tab. 2.1 - Porovnání konvenčního frézování a mikrofrézování, převzato a upraveno z [1]

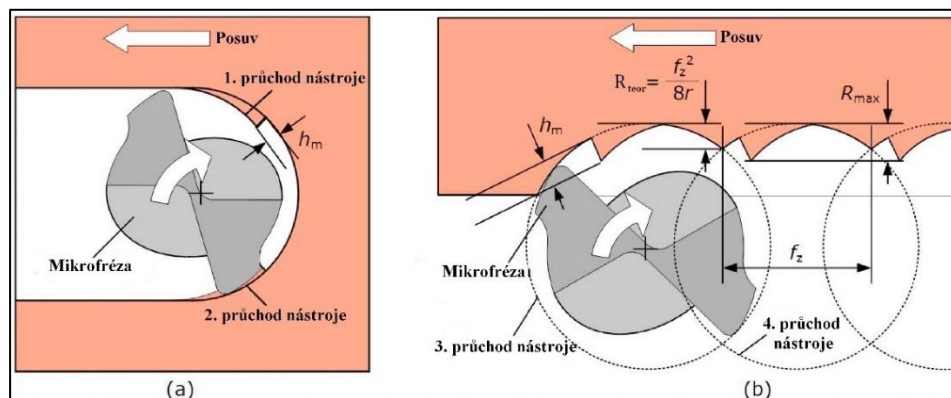
	Konvenční frézování	Mikrofrézování
Průměr nástroje	1 – 500 mm	< 1 mm
Tolerance průměru nástroje	20 - 3000 μm	0,1 - 5 μm
Poloměr břitu nástroje	1 – 100 μm	0,1 - 10 μm
Strukturální symetrie nástroje	symetrické	může být nesymetrické pro průměry < 200 μm
UCT (nedeformovaná tloušťka třísky)	0,1 – 10 mm	0,0001 – 0,05 mm
Je patrný velikostní efekt?	ne	ano
Geometrická a rozměrová přesnost	< 100 μm	0,1 – 5 μm
Dosahovaná drsnost povrchu R_a	> 1,6 μm	< 0,1 μm
Nároky na CAM (dráhy nástroje)	menší přesnost	větší přesnost

2.1.2 Mechanismus úběru materiálu

Tvorba třísky a její mechanismus úběru značně ovlivňuje celkový proces obrábění a kvalitu obrobeneho povrchu. Tvorba třísky nemusí nastat, pokud je *UCT* menší než hodnota, definovaná jako minimální tloušťka nedeformované třísky *MUCT* (z. *anglického* „*Minimum Undeformed Chip Thickness*“). [1] Minimální tloušťka nedeformované třísky (*MUCT*) tedy určuje, zda je tříska v procesu mikrofrézování tvořena nebo nikoliv. Predikce *MUCT* je důležitá pro přesnost, zbytková napětí, produktivitu a optimalizaci procesu mikrofrézování.

Stejně jako u konvenčního frézování, u mikrofrézování tloušťka třísky zpočátku roste od nuly, dosahuje maximální hodnoty (přibližně rovné posuvu na zub) a poté se ihned snižuje na nulu (obr. 2.6 a). Zatímco při bočním mikrofrézování (viz obr. 2.6 b), tloušťka klesá z maxima na nulu. Výše uvedené fáze mohou nastat postupně pro jeden břit, nebo ve většině běžných případů současně pro více břitů v závislosti na geometrii použitého nástroje (poloměr břitu a počet zubů) a parametru obrábění (posuv na zub). Pokud je během procesu mikrofrézování na vstupu UCT větší než MUCT, začne se tvořit tříška. V momentě, kdy se okamžitá UCT stane menší než MUCT, tvorba třísky se zastaví. Obrobený povrch pak může při této změně UCT vykazovat jak teoretickou zbytkovou výšku R_{teor} , tak i zbytkovou výšku R_{max} , znázorněné na obr. 2.6 b). [1]

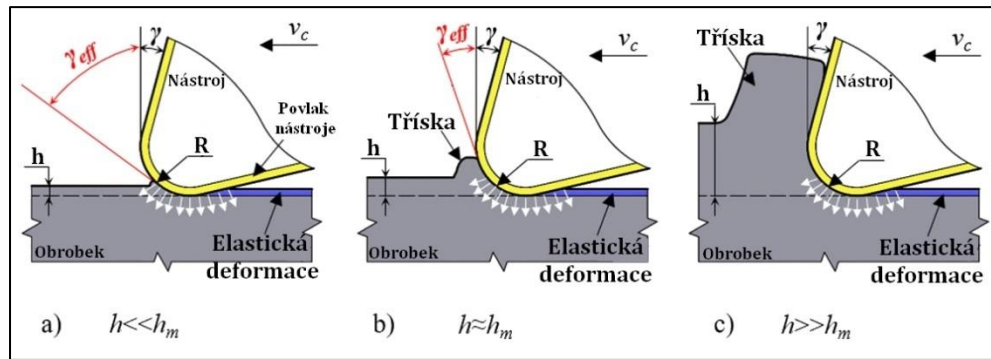
Mikrofrézovací proces je charakterizován tím, že se vlivem nekonstantní UTC mohou objevit tři typy mechanismu úběru třísky. [1, 3, 6]



Obr. 2.6 - Průchod nástroje při drážkovacím frézování a bočního mikrofrézování [1]

Pro následující popis je UCT označeno jako h , a MUCT jako h_m , viz obr. 2.7. Na základě teoretických, numerických a experimentálních metod je chápána následující teorie mechanismu úběru třísky. [1, 2, 3, 6] Na základě různých vztahů mezi h a h_m , chování materiálu v procesu mikrofrézování může zahrnovat:

- elastickou deformaci, platí pro $h \ll h_m$,
- elasticko-plastickou deformaci, pokud je h blízko ale stále menší než h_m ,
- tvorbu třísek, když platí $h > h_m$. [1]

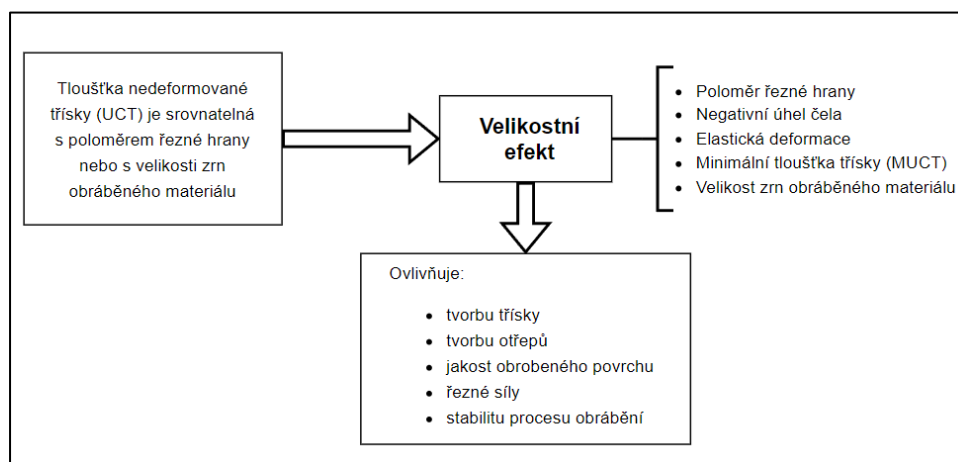


Obr. 2.7 – Schéma mechanismů úběru mikrotríscky: a) nedeformovaná tloušťka třísky (h) je menší než minimální nedeformovaná tloušťka třísky (h_m), b) hodnota h je srovnatelná jako hodnota h_m , c) hodnota h je větší než h_m [6]

- V elastické fázi, kde je h výrazně menší než h_m , dochází pouze k elastické deformaci, neboť vzniklý kontaktní tlak je menší než mez kluzu a řezný nástroj tlačí horní část materiálu pouze pod břit, místo aby jej odstranil. Materiál se deformuje převážně pružně a dochází k poškození struktury povrchu. Následkem je pak horší kvalita povrchu. Na základě provedených výzkumů má nejvýraznější vliv na velikost minimální tloušťky třísky poloměr břitu nástroje. [1, 6]
- V elasticko-plastické fázi se efektivní úhel čela nástroje stává vysoce negativním, dochází ke stlačení a nahromadění materiálu. Nahromaděný materiál se nejčastěji soustředí před zaoblenou řeznou hranou, kde se po dosažení určité úrovně (smykového napětí na mezi kluzu) stříhne vlivem smykového mechanismu. Tento periodický výskyt má za následek velkou drsnost obrobeného povrchu a podporuje vznik otrpů. Tato fáze neefektivně odebrává materiál, do procesu obrábění nepřidává žádnou důležitou hodnotu a je nežádoucí. [1, 3, 6]
- V této fázi tvorby třísky je obráběný materiál stlačován pod řeznou hranu nástroje a současně je stabilně odebrán smykovým mechanismem ve formě třísek, které plynule odcházejí po čele nástroje. [1, 6]

2.1.3 Velikostní efekt

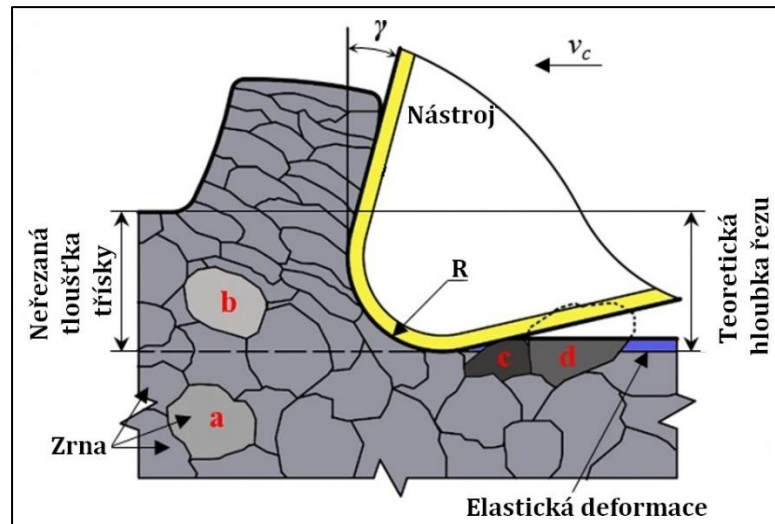
Přesná charakteristika velikostního efektu (z ang. „size effect“) není plně dohodnuta. Velikostní efekt je způsobený vlivem zmenšení poloměru řezného nástroje, který je srovnatelný s tloušťkou nedeformované třísky či velikosti zrn obráběného materiálu. Dle provedených výzkumů tento efekt ovlivňuje změnu řezných sil, proces tvorby třísky, tvorbu otřepů, vibrace, stabilitu procesu obrábění a kvalitu obrobeného povrchu. Lze zjednodušeně konstatovat, že velikostní efekt je charakterizován nelineárním nárůstem energie, spotřebované na jednotku objemu odebíraného materiálu, když UCT klesá na srovnatelnou hodnotu poloměru břitu řezného nástroje. [1, 2, 3, 6]



Obr. 2.8 – Velikostní efekt – co ho způsobuje a co ovlivňuje [3]

Velikost MUCT ovlivňuje chování odebíraného materiálu a stabilitu řezného procesu. Na základě provedených experimentů a výzkumů se podle Chen a spol. [1] došlo k závěru, že MUCT se pohybuje od 1/4 do 1/3 poloměru břitu nástroje, v závislosti na obráběném materiálu a řezných podmínkách.

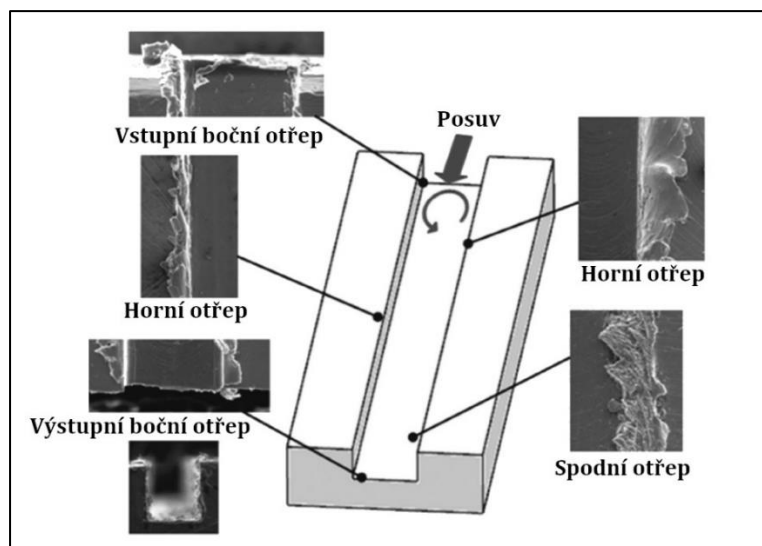
Mikrostruktura (velikost zrn, tvar a jejich rozložení) obráběného materiálu má významný vliv při mikrofrézování. Pokud je zrno umístěno zcela pod nebo nad teoretickou hloubkou řezu, jako je znázorněno na obr. 2.9 zrna: a, b, je účinek zanedbatelný. Pokud jsou zrna umístěna v teoretické hloubce řezu, zobrazena na obr. 2.9 zrno: c, d, je spotřeba energie na řezání vyšší, což může mít za následek vyšší vibrace, rychlejší opotřebení nástroje, větší tvorbu otřepů a horší kvalitu obrobeného povrchu. [6]



Obr. 2.9 - Schéma vlivu polohy zrn na proces mikrofrézování [6]

Bylo zjištěno, že řezná síla při mikroobrábění jemnozrné oceli (s průměrnou velikostí zrna $1,52 \mu\text{m}$) je menší, než u oceli s obvyklým zrnem (o průměrné velikosti zrna $9,1 \mu\text{m}$) a úhel stříhu jemnozrné oceli byl 5x větší než u oceli s normální zrnitostí. Oba výsledky potvrdily snadnou tvorbu třísek pro mikroobrábění jemnozrné oceli, což lze experimentálně přičíst pozorované oceli s většími zrny, u které se tříška tvořila nestabilně a zvlňovala se na okrajích drážky při mikroobrábění. [1]

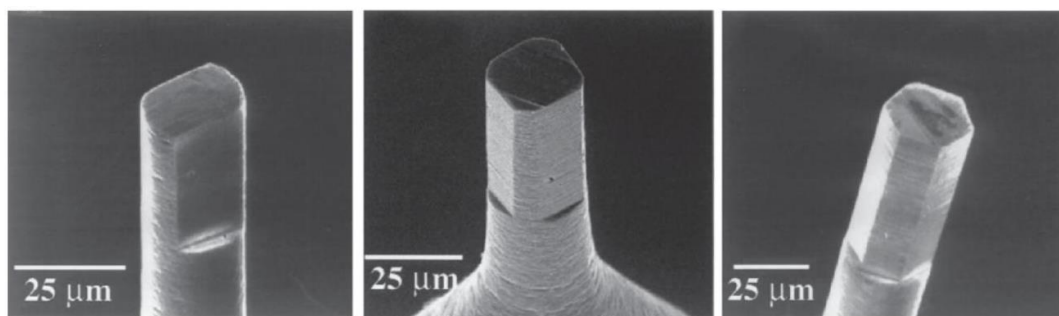
Tvorba otřepů během procesu mikrofrézování výrazně ovlivňuje kvalitu a přesnost obrobenej plochy. Dále je ovlivněna vlastnostmi materiálu, geometrií nástroje a dokonce i nestabilitou procesu, jako je házení nástroje. Tvorba otřepů může být také způsobena opotřebením řezného nástroje. Z provedených výzkumů bylo odvozeno, že posuv na zub má velký vliv na topografii povrchu při mikrofrézování, a proto se navrholo používat vyšší rychlosti posuvu pro snížení tvorby otřepů. [2]



Obr. 2.10 - Typy otřepů v mikrofrézovacím procesu [2]

2.2 Mikrofrézy

Mikrofrézovací nástroje jsou geometricky podobné těm, které se používají v konvenčních velikostech, ale často vykazují odlišné chování z hlediska procesu řezání. Rozměry mikrofrézy mají průměr menší než 1 mm s malým poloměrem břitu obvykle 0,1 – 10 μm . Mikrofréza je poměrně štíhlý nástroj, což má často za následek obtížně odhadnutelný proces, vysoké vibrace a krátkou životnost nástroje. Mikrofréza se skládá z řezné a upínací části, na řeznou část nástroje jsou kladeny vysoké požadavky. [1, 6]

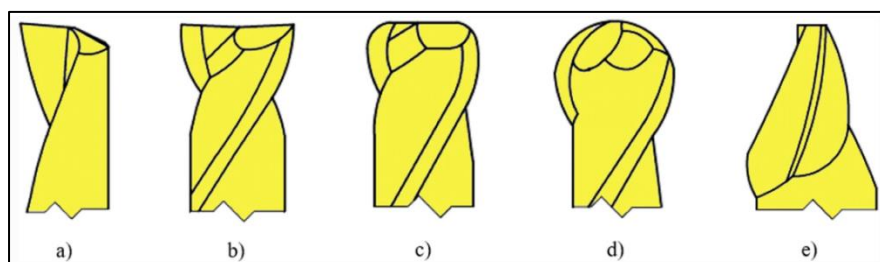


Obr. 2.11 - Mikrofrézy, o průměru 25 μm a poloměrem břitu menší než 0,1 μm , se (zleva) dvěma, čtyřmi a šesti řeznými hrany; vyrobené pomocí metody fokusovaného laserového paprsku [1]

Mikrofrézy lze rozdělit na monolitní a svařované. Je důležité zdůraznit, že klasické vyměnitelné břitové destičky u mikrofrézování nelze aplikovat, protože zmenšení velikosti nástroje má za následek i zmenšení velikosti zajišťovacích prvků (jako jsou upínací šrouby), což by snižovalo jejich pevnost a z hlediska konstrukce celé sestavy by to mohlo být degradující. [1]

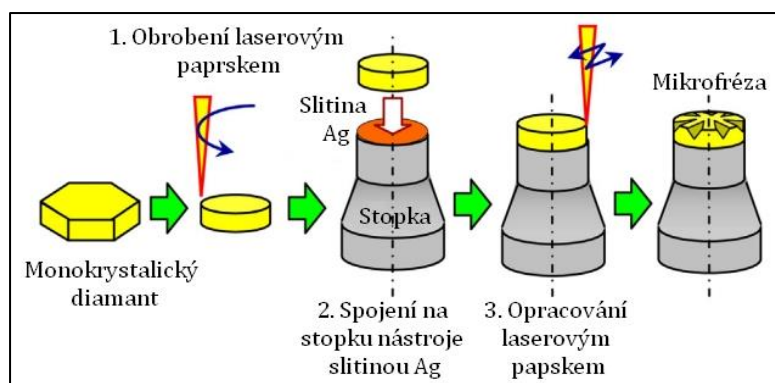
Strukturální symetrie mikrofréz se pro průměry větší než 200 μm doporučuje symetrická s více řeznými hranami. Pro mikrofrézy o průměru menším než 200 μm se doporučuje asymetrická jednozubá struktura. [1]

Monolitní mikrofrézy lze podle 2D profilu rozdělit na čelní, kulové a tvarové. Tvarové frézy jsou určeny pro specifické mikrostruktury, například pro pole V-kanálů. Většina monolitních mikrofréz je vyrobena z neultratvrdých materiálů (například ze slinutých karbidů), pro které je obtížné získat malé poloměry břitů menší než 1 μm . Náklady na monolitní mikrofrézy jsou nižší než náklady na mikrofrézy svařované. [1]

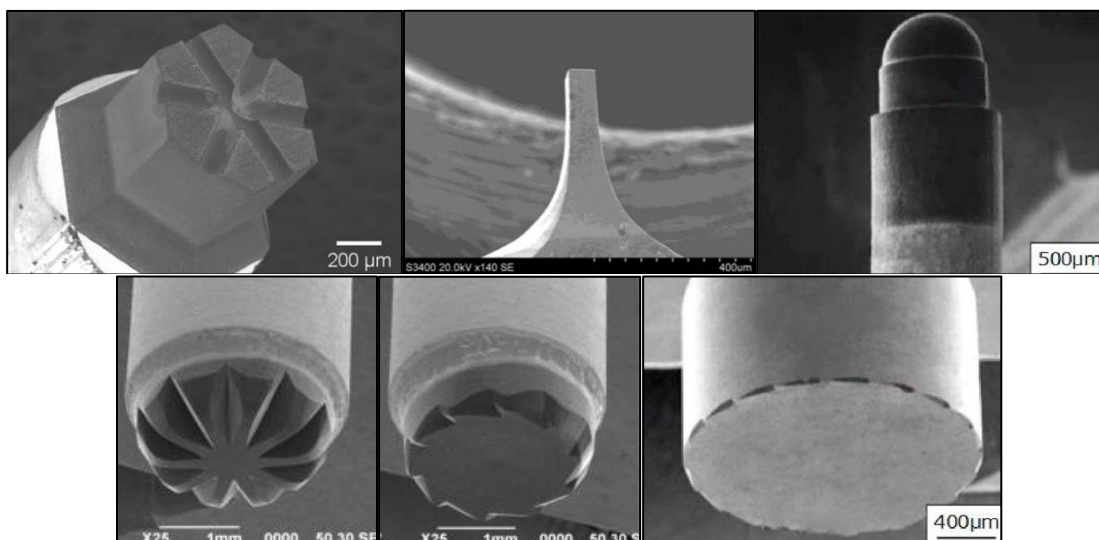


Obr. 2.12 - Schematické znázornění stopkových mikrofréz: a) jednobřitá čelní, b) dvoubřitá čelní, c) čelní s rohovým rádiusem (toroidní), d) kulová, e) kuželová mikrofréza [6]

Svařované mikrofrézy se vyrábějí navařením ultratvrdého materiálu řezné hlavy na neultratvrdou stopku nástroje (nejčastěji SK). Omezením je obtížná a špatná obrobiteľnosť ultratvrdých materiálů, pravděpodobně z tohoto důvodu se svařované mikrofrézy moc nevyužívají. Výhodou těchto ultratvrdých materiálů je dosažitelnost malého poloměru břitu pod 1 μm s dobrým zachováním ostrých hran. Svařované mikrofrézy se primárně používají k obrábění těžko obrobiteľných materiálů, jako jsou tvrdé a křehké krystaly. [1]



Obr. 2.13 – Zjednodušené schéma procesu mikrovýroby svařované mikrofrézy, stopka nástroje: slinutý karbid, řezná část nástroje je spojena se stopkou pomocí laserového paprsku [7]



Obr. 2.14 - Ukázka svařovaných mikrofréz [1, 7, 8]

2.2.1 Požadavky na mikrofrézy a jejich materiály

Z hlediska vysoké přesnosti a jakosti obrobeneé plochy jsou na mikrofrézy kladeny vysoké konstrukční nároky a požadavky, které lze shrnout jako [1]:

- malé poloměry břítu pro dosažení vysoce kvalitního obrobeneého povrchu s ohledem na odolnost proti opotřebení,
- vysoká tuhost zabraňující zlomení mikrofrézy,
- přísná tolerance rozměrů řezné části nástroje 0,1-5 μm ,
- nízká házivost do 2 μm , kvůli vibracím,
- musí být zohledněn prostor pro odchod třísky,
- symetrická nebo asymetrická geometrie nástroje,
- jemnozrnný výrobní materiál mikrofréz (čím přesnější řezná hrana nástroje, tím jemnější a menší zrno).

Na materiály, ze kterých jsou mikrofrézy vyráběny, jsou kladeny požadavky z hlediska mechanického, tepelného a výrobního. Nejvyšší prioritu mají mechanické vlastnosti.

Z hlediska mechanického je požadována [1, 3, 9]:

- vysoká tvrdost pro splnění požadavku na vysokou odolnost proti opotřebení a životnost nástroje,
- vysoká tuhost, aby byla zajištěna vysoká přesnost obrábění,
- dobrá rázová houževnatost pro zvládnutí přerušovaných řezů v procesu mikrofrézování,
- vysoká pevnost v ohybu pro snížení pravděpodobnosti zlomení nástroje.

Z tepelného a chemického hlediska je požadována [1, 3, 9]:

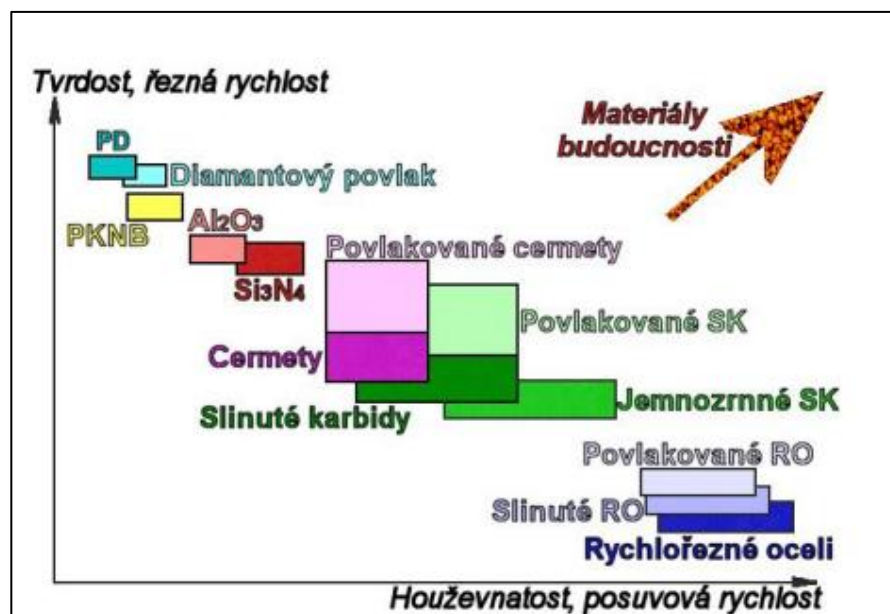
- dobrá teplotní odolnost,
- dobrá teplotní vodivost pro odvod tepla při procesu obrábění,
- omezená teplotní roztažnost pro zachování rozměrů nástroje v přijatelném rozsahu,
- chemicky neutrální vůči materiálu obrobku,
- chemicky stabilní, kvůli oxidaci a možné difúzi.

Z výrobního hlediska: dobrá obrobitelnost, pro snadnější výrobu a schopnost vyrobit ostrý břit. [1]

2.2.2 Řezné materiály mikrofréz

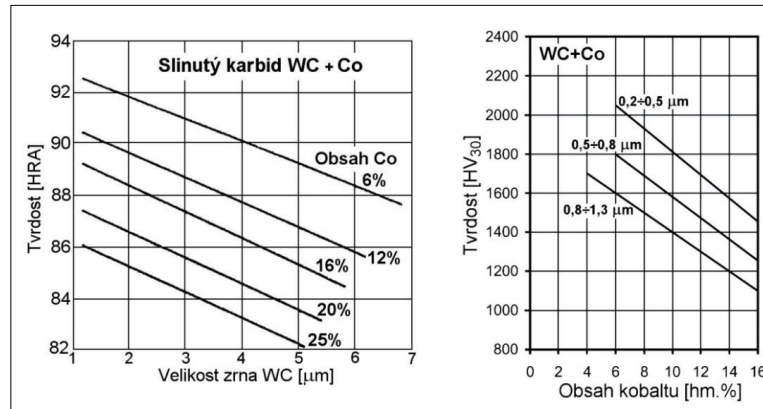
Specifické požadavky na mikrofrézy definují omezený počet možných typů nástrojových materiálů pro mikrofrézy, což lze vysvětlit přednostním požadavkem na tvrdost a houževnatost. Materiály s vysokou tvrdostí mají vysokou odolnost proti opotřebení a tuhost. Tvrdost však nemůže přímo odrážet množství síly, kterou může materiál absorbovat, aniž by se zlomil. [1] U materiálů s vysokou tvrdostí lze použít vyšší řeznou rychlost s malým průřezem třísky, způsob dokončovacího obrábění, protože zde převládá spíše tepelné namáhání. U materiálů s vysokou houževnatostí je možné aplikovat vyšší posuvovou rychlost s větším průřezem třísky. [9]

Vysoké tvrdosti lze dosáhnout u přírodního diamantu, monokrystalického diamantu a diamantového povlaku pomocí chemického napaření, ale s nízkou houževnatostí. Naproti tomu u slinutých karbidů lze dosáhnout dobré houževnatosti, ale s nízkou tvrdostí, pro snížení opotřebení se mikrofrézy ze slinutého karbidu povlakuji. Dobrým kompromisem mezi tvrdostí a houževnatostí je polykrystalický diamant (PD) a polykrystalický kubický nitrid bóru. [1, 9]

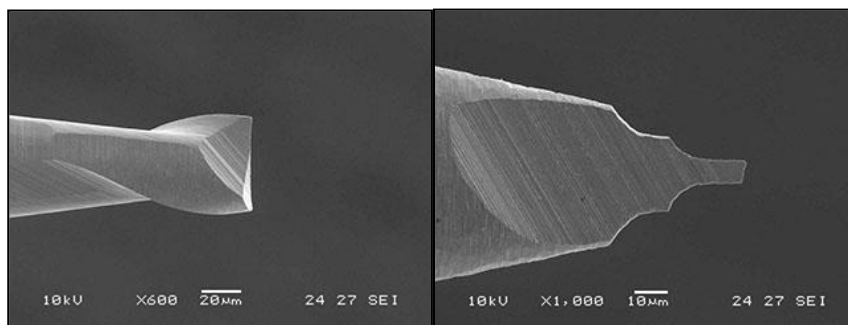


Obr. 2.15 - Řezné materiály a jejich oblasti použití [9]

Slinutý karbid (SK) je typ kompozitu s kovovou maticí tvořený slučováním jemných částic karbidů (s vysokou tvrdostí a vysokým bodem tání, např. WC, TiC, ...) s kovovými pojivy (např. Co, Ni, Mo). Proces výroby SK je za vysokých teplot a tlaků pomocí práškové metalurgie. Vlastnosti materiálu slinutých karbidů lze upravit podle požadavků aplikací mikrofréz změnou obsahu kobaltu, průměrné velikosti zrna a koncentrace karbidů. Hlavní výhodou slinutých karbidů je jeho nízká cenová dostupnost, ve srovnání s ultratvrdými materiály. [1, 9]

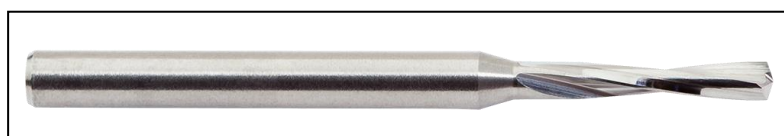


Obr. 2.16 - Závislost tvrdosti slinutých karbidů na velikosti zrna a obsahu kobaltu [9]



Obr. 2.17 - Detail na nástroje vyrobené ze slinutého karbidu [10]

Poloměr řezné hrany nástroje ze slinutého karbidu je však velmi obtížné zmenšit na méně než 1 μm kvůli jeho velké velikosti zrna [1], která činí většinou kolem 1,5 ÷ 6 μm. Je nutné podotknout, že s klesající velikostí zrn roste tvrdost slinutého karbidu, za předpokladu malého množství kobaltu, který tvrdost snižuje. Z tohoto důvodu je lepší použít **jemnozrné slinuté karbidy** s velikostí zrn mezi 0,2 ÷ 0,8 μm, které také zaručí velmi dobrou tvrdost až do oblasti teplot 800 ÷ 900 °C. [9, 11]

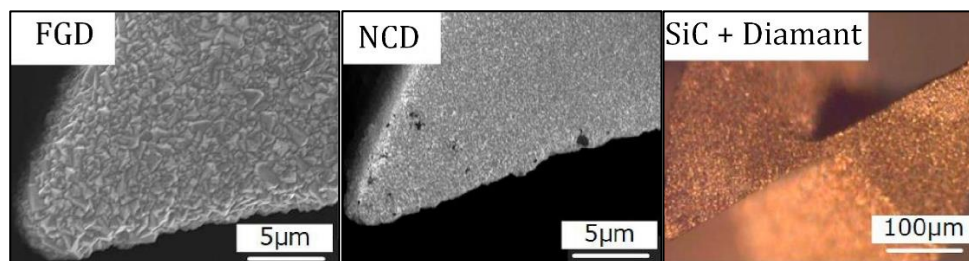


Obr. 2.18 - Náhled na monolitní mikrofrézu z nepovlakovaného SK [12]

Povlakování slinutých karbidů se využívá na zlepšení odolnosti proti opotřebení, jsou klíčové pro dlouhou životnost nástroje. Nanášené povlaky na mikrofrézy mohou být kovové nebo diamantové. Nejpoužívanějšími třídami kovových povlaků jsou TiN, TiCN, CrN a TiAlN. Na mikrofrézách ze slinutého karbidu byly poprvé aplikovány povlaky TiN a CrN, experimenty však prokázaly nedostačující tvrdost nástrojů pro těžkoobrobitelné materiály. Pro zvýšení tvrdosti povlaku byl přidán prvek hliník (AlCrN, AlTiN a TiAlN). Kovové povlaky pro mikrofrézy však mohou představovat problematiku v:

- četných kapičkách na hřbetu, které negativně snižují kvalitu povrchu,
- defekty povlaku zvětšovaly poloměr břitu, což má za následek zvýšení řezné síly.

Z tohoto důvodu se navrhly diamantové povlaky, aby se zabránilo kapkám a defektům. Přibližně 80 % mikronástrojů s povlakem z jemnozrného diamantu a 40 % mikronástrojů s povlakem nanokrystalického diamantu, však během obrábění selhalo kvůli oddělování povlaku způsobenému škodlivými účinky prvku kobaltu. K vyřešení tohoto problému byl použit dvouvrstvý povlak (SiC + diamant), u kterého vrstva SiC zaručovala přilnavost a tím tak zlepšila kvalitu povlaku. [1, 9]



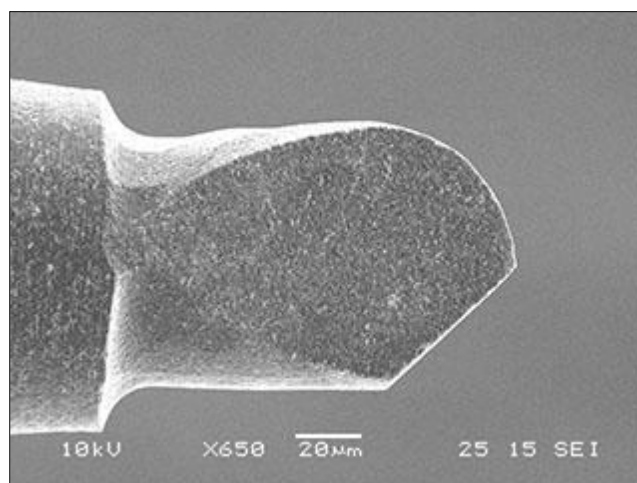
Obr. 2.19 – Diamantové povlaky: FGD (jemnozrný diamant), NCD (nanokrystalický diamant) a dvouvrstvý povlak SiC s diamantem. [3]



Obr. 2.20 Náhled na čelní mikrofrézy z povlakovaného SK o průměrech 0,5 mm, M.A. Ford [13]

Polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB) je smíchán s použitím mikro-KBN prášků o velikosti mezi 0,1 a 100 μm a kovových nebo keramických pojiv (Co, Al, TiC atd.) při teplotách 800 - 1900 $^{\circ}\text{C}$ a tlaky 3 – 8 GPa. [8] Je považován za druhý nejtvrdší materiál po diamantu, a proto může nabídnout mimořádné schopnosti úběru materiálu a odolnost proti opotřebení pro mikrofrézy. V porovnání s diamantem má mnohem nižší tepelnou vodivost, vysokou teplotní stabilitu až do teploty 1400 - 1550 $^{\circ}\text{C}$, do kdy je na vzduchu extrémně stabilní. [1, 9]

Superjemnozrnný polykrystalický kubický nitrid bóru má velikost zrna menší než 1 μm , je velmi vhodným materiálem pro mikrofrézy, protože jej lze použít k požadavku na ostrou řeznou hranu pro mikrofrézy a má dobré držení hran. Mikrofrézy z tohoto materiálu konkurují diamantovým mikrofrézám kvůli jejich nižší ceně, dobré schopnosti obrábět železné kovy a jejich extrémní stabilitě na vzduchu za vysokých teplot. Hlavní aplikací je obrábění superslitin, kalených ocelí a litin. [1]

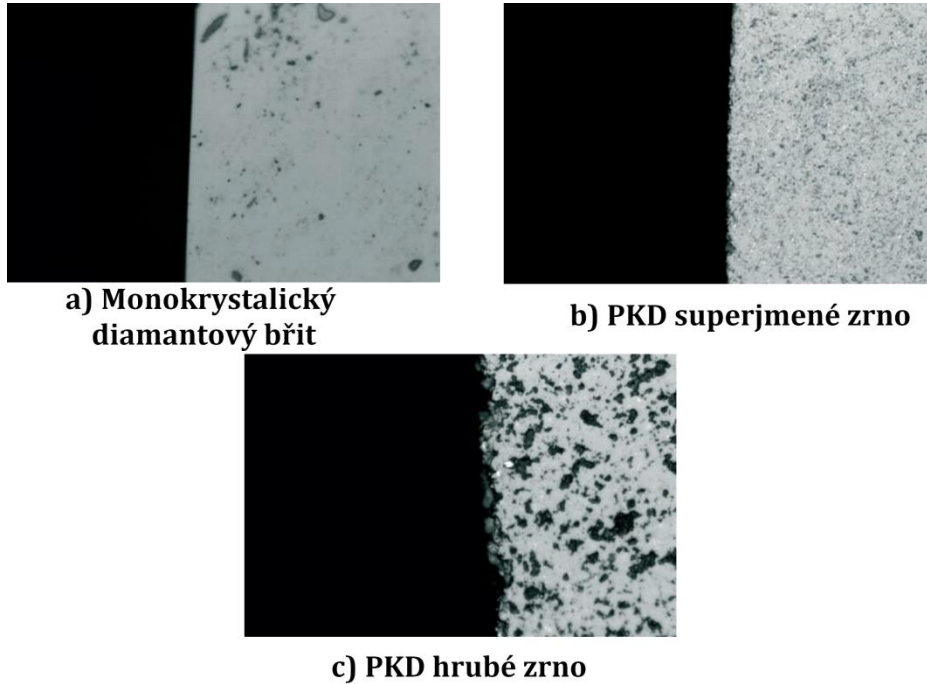


Obr. 2.21 Kulová mikrofréza z polykrystalického nitridu bóru [10]

Diamant je nejtvrdší přírodní materiál s vysokou teplotou tavení, jeho možné varianty lze rozdělit na monokrystalický a polykrystalický diamant [1]. Největší uplatnění mají nástroje z diamantu v obrábění hliníkových slitin. Hlavní nevýhodou diamantu je [9]:

- jeho relativně malá teplotní stálost, kdy se již při teplotě 650 $^{\circ}\text{C}$ začne tvořit grafitový povlak na jeho povrchu,
- nemožnost obrábění železných kovů z důvodu difúze při nadměrném ohřevu a nadměrném opotřebení nástroje,
- vysoké pořizovací náklady.

Monokrystalický diamant je synteticky vyrobený monokrystal, který se za vysokých teplot a tlaků syntetizuje z grafitového prášku [9]. Mikrostrukturou a mechanickými vlastnostmi je téměř stejný jako přírodní diamant, což umožňuje výrobu mikrofréz s poloměrem břitu menší než $0,1 \mu\text{m}$ s drsností obrobeneho povrchu R_z menší než $0,02 \mu\text{m}$. [1]



Obr. 2.22 Kvalita ostří v závislosti na velikosti zrn, zvětšení: 500x [14]

Polykrystalický diamant (PD) se vyrábí slinováním z monokrystalického diamantu a za využití kovových nebo keramických pojiv, například Co, SiC, N, B, se sníží výrobní náklady a zlepši houževnatost. Výběr vhodných typů nebo poměrů pojiv může vyřešit mechanickou nebo chemickou slabost mikrofréz. Například keramická pojiva mohou minimalizovat proces grafitizace, zatímco kovová pojiva mohou zvýšit rázovou houževnatost a pevnost v ohybu. Různé možnosti vylepšení staví polykrystalický diamant jako nejoblíbenější a nejslibnější diamantový materiál pro mikrofrézy, který v současnosti představuje více než 80 % podílu na trhu ultratvrdých mikrofréz. [1, 9]

3 Metodika experimentu

Experiment diplomové práce byl založen na tvorbě mikrofrézovaných mikrostruktur, které se vybraly na základě poznatků z bioniky. Následně byly obrobené vzorky zkoumány a byla provedena jejich replikace.

Metodika experimentu se věnuje popisu obráběných vzorků a jejich vybraných reliéfů. Dále popisuje použité stroje, měřicí zařízení a obráběcí nástroje použité k experimentu.

3.1 Obráběný materiál

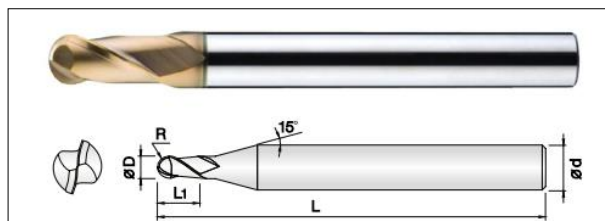
Obráběným materiálem vzorků byla slitina hliníku EN AW 7075, tato slitina se vybrala z důvodu vynikající obrobitelnosti, kdy vytváří krátkou třísku a také dobré dostupnosti. Dalším z důvodů výběru je její velká četnost použití a doporučení ve vědeckých publikacích [14, 15, 16]. Slitina EN AW 7075 je vytvrditelná a díky vysoké pevnosti se obrobené reliéfy ihned nepoškodí.

Tab. 3.1 - Obráběná slitina hliníku EN AW 7075 - mechanické vlastnosti [17]

Název materiálu	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrдость [HBW]
EN AW 7075	240 - 460	360 - 540	2 - 8	104 - 160

3.2 Nástroj

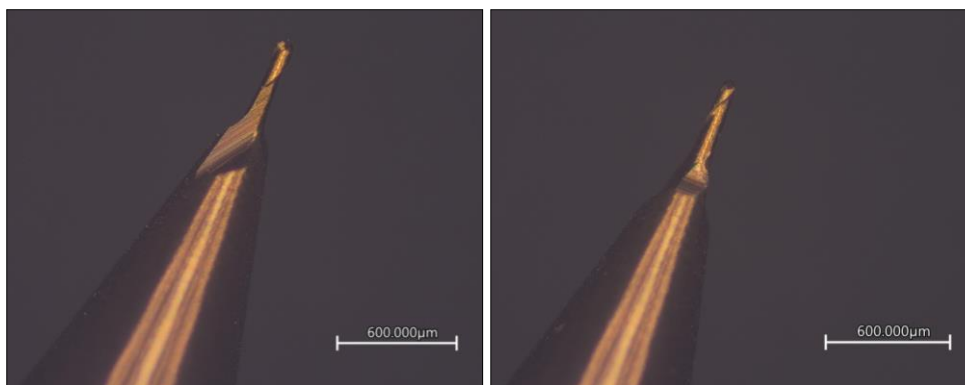
Nástroj byl vybrán na základě zvolených reliéfů, jejich velikostí. Dle dostupnosti se vybrala dvoubřitá kulová fréza o průměru 0,1 mm, s poloměrem řezné hrany 0,05 mm a funkční délce 0,2 mm.



Obr. 3.1 - Náhled a schéma nástroje [18]

Tab. 3.2 - Dvoubřitá kulová fréza - základní informace [18]

DVOUBŘITÁ KULOVÁ FRÉZA	
Průměr nástroje D [mm]	0,1 (+0/-0,005)
Poloměr zaoblení R [mm]	0,05 ± 0,005
Počet břitů	2
Úhel stoupání šroubovice [°]	30
Materiál nástroje	slinutý karbid
(PVD) Povlak řezné části	TiSiN
Funkční délka L ₁ [mm]	0,2
Celková délka L [mm]	40
Průměr stopky nástroje s tolerancí dh5 [mm]	4
Výrobce	PM TECH



Obr. 3.2 - Detail řezné části nového nástroje, vyfoceno mikroskopem KEYENCE VK-X1000, zvětšení: 5x

3.3 Obráběcí stroj

Obráběcí stroj byl zvolen od výrobce DMG MORI, tří-osé horizontální frézovací centrum CMX 600 V, s řídicím systémem SINUMERIK 840 D od SIEMENSU. Stroj disponuje vřetenem s maximálním počtem 12 000 ot/min. Použitý stroj je majetkem laboratoře Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci.

Tab. 3.3 - Obráběcí stroj CMX 600 V od výrobce DMG MORI – základní informace

VÝROBCE	TYP	VÝROBNÍ ČÍSLO	MAXIMÁLNÍ POČET OTÁČEK	UPÍNACÍ KUŽEL	TYP CHLAZENÍ
DMG MORI	CMX 600 V	1525000564A	12 000 ot/min	SK40	vzduch, kapalina

S využitím CAM softwaru v prostředí Atodesk Fusion 360 byl vytvořen NC program, který se přenesl do řídicího systému obráběcího stroje. Za pomoci CAD modelu a zvolenou strategií obrábění byly přesně definovány dráhy nástroje, vzdálenosti přejezdů, bezpečností vzdálenosti, průchody nástroje a řezné podmínky.



Obr. 3.3 - CNC frézka DMG MORI CMX 600 V

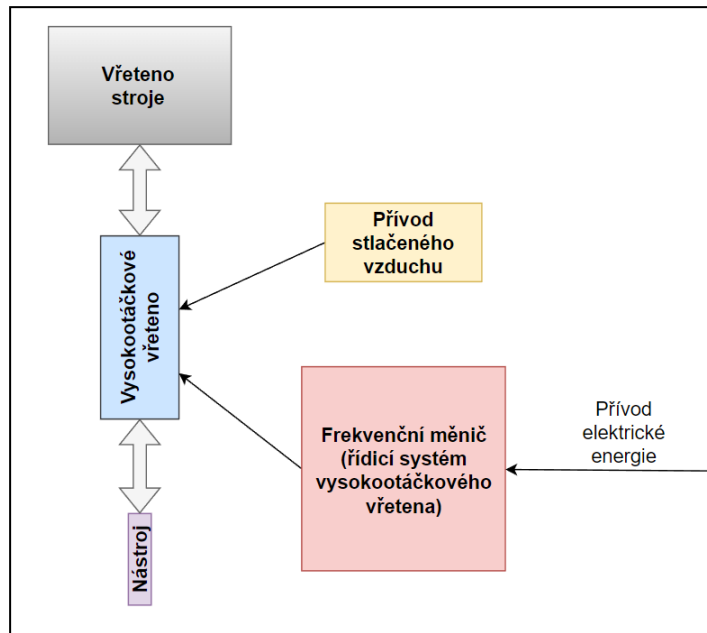
Mikrofrézování vyžaduje, z důvodu malých průměrů nástrojů, vysoké otáčky vřetena stroje. Z tohoto důvodu bylo použito externí vysokofrekvenční elektrické vřeteno, které se upne přes upínací kužel přímo do CNC stroje. Vřeteno má tubusový tvar a je chlazeno vzduchem, nástroj je chlazen 16-ti tryskami, které jsou rozmístěné po obvodu vřetena. Nástroj s válcovou stopkou se upíná manuálně pomocí upínací kleštiny ER8 (collety). Celková hmotnost bez upnutého nástroje je 1,6 kg.

Tab. 3.4 - Vysokofrekvenční vřeteno, výrobce SEMACO - základní informace

VÝROBCE	SÉRIOVÉ ČÍSLO	MAXIMÁLNÍ POČET OTÁČEK	TYP CHLAZENÍ
Semaco	25849	80 000 ot/min	Vzduch

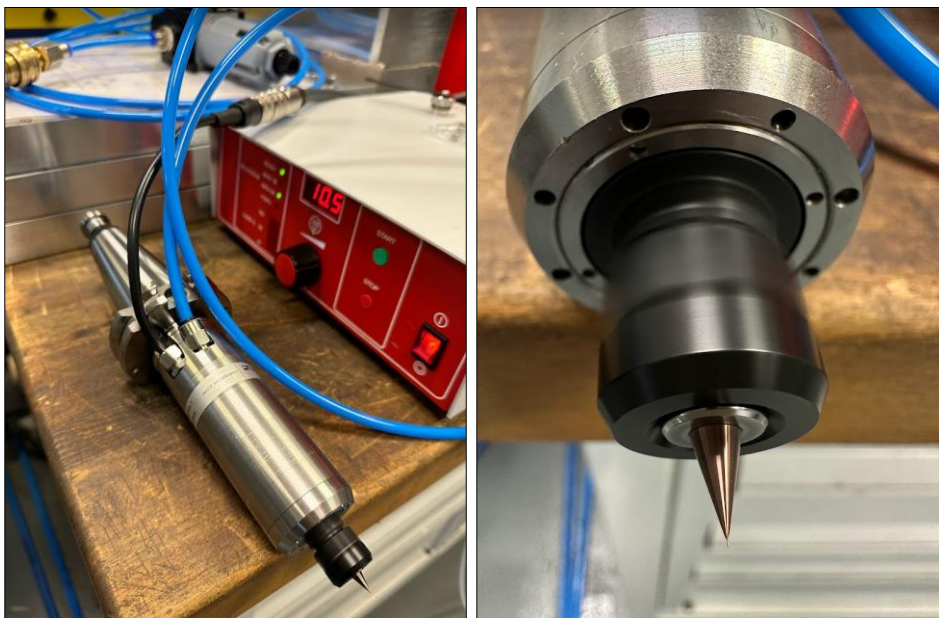


Obr. 3.4 - Vysokofrekvenční vřeteno, výrobce: SEMACO



Obr. 3.5 - Zjednodušené schéma zapojení vysokofrekvenčního vřetena

Instalace vysokofrekvenčního vřetena proběhla dle návodu a dle zjednodušeného schéma, zobrazeného na obr. 3.5. Před započítím procesu obrábění, se po upnutí nástroje uvedlo na 10 minut do provozu na 20 % maximálně přípustných otáček, poté se nechalo běžet na 2 minuty, s 50 % a poté s 80 % maximálně přípustných otáček.



Obr. 3.6 - Upnutý nástroj ve vysokofrekvenčním vřetenu

3.4 Řezné podmínky

Řezné podmínky byly stanoveny na základě doporučení od výrobce nástroje [18], kde hlavní parametry jsou: počet otáček vřetena stroje n , posuv na zub f_z , rychlost posuvu v_f , hloubka řezu a_p a šířka řezu a_e . Řezné podmínky uvedené v tabulce 3.5 byly použity pro obrábění vzorku č. 1 a č. 2.

Tab. 3.5 - Řezné podmínky

ŘEZNÉ PODMÍNKY				
n [ot/min]	f_z [mm]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	a_e [mm]
60 000	0,002	240	0,004	0,02

Z důvodu lámání nástroje v průběhu procesu obrábění se řezné podmínky inovovaly na hodnoty uvedené v tabulce 3.6. Tyto řezné podmínky byly použity pro obrábění vzorku č. 3 a č. 4.

Tab. 3.6 - Inovované řezné podmínky

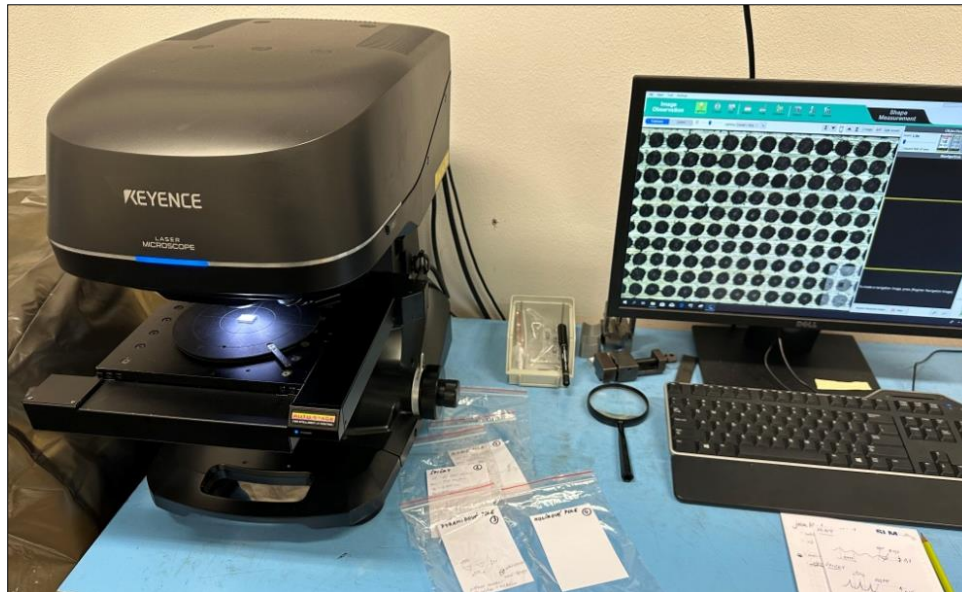
INOVOVANÉ ŘEZNÉ PODMÍNKY				
n [ot/min]	f_z [mm]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	a_e [mm]
60 000	0,0007	80	0,001	0,005

3.5 Měřicí zařízení

Pro vyhodnocení dosažené přesnosti obrobeného reliéfu byl použit měřicí bezdotykový přístroj VK-X1000 od výrobce KEYENCE. Tento konfokální mikroskop je vybaven stolkem s poháněnými osami a je schopen vyhodnocovat plošné a profilové parametry. Naměřená data byla analyzována za pomoci softwaru MultiFileAnalyzer, který byl dodán výrobcem. Počet měření se odvíjel dle typu vzorku a reliéfu.

Tab. 3.7 - Údaje o konfokálním mikroskopu KEYENCE VK-X1000

VÝROBCE	TYP	VÝROBNÍ ČÍSLO
KEYENCE	VK-X1000	4D810012



Obr. 3.7 - Mikroskop KEYENCE VK-X1000

3.6 Popis měřených parametrů

3.6.1 Mikro rozměry

Měření mikro rozměrů obrobeného profilu replik. Vzorek se umístil na posuvný stolek mikroskopu a pomocí profilové linie a měřících nástrojů se změřil požadovaný parametr. Velikost zkoumané oblasti byla $1043 \mu\text{m}$ na $1391 \mu\text{m}$. U každého vzorku/repliky proběhlo měření 2 parametrů profilu – hloubky profilu h_p a rozteče jednotlivých prvků p_p . U vzorku č. 3 a č. 4 byl dále měřen průměr prvků r_p . Měření parametrů proběhlo v několika oblastech, dle možností a typu vzorku. Z naměřených hodnot parametrů h_p , p_p a r_p byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření. Naměřené a vypočtené hodnoty měření jsou uvedeny v příloze diplomové práce.

3.6.2 Drsnost povrchu

Plošná drsnost S_a byla naměřena u každého obrobeného vzorku. Měření probíhalo v 5 stejně velkých oblastech. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření. Naměřené a vypočtené hodnoty měření jsou uvedeny v příloze diplomové práce.

3.7 Statistické vyhodnocení dat

Na základě statistického zpracování dat se z naměřených dat vypočetl výběrový aritmetický průměr \bar{x} a následně byla vypočtena nejistota měření. Nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02 M:2013.

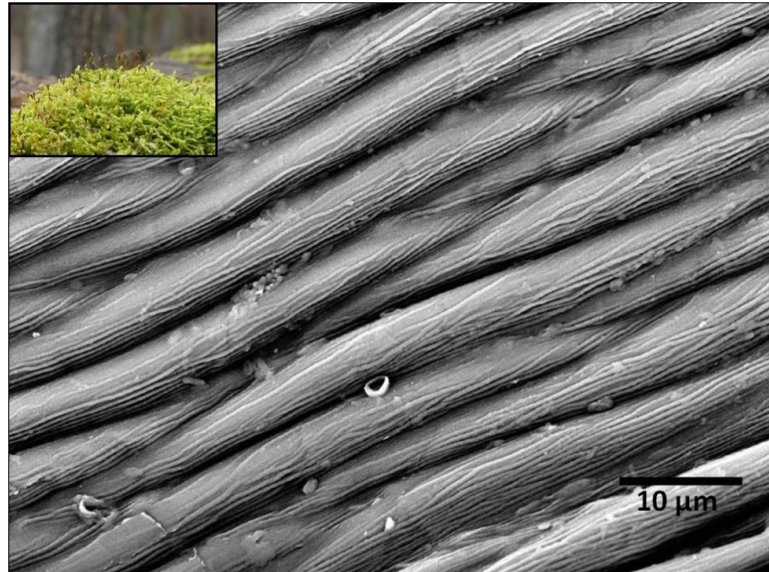
3.8 Příprava vzorků a výběr reliéfů

Výběr reliéfů byl proveden na základě informací a poznatků z vědního oboru bioniky, která se věnuje zkoumání přírodních objektů a následnému napodobování jejich vlastností. Zkoumáním přírodních objektů a napodobováním jejich tvarů a struktur, lze napodobit povrchy, které mohou být hydrofilní, hydrofobní anebo antibakteriální. [19]

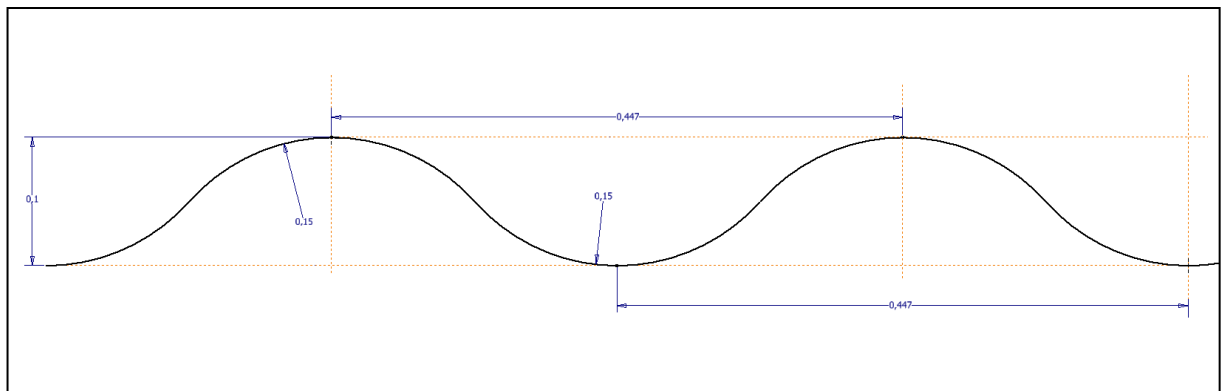
Z důvodu následné replikace vzorků byly vytvořeny a obrobeny **negativy** zvolených reliéfů, ze kterých se pomocí procesu replikace vytvořila pozitivní mikrostruktura.

CAD modely se vytvořily pro každý vzorek, v softwaru Autodesk Inventor Professional a ve Fusion 360. Celkem byly zrealizovány 4 typy reliéfů. Rozměry každého reliéfu byly upraveny pro mikrofrézování vybraným nástrojem, který je více popsán v kapitole 3.2.

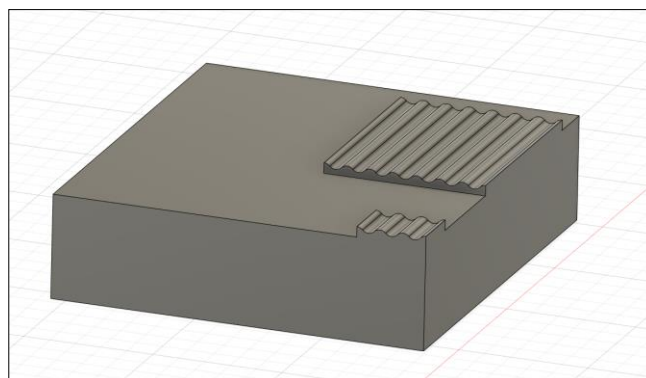
První typ reliéfu, vzorek číslo 1, se inspiroje jedním z typu mechů, konkrétně Rokytem cypřišovitým, zobrazeného na obr. 3.8. Teoreticky a zjednodušeně si lze tento reliéf představit ve tvaru vln. Hlavním důvodem výběru jsou jeho hydrofilní vlastnosti povrchu. Na jeho základě byl vytvořen teoretický profil, který je zjednodušený a oproti skutečným rozměrům zvětšený na úroveň mikrostruktury. Rozměry vybraného teoretického profilu jsou následující, hloubka reliéfu je 0,1 mm, rozteč mezi jednotlivými vlnami je 0,447 mm a průměr oblouků je 0,30 mm, viz znázorněno na skice na obr. 3.9. Vytvořený CAD model je zobrazen na obr. 3.10. Z důvodu testování řezných podmínek se vytvořilo menší pole o velikosti 1 mm x 1 mm a poté pole o velikosti 3 mm x 3 mm.



Obr. 3.8 - Rokyt cypřišovitý a jeho povrch [20, 21]



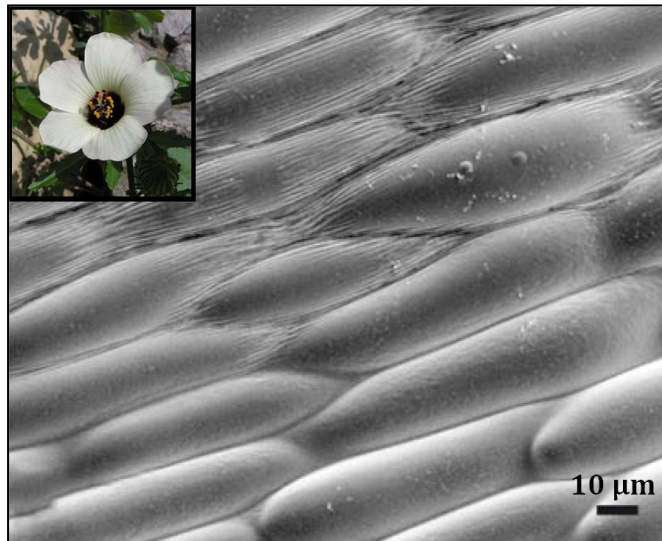
Obr. 3.9 - Vzorek č. 1 - Skica negativu teoretického profilu Rokytu cypřišovitého



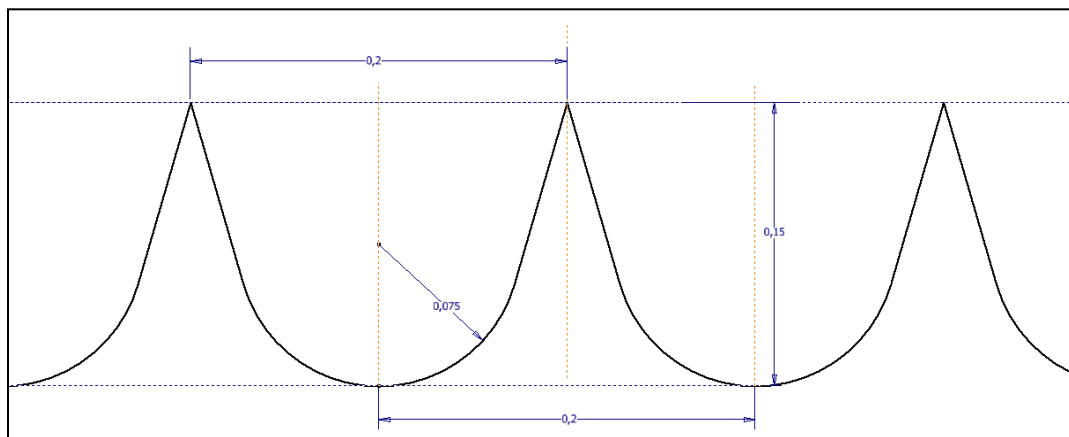
Obr. 3.10 - Vzorek č. 1 - CAD model - teoretický profil vybraného typu mechu

Vzorek číslo 2 byl inspirován mikropovrchem Ibišku trojdílného, zobrazeného na obr. 3.11. Teoretický profil Ibišku si lze představit jako reliéf tvořený z několika řad obloučků vedle sebe. Profil byl pro následné obrobění zjednodušen a omezen.

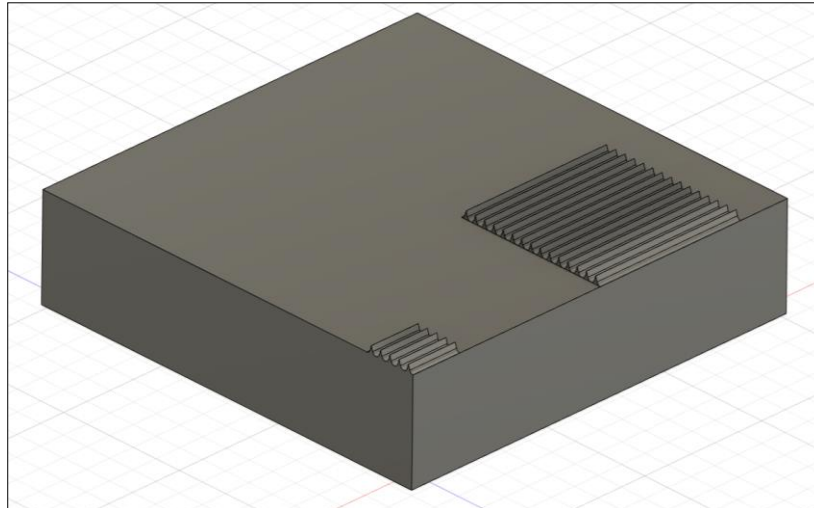
Negativ teoretického profilu představuje pole tvořené ze špiček. Hloubka teoretického profilu je 0,15 mm, rozteč mezi jednotlivými prvky je 0,2 mm a poloměr přechodu mezi jednotlivými prvky je 0,75 mm, viz skica na obr. 3.12. Poloměr přechodu byl zvolen dle poloměru zaoblení nástroje. Pro otestování řezných podmínek bylo obrobena menší pole o velikosti 1 mm x 1 mm a následně bylo obrobena větší pole o velikosti 3 mm x 3 mm, které bylo zkoumáno a měřeno.



Obr. 3.11- Ibišek trojdílný a jeho povrch okvětního lístku [22, 23]



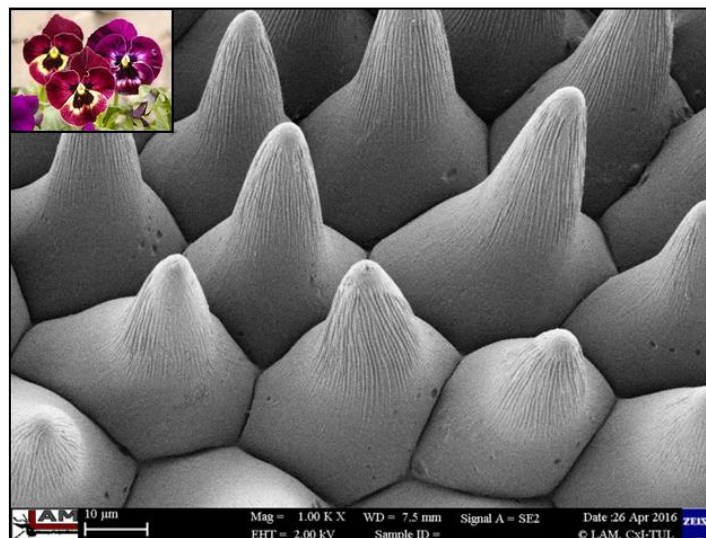
Obr. 3.12 - Vzorek č. 2 - Skica negativu teoretického profilu Ibišku trojdílného



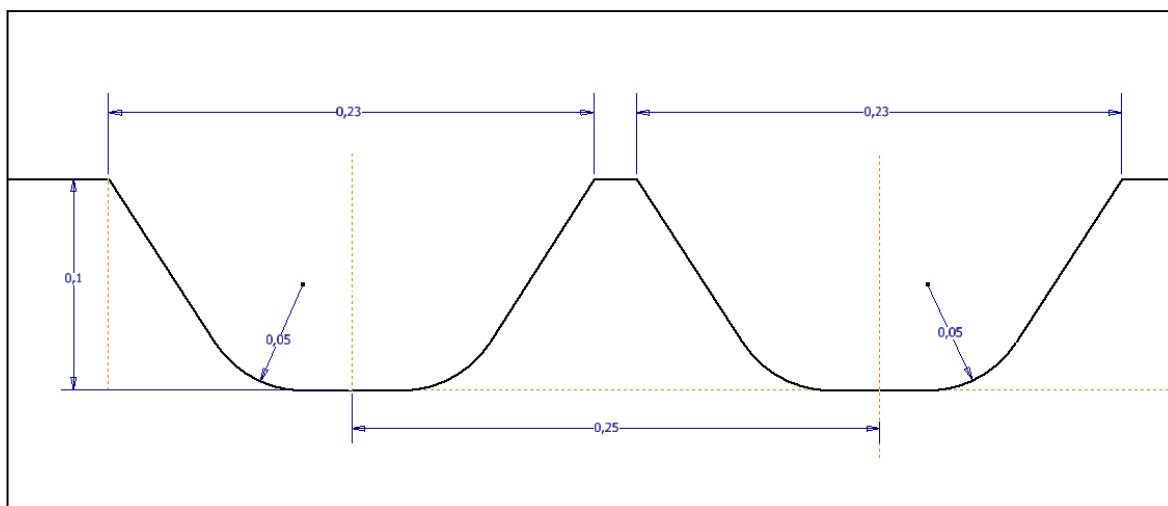
Obr. 3.13 - Vzorek č. 2 - CAD model

Vzorek číslo 3 byl inspirován květem macešky, z důvodu hydrofobních vlastností povrchu. Její povrch lze vidět na obr. 3.14 [20]. Zjednodušený teoretický profil macešky je tvořen negativem jejího povrchu – reliéfem z komolých jehlanů, které mají zaoblené hrany podle poloměru nástroje

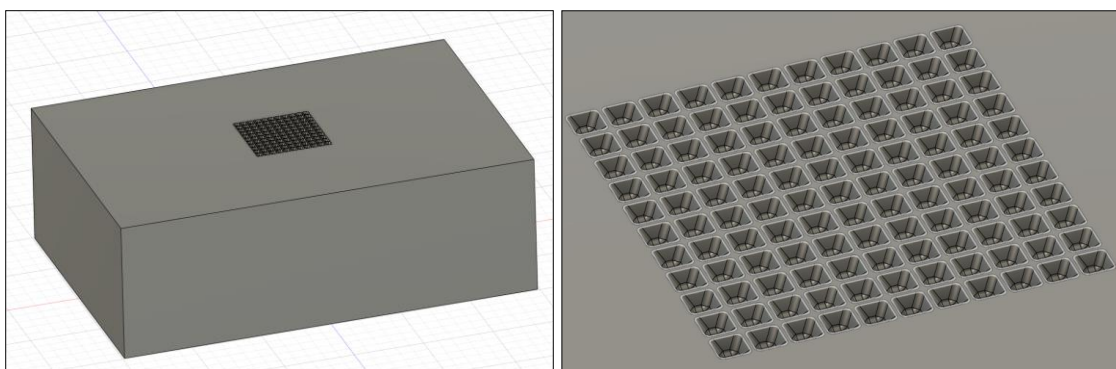
Hloubka teoretického profilu je 0,1 mm, rozteč jednotlivých prvků byla volena 0,25 mm, rozměr horní podstavy je více zobrazen na skice na obr. 3.15. CAD model je zobrazen na obr. 3.16. Velikost obráběného pole byla 3 mm x 3 mm.



Obr. 3.14 - Povrch květu macešky [19]



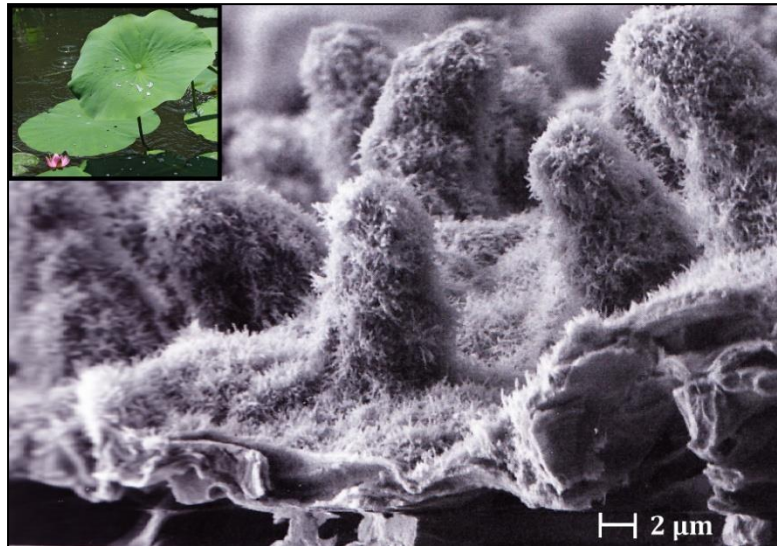
Obr. 3.15 - Vzorek č. 3 - Skica negativu teoretického profilu květu macešky



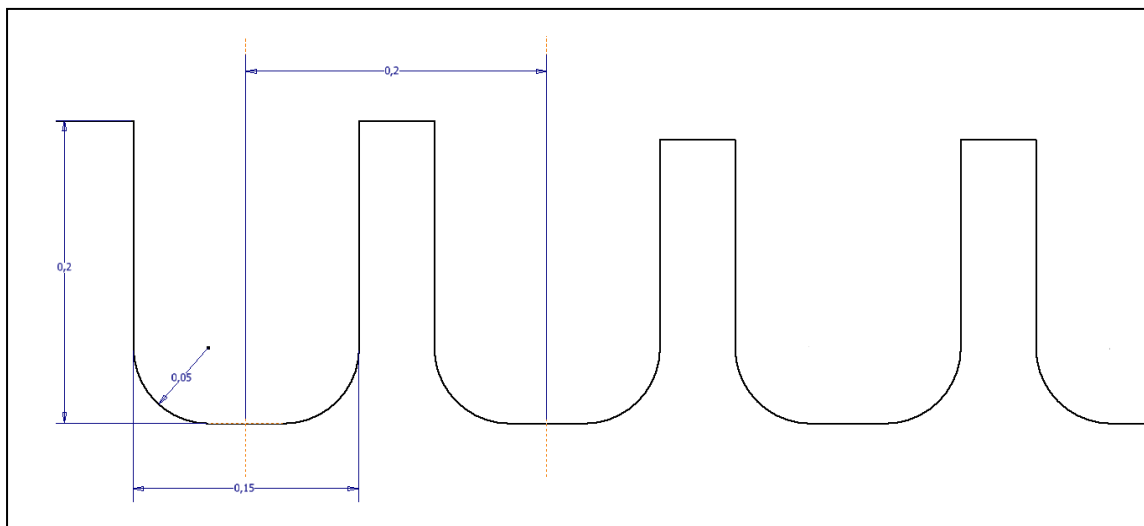
Obr. 3.16 - Vzorek č. 3 - CAD model (vlevo), detail na vytvořený reliéf (vpravo)

Vzorek číslo 4 byl inspirován lotosovým listem, který byl prvním testovaným materiálem v oblasti vytváření replik. List lotosu byl vybrán na základě hydrofobních vlastností a na základě jeho schopnosti samočištění. Jeho mikropovrch je tvořen mnohačetnými výstupky, na kterých je nanostruktura tvořena jemnými voskovitými tyčinkami. Pro aplikaci na mikrofrézování byl teoretický profil lotosu zjednodušen a zvětšen na úroveň mikrostruktury. [25]

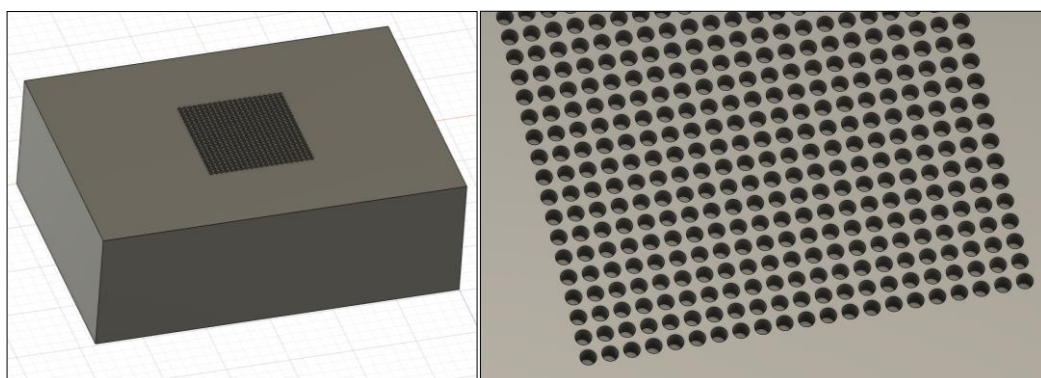
Zjednodušený negativ teoretického profilu je tvořen prvky o průměru 0,15 mm a roztečí mezi prvky 0,2 mm, hloubka teoretického profilu je 0,2 mm. Skica teoretického profilu je zobrazena na obr. 3.17, CAD model je zobrazen na obr. 3.19.



Obr. 3.17 - Povrch lotosového listu [24, 25]



Obr. 3.18 - Vzorek č. 4 - Skica negativu teoretického profilu lotosového listu



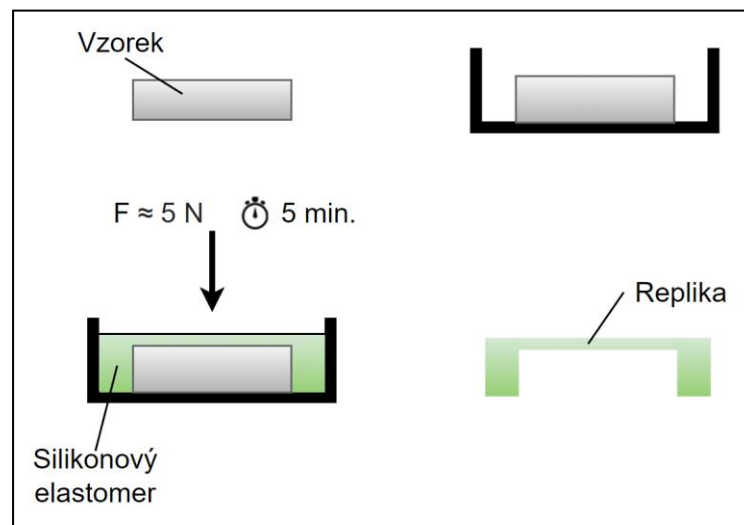
Obr. 3.19 - Vzorek č. 4 - CAD model

3.9 Replikace vzorků

U obroběných vzorků byla provedena jejich replikace. Procesem replikace se získá pozitivní forma tzv. pozitivní replika, která je negativem právě obroběné hierarchické mikrostruktury. [26, 27]

Postup replikace lze rozdělit do několika kroků:

- připevnění vzorku oboustrannou lepicí páskou k podkladu, aby replikovaný povrch byl umístěn směrem nahoru,
- na povrch vzorku se nanese vrstva silikonového elastomeru, typu President Light Body, o tloušťce několika milimetrů,
- vzorek je po celé jeho ploše zatížen silou do 5 N,
- po 5 minách dojde k zesítnění elastomeru (při laboratorní teplotě 22 °C) a replika je hotova. [26]



Obr. 3.20 Schematické znázornění procesu replikace [27]

Tento způsob získání mikrostrukturovaného hierarchického povrchu repliky je patentován pod číslem CZ 308915 B6. [26]

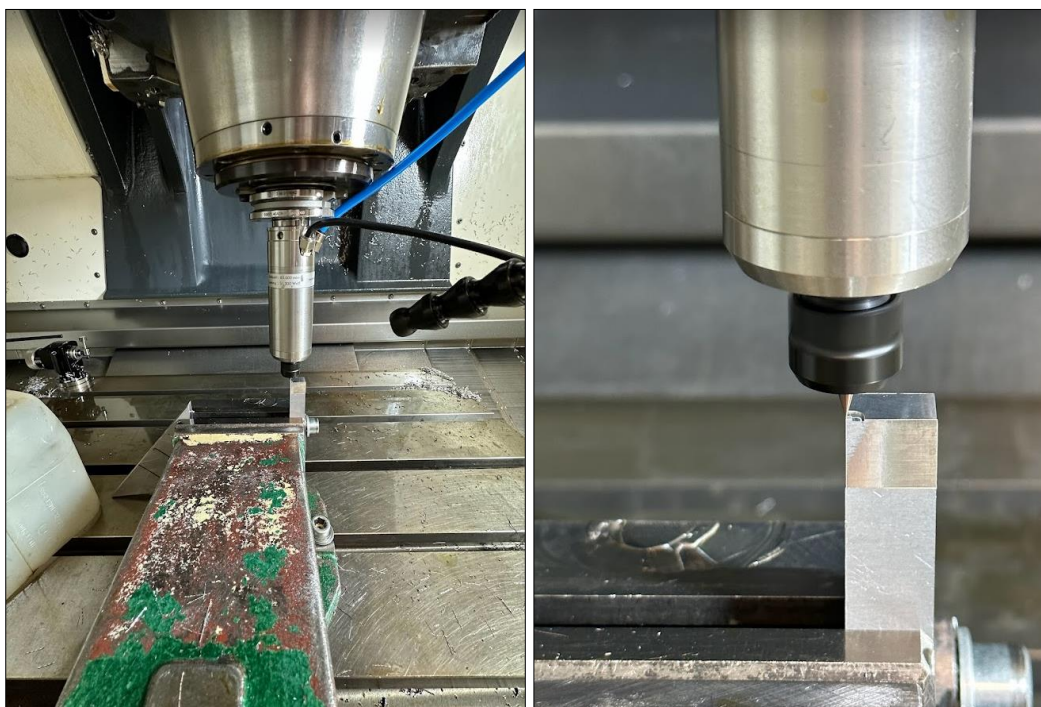
4 Experimentální část

Experimentální část práce byla zaměřena na tvorbu mikrostruktur třískovým obráběním – mikrofrézováním, obsahuje dosažené výsledky při použití plánované metodiky v kapitole 3. Věnuje se mikrofrézování vybraných reliéfů a použitým rezným podmínkám. Obrobené reliéfy jsou následně zkoumány, především pro dosaženou rozměrovou přesnost a plošnou drsnost povrchu. Z obrobených vzorků jsou vyrobeny repliky, které jsou dále zkoumány.

4.1 Vzorek č. 1 – reliéf typu vln

4.1.1 Výroba a rezné podmínky

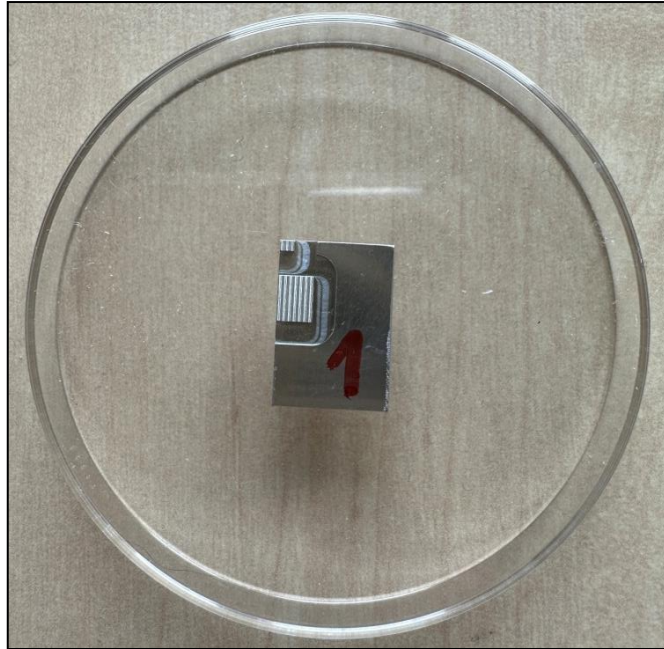
Vzorek č. 1 byl obráběn strategií paralelní. Průchod nástroje byl rovnoběžný s vybranou rovinou a nástroj sledoval povrch ve směru definované osy. Řezné podmínky byly voleny dle doporučených hodnot od výrobce nástroje, více uvedeno v kapitole 3.4. Obrábění pole 1 mm x 1 mm trvalo celkem 17 minut, pole o velikost 3 mm x 3 mm trvalo celkem 2,5 hodiny strojního času. Celkem byl použit 1 nástroj.



Obr. 4.1 - Proces mikrofrézování vzorku č. 1

Tab. 4.1 Vzorek č. 1 - řezné podmínky

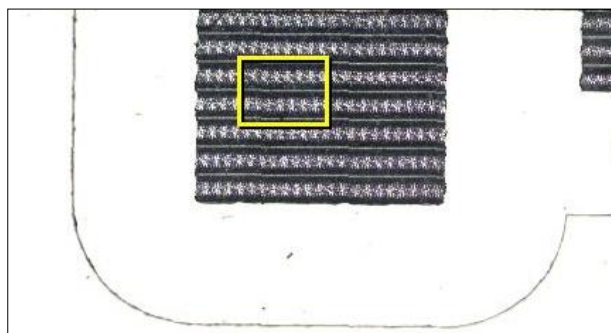
n [ot/min]	f_z [mm]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	a_e [mm]
60 000	0,002	240	0,004	0,02



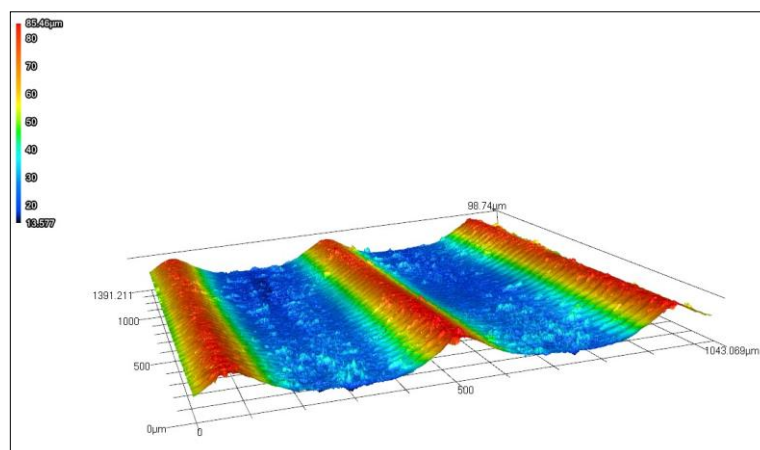
Obr. 4.2 - Obrobený vzorek č. 1

4.1.2 Měření profilu a plošné drsnosti

Obrobený vzorek byl naskenován do navigační mapy, žlutě vyznačená oblast na obr. 4.3 byla zkoumána. Velikost zkoumané oblasti, na které byla provedena následující měření je 1043 μm na 1391 μm . Z hlediska rozměrové přesnosti byla měřena rozteč jednotlivých prvků a hloubka obrobeného reliéfu.



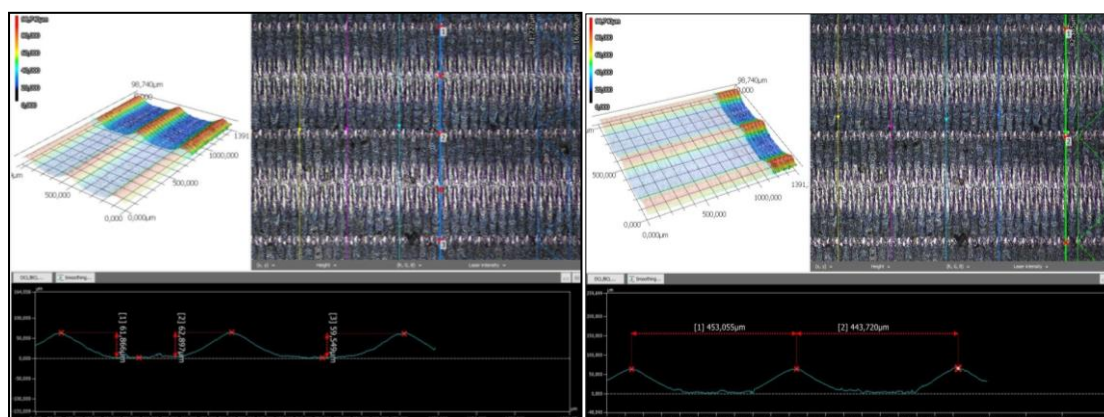
Obr. 4.3 - Náhled na obrobený reliéf vzorku č. 1, zkoumaná oblast vzorku (vyznačena žlutým rámečkem)



Obr. 4.4 - 3D reliéf povrchu vzorku s barevnou charakteristikou výšek nerovností povrchu, zvětšení: 10x

Hloubka reliéfu h_p byla měřena na 5 úsecích po 3 měření, viz obr. 4.5. Výsledná naměřená hodnota hloubky profilu je 61,30 μm . Teoretická hloubka profilu měla mít hodnotu 100 μm . Veškerá naměřená data jsou uvedena v tab. č. 1 v příloze diplomové práce.

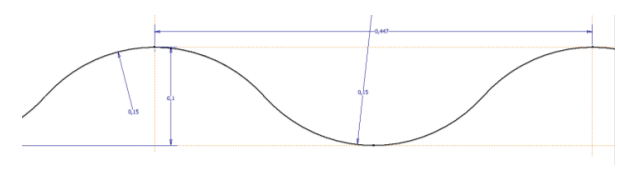
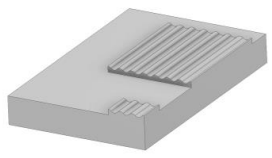

Rozteč reliéfu p_p byla měřena v 5 oblastech po 2 měření. Výchozí body pro měření byly použity jako středy obrobeneých vrcholů reliéfu, viz obr. 4.5. Výsledná naměřená hodnota rozteče profilu byla 446,95 μm , v porovnání s daty z CAD měl mít profil teoretickou rozteč 447 μm . Veškerá naměřená data jsou uvedena v tab. č. 2 v příloze diplomové práce.



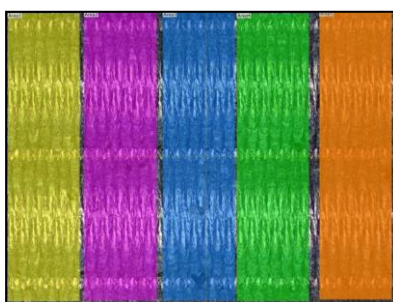
Obr. 4.5 - Vzorek č. 1 – náhled na strategii měření hloubky obrobeneého reliéfu (vlevo), náhled na strategii měření rozteče obrobeneého reliéfu (vpravo), zvětšení: 10x

Tabulka č. 4.2 přehledně srovnává aritmetické průměry naměřených hodnot s hodnoty z CAD modelu, vycházející z teoretického profilu. Z tabulky je patrné, že hloubka obrobeneho vzorku je o 38,7 % nižší než u CAD modelu. Rozteč obrobeneho vzorku dosahovala o 0,01 % nižší hodnoty než u CAD model.

Tab. 4.2 - Shrnutí dosažených rozměrů obrobeneho vzorku v porovnání s CAD daty

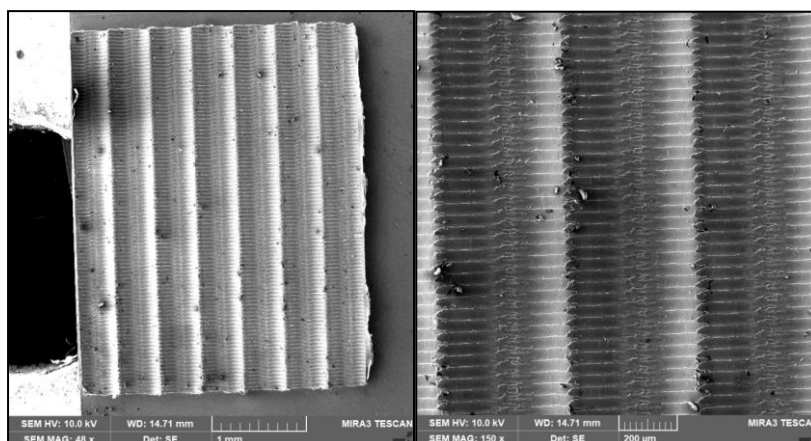
Vzorek č. 1 – reliéf typu vln			
		Hloubka profilu [μm]	Rozteč profilu [μm]
CAD model		100	447
Obrobený vzorek		$61,30 \pm 1,55$	$446,95 \pm 1,19$

Plošná drsnost povrchu S_a byla měřena v 5 stejně velkých oblastech o rozměru $250 \mu\text{m}$ na $1000 \mu\text{m}$. Výsledná naměřená hodnota S_a je $19,76 \pm 0,75 \mu\text{m}$. Veškerá naměřená data jsou uvedena v tabulce č. 3 v příloze diplomové práce.



Obr. 4.6 - Vzorek č. 1 – náhled na výběr měřených oblastí plošné drsnosti S_a

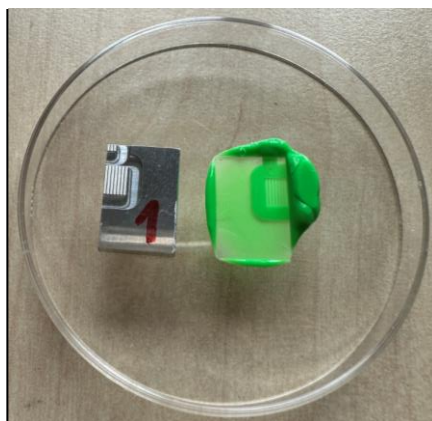
Na obr. 4.7 jsou zobrazeny SEM snímky obrobene hierarchické mikrostruktury vzorku č. 1. Na snímcích lze pozorovat dráhu, kterou konal nástroj při procesu mikrofrézování. Obrobená plocha vykazuje mikrootřepy v nejhlubším obráběném místě.



Obr. 4.7 - Vzorek č. 1 – SEM snímky obrobeného povrchu

4.1.3 Replika

Replikace vzorku č. 1 byla vytvořena, dle metodiky experimentu, více popsané v kapitole 3.9. Celkem byly zhotoveny 3 repliky. Na obr. 4.8 je zobrazená zkoumaná replika. Rozměry dosaženého reliéfu repliky se následně měřily na mikroskopu KEYENCE VK-X1000. Velikost zkoumané plochy byla 1043 µm na 1391 µm. Hloubka profilu repliky byla měřena na 4 úsecích po 3 měření. Výsledná průměrná naměřená hodnota hloubky je $59,16 \pm 1,65$ µm. Ve srovnání s obrobeným povrchem vzorku byla hodnota rovna 61,30 µm. Veškeré naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 4 v příloze diplomové práce.

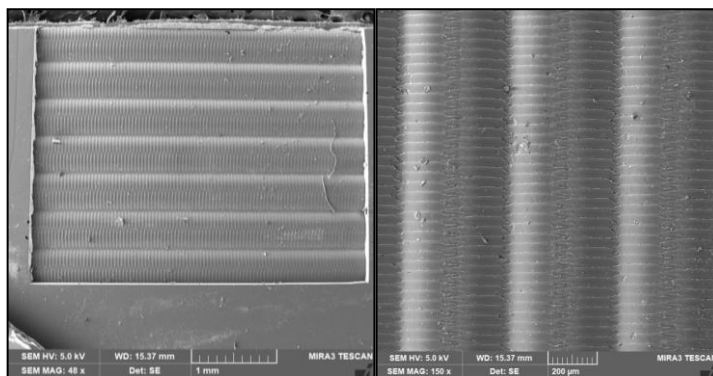


Obr. 4.8 - Vzorek č. 1 a jeho replika

Rozteč profilu repliky byla měřena na 5 úsecích po 2 měření. Výsledný aritmetický průměr naměřené hodnoty rozteče je $449,95 \pm 1,30$ µm. Naměřená hodnota rozteče obrobeného vzorku byla 446,95 µm. Veškeré naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 5 v příloze diplomové práce.

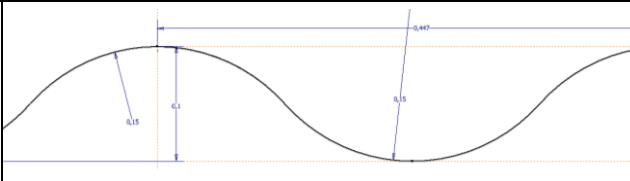
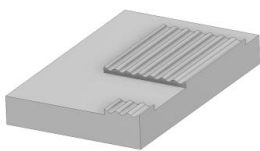


Replikace vzorku č. 1 vykazuje správně replikovaný hierarchický povrch s dosaženou přesností podle obrobeného vzorku.

Povrch repliky byl nasnímán na elektronovém mikroskopu. Na povrchu repliky vzorku č. 1 jsou dokonale replikovány stopy po dráhách nástroje a dále mikrootřepy, které byly na obrobeném vzorku.



Obr. 4.9 - Replika vzorku č. 1 - SEM snímky

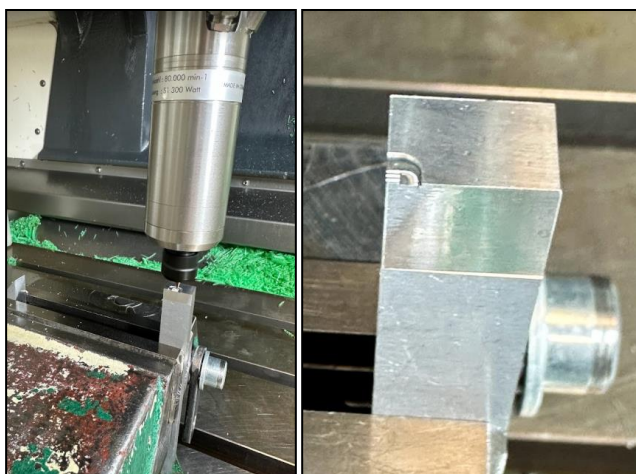
Tab. 4.3 - Shrnutí dosažených rozměrů profilu repliky, v porovnání s obráběným vzorkem a CAD daty z modelu

Vzorek č. 1 – reliéf typu vln			
		Hloubka profilu [µm]	Rozteč profilu [µm]
CAD model		100	447
Obrobený vzorek		$61,30 \pm 1,55$	$446,95 \pm 1,19$
Replika		$59,16 \pm 1,65$	$449,95 \pm 1,30$

4.2 Vzorek č. 2 – reliéf typu kuželů

4.2.1 Výroba a řezné podmínky

Vzorek č. 2 byl obráběn strategií paralelní. Strojní čas pole 1 mm x 1 mm byl 25 minut, u pole 3 mm x 3 mm to byly 4 hodiny. Celkem byly použity 3 nástroje, kde u prvního došlo k ulomení a z důvodu plynulého procesu obrábění a navázání na strukturu se větší pole obrábělo na nový samostatný vzorek. Během procesu obrábění se 1 kus nástroje zlomil při měření automatické délky nástroje.



Obr. 4.10 - Proces mikrofrézování a vytvořený reliéf vzorku č. 2

Tab. 4.4 - Vzorek č. 2 - řezné podmínky

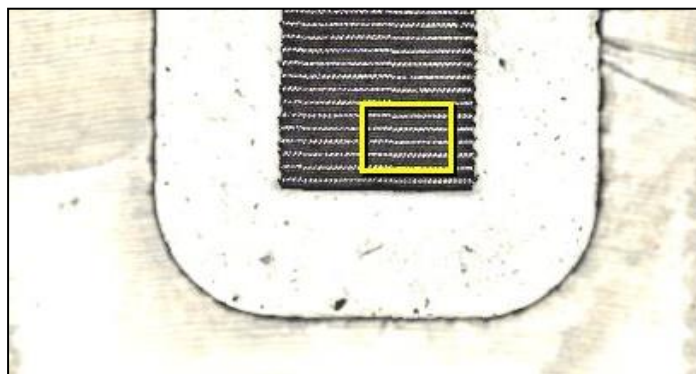
n [ot/min]	f_z [mm]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	a_e [mm]
60 000	0,002	240	0,004	0,02



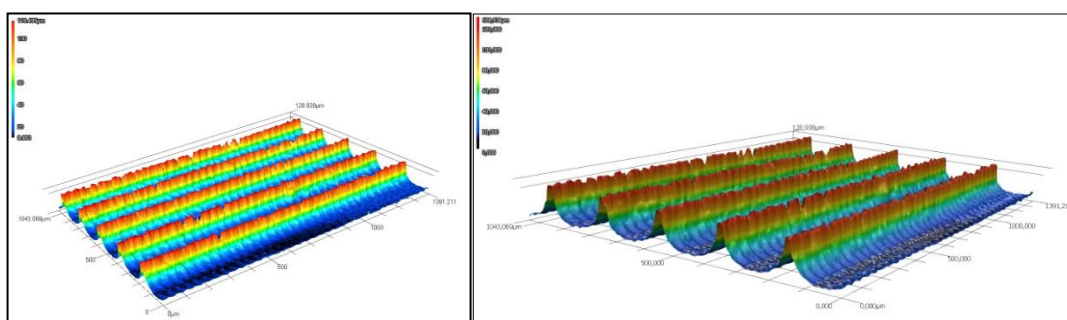
Obr. 4.11 - Obrobený vzorek č. 2

4.2.2 Měření profilu a plošné drsnosti

Obrobený vzorek byl naskenován do mapy, žlutě vyznačená oblast na obr. 4.12 byla zkoumána. Velikost zkoumané oblasti je 1043 μm na 1391 μm . 3D náhled z měření obrobeného vzorku je zobrazen na obr. 4.13. Z hlediska rozměrové přesnosti se měřily 2 parametry – rozteč jednotlivých prvků a hloubka obrobeného reliéfu.



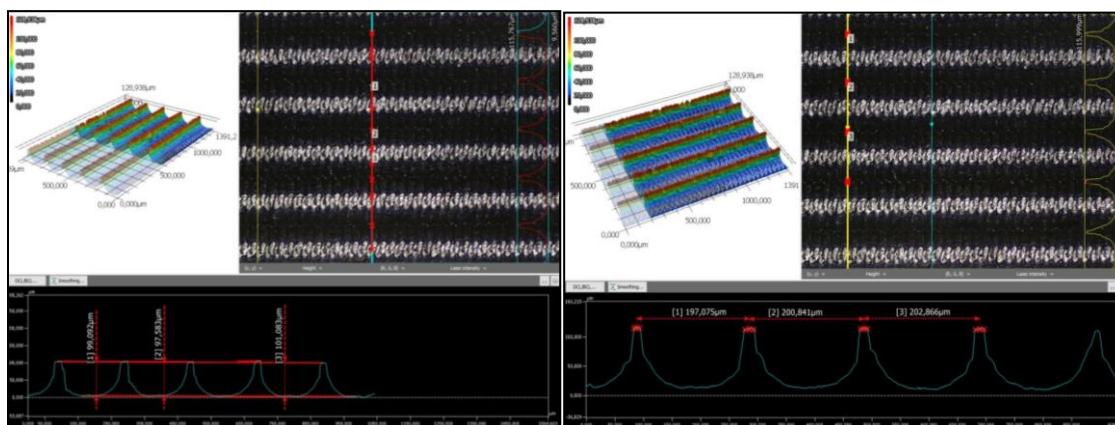
Obr. 4.12 - Náhled na obrobený reliéf vzorku č. 2, zkoumaná oblast vzorku (vyznačena žlutým rámečkem)



Obr. 4.13 - 3D zobrazení obrobeného reliéfu, zvětšení: 10x

Hloubka reliéfu h_p byla měřena na 5 místech po 3 měření, viz obr. 4.14. Výsledná naměřená hodnota hloubky profilu byla 100,54 μm . Dle CAD, měl mít teoretický profil 150 μm . Veškerá naměřená data z obrobeného vzorku jsou uvedena v tab. č. 6 v příloze diplomové práce.

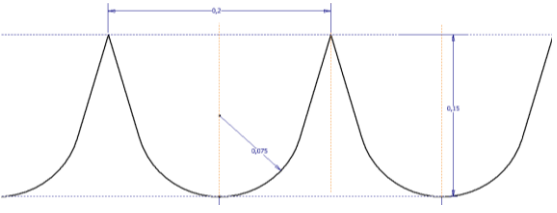
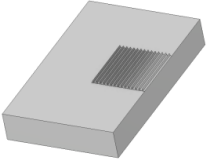

Rozteč reliéfu p_p byla měřena na 5 místech po 3 měření. Výchozí body pro měření byly použity jako středy jednotlivých prvků (kuželů), viz obr. 4.14. Výsledný průměr naměřené hodnoty rozteče profilu byl 199,93 μm , v porovnání s daty z CAD měl mít profil teoretickou rozteč 200 μm . Veškerá naměřená data jsou uvedena v tab. č. 7 v příloze diplomové práce.



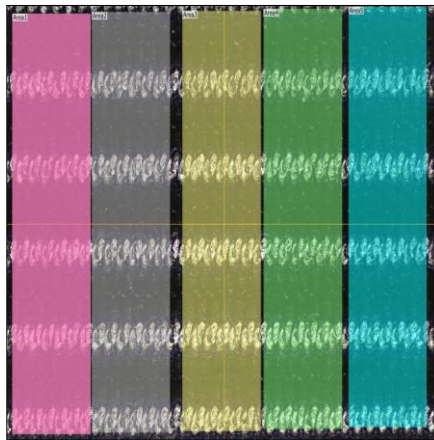
Obr. 4.14 - Vzorek č. 2 – náhled na strategii měření hloubky obrobeneho reliéfu (vlevo), náhled na strategii měření rozteče obrobeneho reliéfu (vpravo)

Tabulka č. 4.5 přehledně srovnává aritmetické průměry naměřených hodnot s hodnoty z CAD modelu, které vycházejí z teoretického profilu. Z tabulky je patrné, že hloubka obrobeneho vzorku je o 33 % nižší než u CAD modelu. Rozteč obrobeneho vzorku dosahovala o 0,03 % nižší hodnoty než u CAD model.

Tab. 4.5 Shrnutí dosažených rozměrů obrobeneho vzorku v porovnání s CAD daty

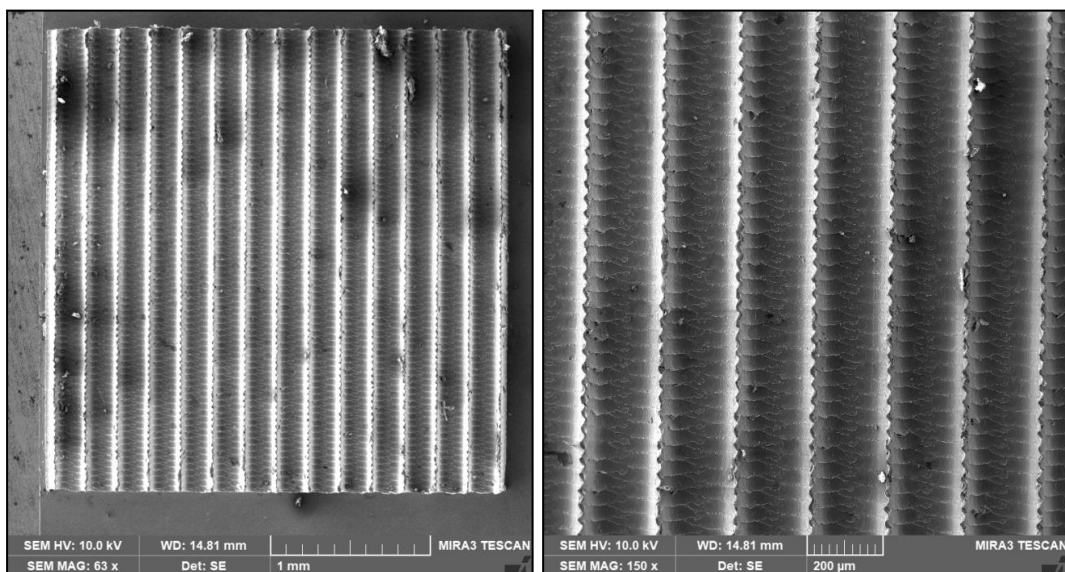
Vzorek č. 2 – reliéf typu kuželů			
		Hloubka profilu [μm]	Rozteč profilu [μm]
CAD model		150	200
Obrobeneý vzorek		100,54 ± 1,66	199,93 ± 1,35

Plošná drsnost povrchu S_a byla měřena v 5 stejně velkých oblastech o rozměru 250 μm na 1000 μm . Výsledný průměr naměřené hodnoty S_a je $22,93 \pm 1,56 \mu\text{m}$. Veškerá naměřená data jsou uvedena v tab. č. 8 v příloze diplomové práce.



Obr. 4.15 - Vzorek č. 2 – náhled na měřené oblasti plošné drsnosti

Na obr. 4.16 jsou zobrazené SEM snímky obrobeného vzorku. Je zde patrná dráha nástroje, otřepy jsou minimální. Lze se domnívat, že z důvodu obrobených vlánek, které jsou vidět na vrcholcích snímku každé špičky, může zde být problém ohledně tuhosti obráběcího stroje nebo vůle osy stroje.



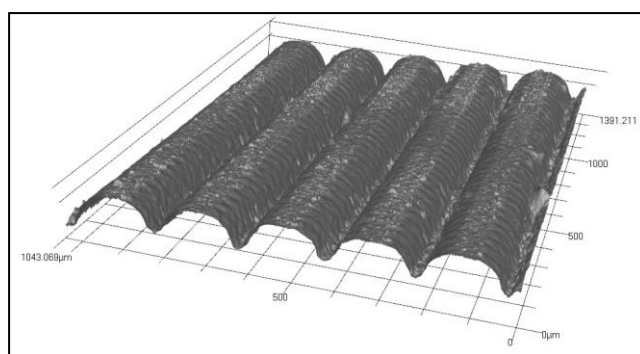
Obr. 4.16 - SEM snímky obrobeného reliéfu vzorku č. 2

4.2.3 Replika

Replikace vzorku č. 2 byla provedena dle metodiky experimentu. Celkem byly vyrobeny 3 repliky. Na vybrané replice byly následně měřeny parametry jejího profilu. Byla měřena rozteč a hloubka profilu. Počet měření byl stejný jako u repliky vzorku č. 1. Veškeré naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tab. č. 9. a č. 10. v příloze diplomové práce. Naměřená hodnota hloubky profilu repliky byla $76,23 \mu\text{m}$. Hodnota rozteče jednotlivých prvků profilu je $200,58 \mu\text{m}$. Výsledné hodnoty jsou přehledně zobrazeny a porovnány s obráběným vzorkem (negativem) v tab. 4.6.

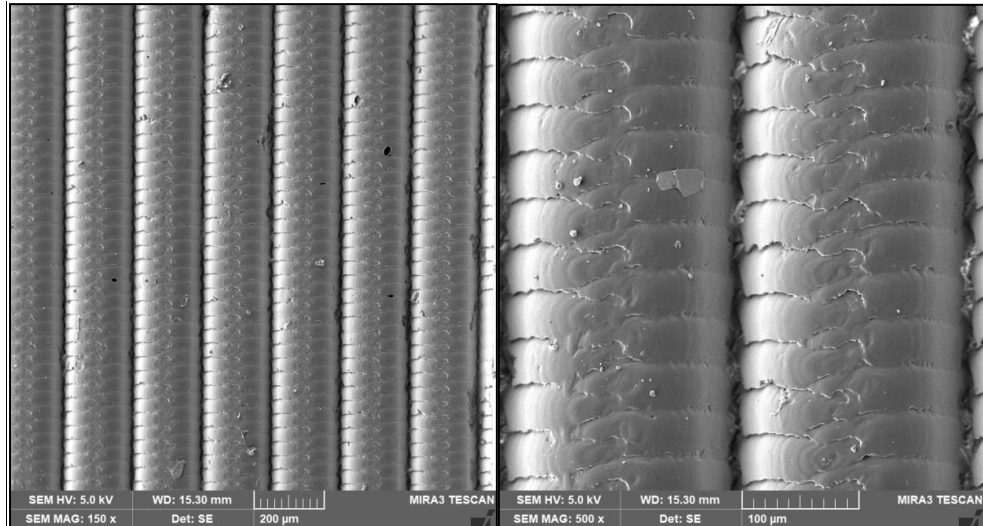


Obr. 4.17 - Vzorek č. 2 a jeho replika



Obr. 4.18 - 3D náhled na repliku, zvětšeno 10x

Replika byla nasnímaná v SEM, náhled je zobrazen na obr. 4.19. Ze snímků je patrné, že replika dokonale kopíruje obrobený povrch – opět jsou vidět dráhy nástroje a malé otřepy o velikosti do $5 \mu\text{m}$.



Obr. 4.19 - SEM snímky repliky vzorku č. 2

Tab. 4.6 - Shrnutí dosažených rozměrů repliky v porovnání s obráběným vzorkem, CAD daty

Vzorek č. 2 – reliéf typu kuželů			
		Hloubka profilu [µm]	Rozteč profilu [µm]
CAD model		150	200
Obrobený vzorek		100,54 ± 1,66	199,93 ± 1,35
Replika		76,23 ± 1,06	200,58 ± 0,86

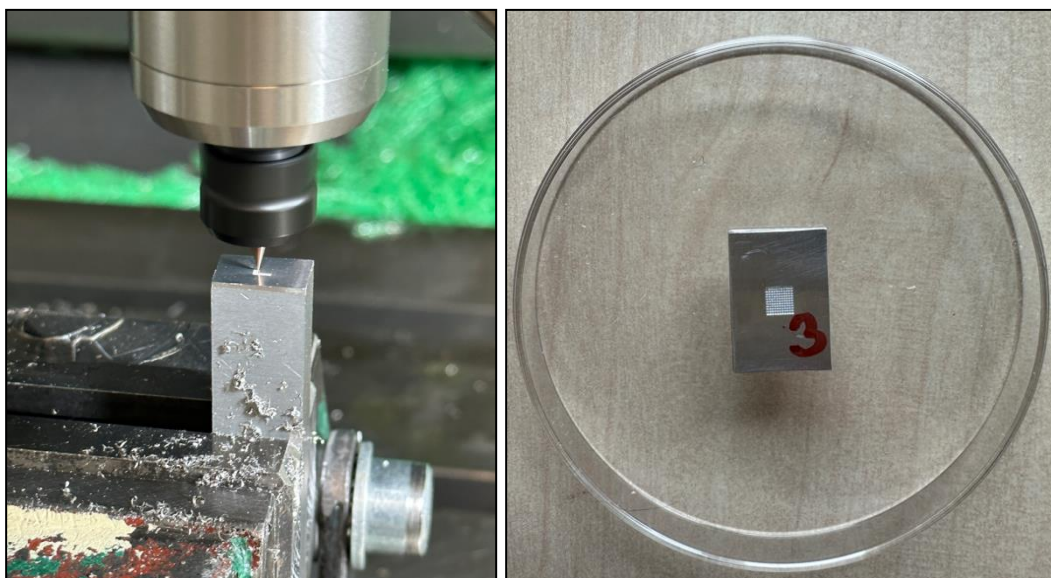
4.3 Vzorek č. 3 – reliéf typu komolých jehlanů

4.3.1 Výroba a řezné podmínky

Vzorek č. 3 byl obráběn strategií kapsy (z ang. *pocket clearing*). Byl naprogramován jeden obráběný prvek – komolý jehlan. Pomocí nástroje lineárního pole se vybraly ostatní obráběné prvky. Strojní čas jednoho komolého jehlanu byl 1 minuta a 50 sekund. Celkový strojní čas pole 3 mm x 3 mm byl 3,25 hodiny. Během procesu obrábění bylo nutné doladit řezné podmínky. Celkem byly použity 4 nástroje.

Tab. 4.7 - Řezné podmínky

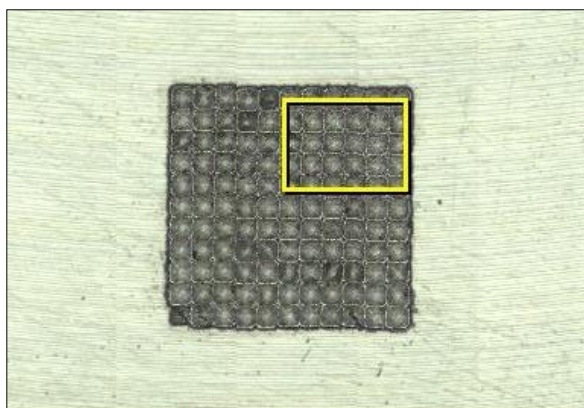
n [ot/min]	f_z [mm]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	$a_{e\ MIN}$ [mm]	$a_{e\ MAX}$ [mm]
60 000	0,0007	80	0,001	0,005	0,013



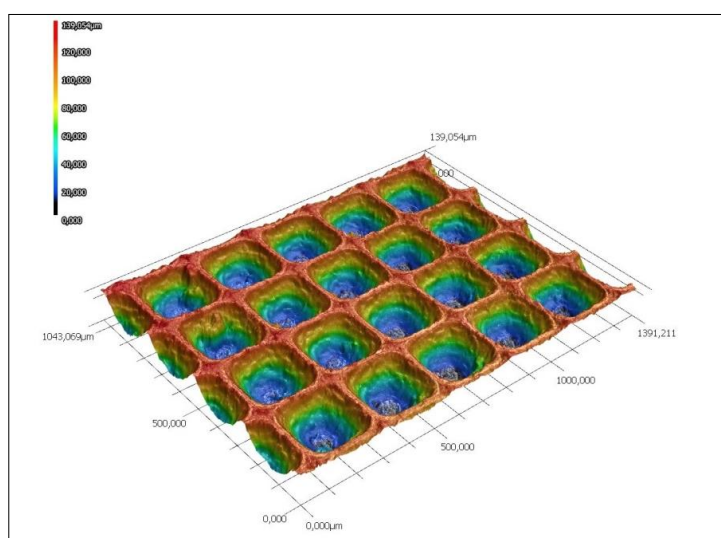
Obr. 4.20 - Proces mikrofrézování a obroběný vzorek č. 3

4.3.2 Měření profilu a plošné drsnosti

Obroběný vzorek byl naskenován do mapy, žlutě vyznačená oblast na obr. 4.21 je zkoumána. U vzorku č. 3 se z hlediska rozměrové přesnosti měřily 3 parametry – rozteč jednotlivých prvků, hloubka obroběného reliéfu a průměr jednotlivých prvků. Na obr. 4.22 je zobrazen zkoumaný profil ve 3D zobrazení.



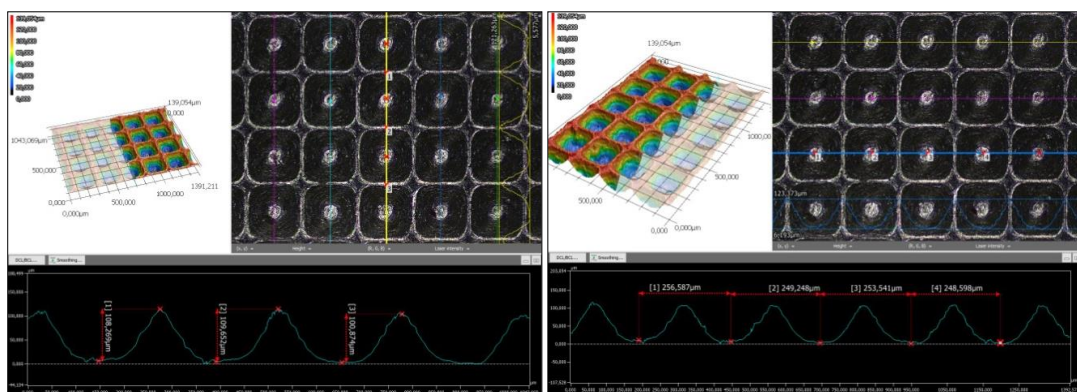
Obr. 4.21 - Náhled na obrobený reliéf vzorku č. 3, zkoumaná oblast vzorku (vyznačena žlutým rámečkem)



Obr. 4.22 - 3D zobrazení povrchu vzorku s barevnou charakteristikou výšek nerovností povrchu, zvětšení: 10x

Měření hloubky profilu proběhlo na 5 úsecích, v každém byla provedena 3 měření, viz obr. 4.23. Výsledná vypočtená hodnota aritmetického průměru naměřených hodnot je 103,72 μm, pro porovnání je hodnota teoretické hodnoty hloubky profilu 100 μm. Veškeré naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 11 v příloze diplomové práce.

Rozteč jednotlivých prvků byla měřena na 4 úsecích. V každém úseku byla provedena 4 měření, viz obr. 4.23. Vypočtený aritmetický průměr naměřených hodnot dosahoval hodnoty 251,54 μm. Pro porovnání je teoretická hodnota rozteče CAD modelu 250 μm. Veškeré naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 12 v příloze této práce.



Obr. 4.23 - Vzorek č. 3 – náhled na strategii měření hloubky reliéfu (vlevo), náhled na strategii měření rozteče reliéfu (vpravo)

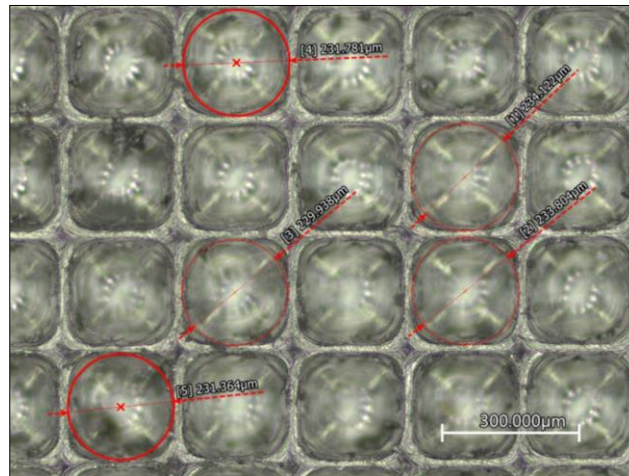
V tabulce 4.8 jsou přehledně shrnuty dosažené přesnosti u obrobeného vzorku v porovnání s CAD modelem. V obou případech měřených hodnot došlo k mírnému zvětšení velikosti profilu, hodnota hloubky profilu se zvětšila o 3,7 % a rozteč se zvětšila o 0,6 %.

Tab. 4.8 - Shrnutí dosažených rozměrů obrobeného vzorku v porovnání s CAD daty

Vzorek č. 3 – reliéf typu komolých jehlanů			
		Hloubka profilu [μm]	Rozteč profilu [μm]
CAD model		100	250
Obrobený vzorek		$103,72 \pm 1,24$	$251,54 \pm 1,36$

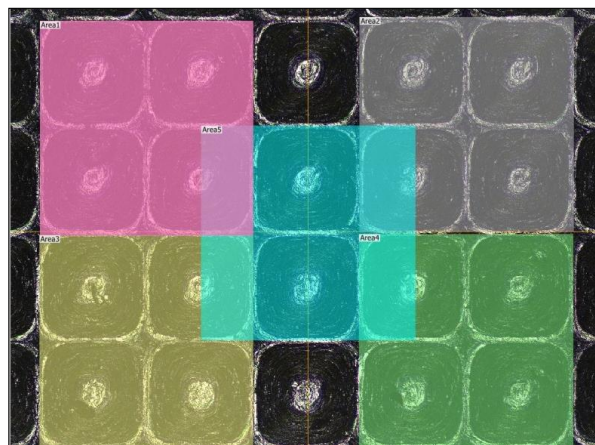
Dosažená přesnost obrobeného reliéfu byla dále kontrolována měřením průměru, zobrazeného na obr. 4.24. Průměr byl měřen s využitím nástroje vepsané kružnice do jednotlivých mikrofrézovaných prvků. Měření se provedlo na 4 odlišných úsecích, v každém bylo celkem 5 měření.

Výsledný aritmetický průměr naměřených hodnot je $232,38 \pm 1,19 \mu\text{m}$. Ve srovnání s CAD modelem měla být hodnota rovna $230 \mu\text{m}$. Veškeré naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 13 v příloze diplomové práce.



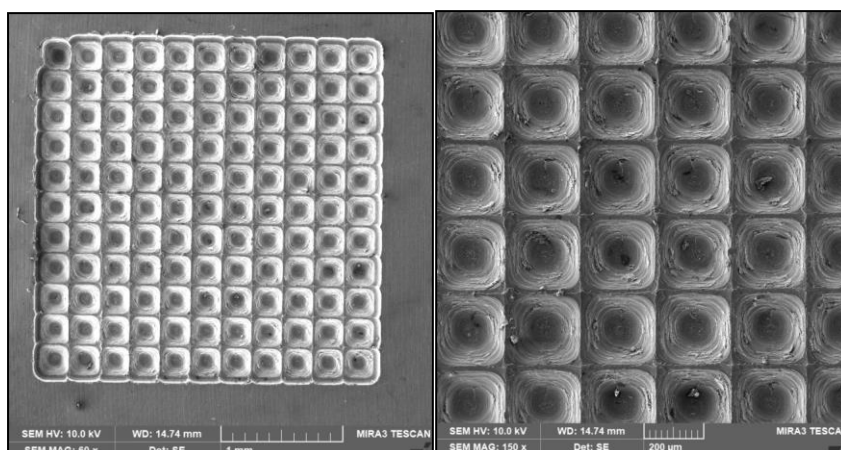
Obr. 4.24 - Vzorek č. 3 – náhled na měření průměru profilu na 1. úseku

Plošná drsnost S_a se měřila na 5 místech, velikost každé měřené oblasti byla $500 \mu\text{m}$ na $500 \mu\text{m}$, viz obr. 4.24. Výsledná naměřená hodnota plošné drsnosti S_a byla $31,11 \pm 1,01 \mu\text{m}$. Veškeré naměřené hodnoty plošné drsnosti jsou zobrazeny v tabulce č. 14 v příloze této práce.



Obr. 4.25 - Vzorek č. 3 – náhled na měření plošné drsnosti

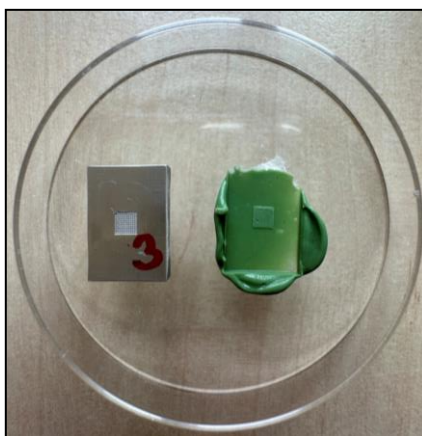
Na obr. 4.26 jsou znázorněné SEM snímky mikrofrézovaného vzorku. Ze snímků je patrné, že obrobené stěny jednotlivých komolých jehlanů nejsou zcela hladké. Jsou zde občasné mikrootřepy, které vznikly v průběhu mikrofrézování. Vznik těchto otřepů může být zapříčiněn snížením posuvu na zub, který byl optimalizován z důvodu lámání nástroje. Další možnou příčinou může být zvětšení poloměru břitů nástroje, který způsobuje větší tření a stlačování materiálu pod ostří a místo řezání pak vytváří otřepy.



Obr. 4.26 - Vzorek č. 3 – SEM snímky

4.3.3 Replika

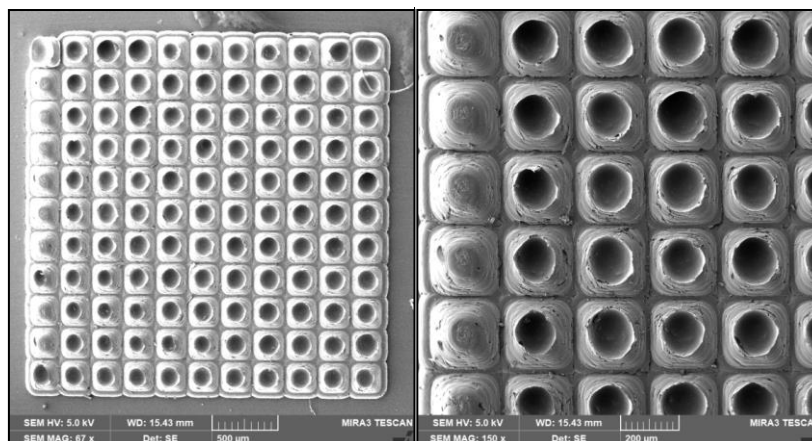
Replika byla provedena na základě postupu, uvedeného v kapitole 3. Replikace vzorku č. 3 se nezdařila. Vzhledem k uzavřenějšímu typu reliéfu, v porovnání se vzorky č. 1 a č. 2, nebyl hierarchický mikrostrukturovaný povrch zcela replikován. Během procesu replikace se z utěsněného materiálu nemohly dostat bubliny vzduchu pryč a tím zůstaly uzavřené pod aplikovaným silikonem.



Obr. 4.27 - Vzorek č. 3 a jeho replika

Replikace byla provedena celkem 3x. Z vybrané repliky se změřily 2 parametry – hloubka replikovaného profilu a rozteč jednotlivých komolých jehlanů. Měření bylo provedeno celkem 8x, výsledná hodnota naměřené hloubky profilu h_p je $91,13 \pm 1,79 \mu\text{m}$. Ve srovnání s obrobeným vzorkem je pokles hloubky profilu o 12 %. Naměřená hodnota rozteče p_p replikovaných komolých jehlanů je $250,56 \pm 2,17 \mu\text{m}$. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 15 a 16 v příloze diplomové práce.

Na obr. 4.28 jsou vyobrazené SEM snímky, na kterých je patrné, že plně replikované byly pouze některé jednotlivé komolé jehlany na levém kraji snímku, nikoliv po celé ploše, jak bylo očekáváno. Z měření velikosti profilu je patrné, že při replikaci neměl vzduch kam uniknout a zabránil silikonu zatéct do obrobeného vzorku.



Obr. 4.28 - SEM snímky repliky vzorku č. 3

Tab. 4.9 - Shrnutí dosažených rozměrů – repliky a obrobeného vzorku v porovnání s CAD daty

Vzorek č. 3 – reliéf typu komolých jehlanů			
		Hloubka profilu [μm]	Rozteč profilu [μm]
CAD model		100	250
Obrobený vzorek		$103,72 \pm 1,24$	$251,54 \pm 1,36$
Replika		$91,13 \pm 1,79$	$250,56 \pm 2,17$

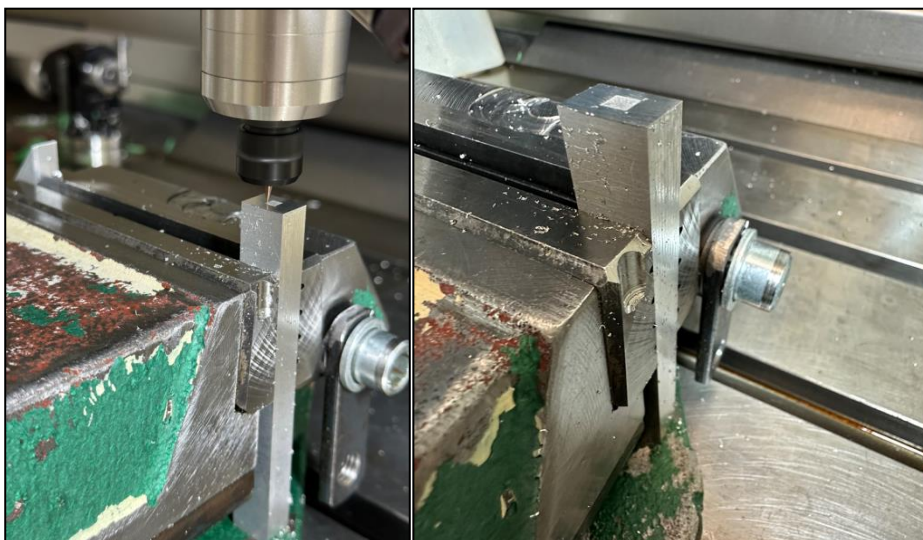
4.4 Vzorek č. 4 – reliéf typu podlouhlých válců

4.4.1 Výroba a řezné podmínky

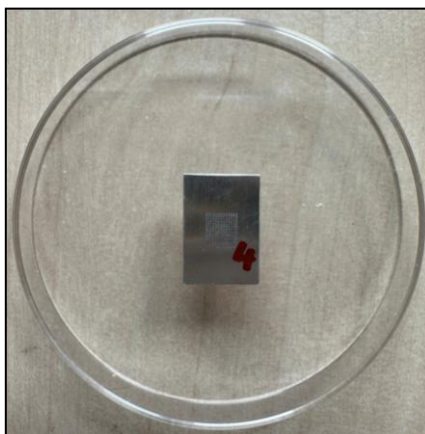
Vzorek č. 4 byl obráběn pomocí funkce vyvrtávání (*z ang. bore*). Tato funkce využívá spirálového frézování. Strojní čas jedné díry se pohyboval okolo 25 sekund. Celkový strojní čas pole 4 mm x 4 mm byl 5 hodin. Během procesu obrábění bylo nutné doladit řezné podmínky. Celkem bylo použito 5 nástrojů.

Tab. 4.10 - Řezné podmínky

n [ot/min]	f_z [mm]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	a_e [mm]
60 000	0,0005	60	0,001	0,001



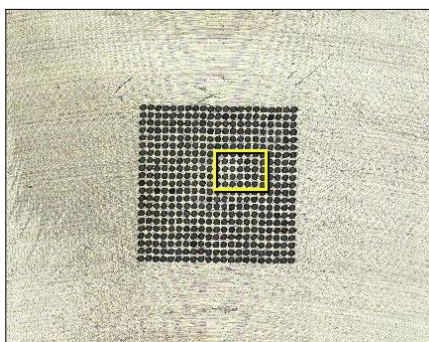
Obr. 4.29 - Proces mikrofrézování vzorku č. 4 a obroběný vzorek



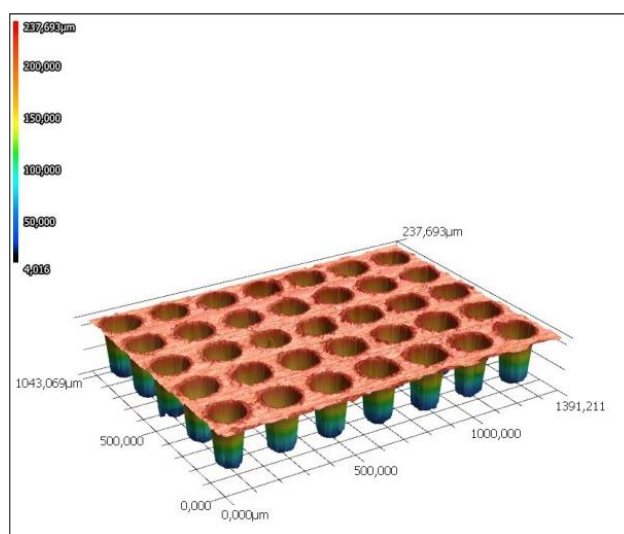
Obr. 4.30 - Obroběný vzorek č. 4

4.4.2 Měření profilu a plošné drsnosti

Obrobený vzorek byl naskenován do navigační mapy, kde žlutě vyznačená oblast na obr. 4.31 byla zkoumána. Z hlediska rozměrové přesnosti se měřila hloubka obrobeného reliéfu, rozteč jednotlivých prvků a průměry jednotlivých prvků. Veškeré naměřené hodnoty jsou zobrazeny v příloze této práce – tab. 17, 18, 19 a 20.



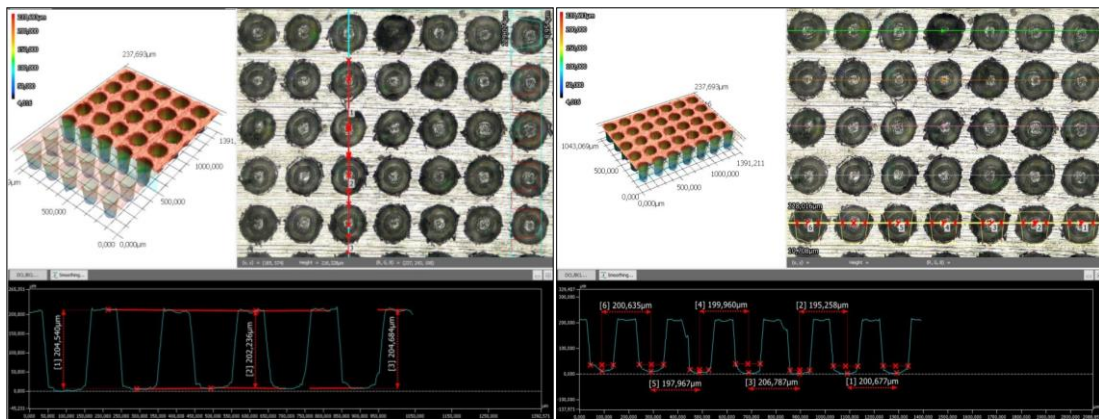
Obr. 4.31 - Náhled na obrobený reliéf vzorku č. 4, zkoumaná oblast vzorku (vyznačena žlutým rámečkem)



Obr. 4.32 - 3D zobrazení povrchu vzorku, zvětšení: 10x

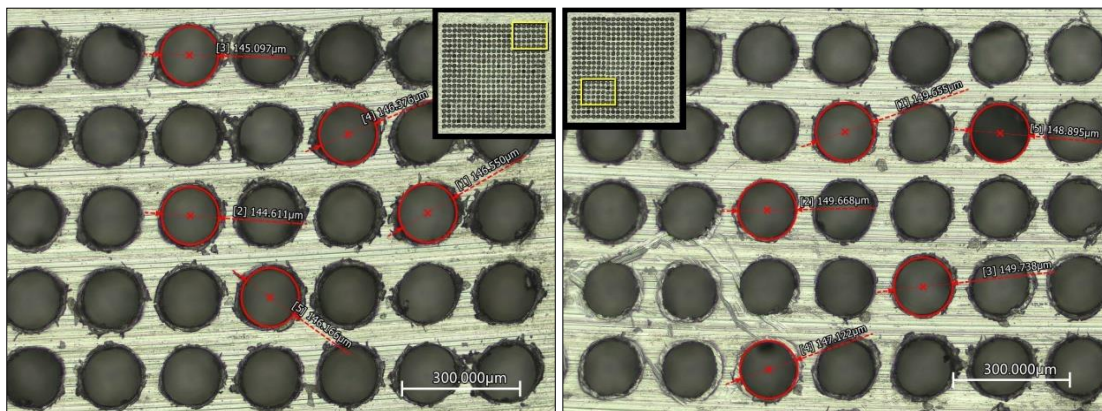
Hloubka profilu h_p byla měřena ve 4 oblastech po 3 měření, viz obr. 4.34. Výsledná naměřená hodnota hloubky profilu byla $200,74 \pm 1,79 \mu\text{m}$. Dle CAD, měl mít teoretický profil $200 \mu\text{m}$.

Rozteč reliéfu p_p byla naměřena v 5 oblastech po 6 měření, způsob měření je zobrazen na obr. 4.33. Výsledná naměřená hodnota rozteče profilu byla $199,58 \pm 1,58 \mu\text{m}$, v porovnání s daty z CAD měl mít profil teoretickou rozteč $200 \mu\text{m}$.



Obr. 4.33 - Vzorek č. 4 - náhled na strategii měření hloubky profilu (vlevo), náhled na strategii měření rozteče profilu (vpravo)

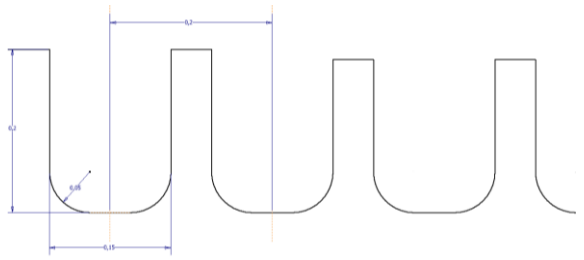
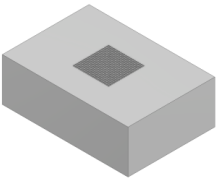

Měření průměrů jednotlivých prvků bylo realizováno na 4 odlišných úsecích vzorku, v každém bylo provedeno celkem 5 měření, viz obr. 4.34. Výsledná naměřená hodnota byla $147,44 \pm 2,10 \mu\text{m}$. Dle CAD je hodnota rovna $150 \mu\text{m}$.



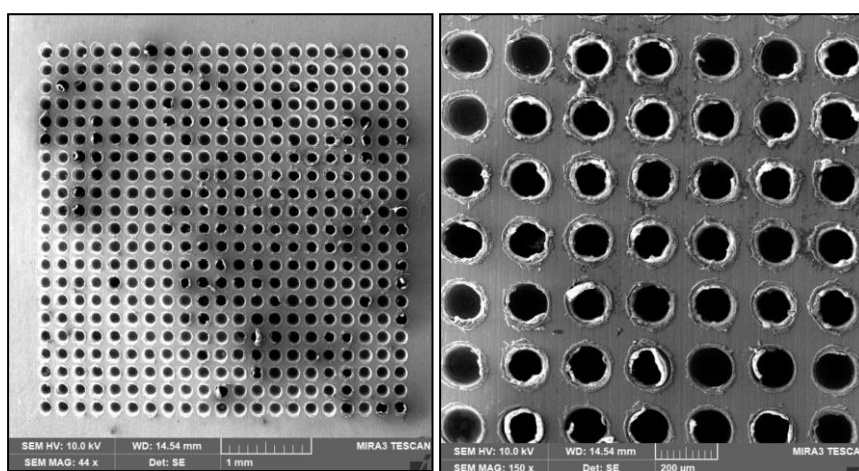
Obr. 4.34 - Vzorek č. 4 – náhled na měření průměrů

Plošná drsnost povrchu byla měřena v 5 stejně velikých oblastech o rozměru $250 \mu\text{m}$ na $1000 \mu\text{m}$. Výsledný průměr naměřené hodnoty S_a je $61,101 \pm 1,274 \mu\text{m}$. V tabulce 4. 11 jsou přehledně shrnuty naměřené hodnoty profilu ve srovnání s CAD modelem. Je zde zobrazen typ (CAD model, obrobek) a měřený parametr (hloubka profilu, rozteč, ...). Vpravo nahoře je zobrazena skica obráběného reliéfu. Při vzájemném porovnání měřených parametrů si lze povšimnout, že rozdíl mezi teoretickým profilem a skutečným (obrobeným) je v řádech jednotkách μm .

Tab. 4.11 - Shrnutí dosažených rozměrů obrobeneho vzorku v porovnání s CAD daty

Vzorek č. 4 – reliéf typu podlouhlých válců				
		Hloubka profilu [μm]	Rozteč profilu [μm]	Průměr [μm]
CAD model		200	200	150
Obrobený vzorek		$200,74 \pm 1,79$	$199,58 \pm 1,58$	$147,44 \pm 2,10$

Ze snímků, pořízených na mikroskopu KEYENCE VK-X1000 a především ze snímků SEM je patrné, viz obr. 4.35, že obrobený povrch vykazuje otřepy na okrajích jednotlivých děr. Tyto otřepy lze charakterizovat jako tzv. vstupní otřepy. Otřepy mohou být nejpravděpodobněji způsobeny malou řeznou rychlostí. Popřípadě by stálo za vyzkoumání vlivu jiné geometrie nástroje, z důvodu špatného odcházení třísek z místa řezu.



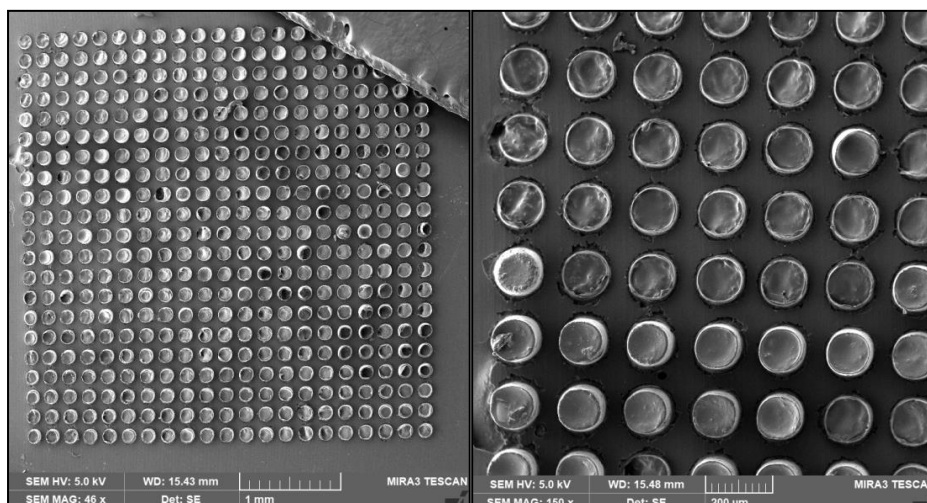
Obr. 4.35 - SEM snímky obrobeneho vzorku č. 4

4.4.3 Replika

Replika byla provedena na základě postupu uvedeného v metodice experimentu, kapitola 3. Replika byla zhotovena celkem 3x. Ze stejného důvodu jako u repliky vzorku č. 3, se replikace vzorku č. 4 nezdařila, uzavřené vzduchové bubliny neumožnily silikonu se dostat do jednotlivých kolíků obrobeného vzorku, a tak obrobený vzorek nebyl zcela replikován. Na SEM snímcích je ukázka repliky vzorku č. 4 a je zde zobrazen replikovaný povrch.



Obr. 4.36 - Vzorek č. 4 a jeho replika

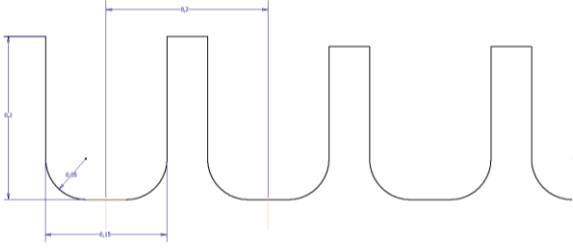
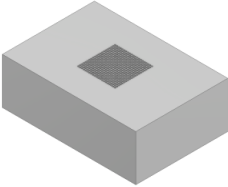




Obr. 4.37- SEM snímky repliky vzorku č. 4

U repliky bylo realizováno měření jejího profilu – hloubky a rozteče jednotlivých prvků reliéfu. Měření bylo provedeno celkem 2krát v 8mi oblastech. Hloubka, respektive výška replikovaného reliéfu vykazovala rozdílné naměřené hodnoty, které byly způsobené problematikou tvoření vzduchových bublin a procesu replikace. Výsledný aritmetický

průměr naměřené hodnoty hloubky (výšky) profilu vyšel $134,57 \pm 1,91 \mu\text{m}$. Rozteč jednotlivých prvků byla měřena na 5 úsecích, v každém byla provedena 2 měření. Výsledná naměřená hodnota rozteče profilu vyšla $200,89 \pm 1,49 \mu\text{m}$. Tabulka 4.12 shrnuje dosažené rozměry u vyrobeného vzorku č. 4 a jeho repliky. Tyto rozměry porovnává s CAD modelem.

Tab. 4.12 - Shrnutí dosažených rozměrů obrobeneho vzorku v porovnání s CAD daty

Vzorek č. 4 – reliéf typu podlouhlých válců			
		Hloubka profilu [μm]	Rozteč profilu [μm]
CAD model		200	200
Obrobený vzorek		$200,74 \pm 1,79$	$199,58 \pm 1,58$
Replika		$134,57 \pm 1,91$	$200,89 \pm 1,49$

4.5 Výroba mikrostruktur ČVUT

V rámci porovnávacího měření byla dohodnuta s ČVUT výroba mikrostrukturovaných povrchů pomocí USP laserového zařízení. USP laser je ultrakrátký pulsní laser, který je charakteristický vysíláním ultrakrátkých pulsů světla, řádově od femtosekund po pikosekundu. Pro mikroobrábění se používají z důvodu minimálního tepelného ovlivnění obráběného materiálu, na rozdíl od kontinuálního laseru. U mikroobrábění pomocí laseru byly nastaveny následující parametry, viz tab. 4.2. Strojní čas obrábění pro každý reliéf je zobrazen v tabulce 4.3. [28]

Tab. 4.1 - Parametry použitého laserového zařízení [28]

Mikroobráběcí stanice	Master 1
Zdroj laseru	Carbide-CB3-40W, výrobce: Light Conversion
Harmonické vlnové délky	IH - 1030 nm, IIH – 515 nm a IIH – 343 nm
Výkon P [W]	40
Doba pulsu τ_p	270 fs – 10 ps
Opakovací frekvence f [kHz]	200 – 1000
Fokusační čočka	F-theta telecentrická
Galvo skenovací hlava	IntelliSCAN14se-fa ScanLab

Tab. 4.2 - Vybrané nastavené parametry při procesu obrábění laserem

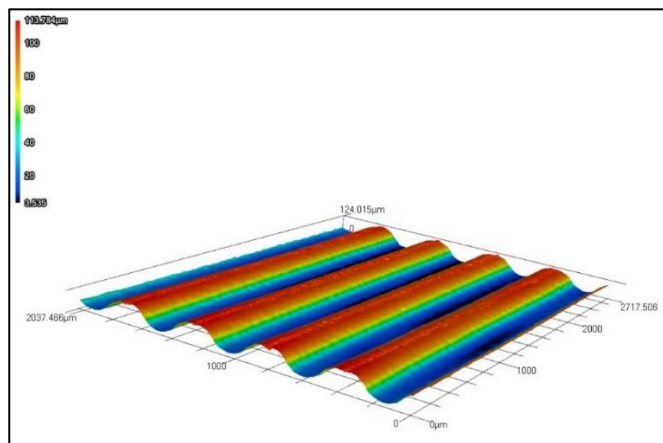
Délka pulsu τ_p [fs]	Vlnová délka λ [nm]	Průměr paprsku d_l [μm]
270	515	25

Tab. 4.3 - Čas obrábění laserem jednotlivých reliéfů

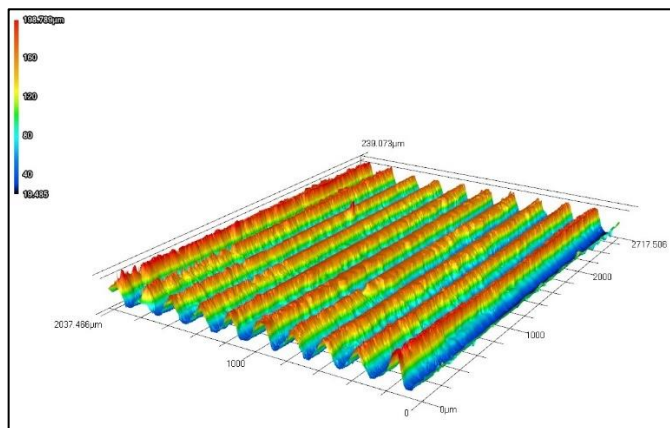
Typ mikrostruktury	Čas obrábění [min]
Mikrostruktura typu vln	4
Mikrostruktura typu kuželů	6
Mikrostruktura typu komolých jehlanů	10
Mikrostruktura typu podlouhlých válců	27



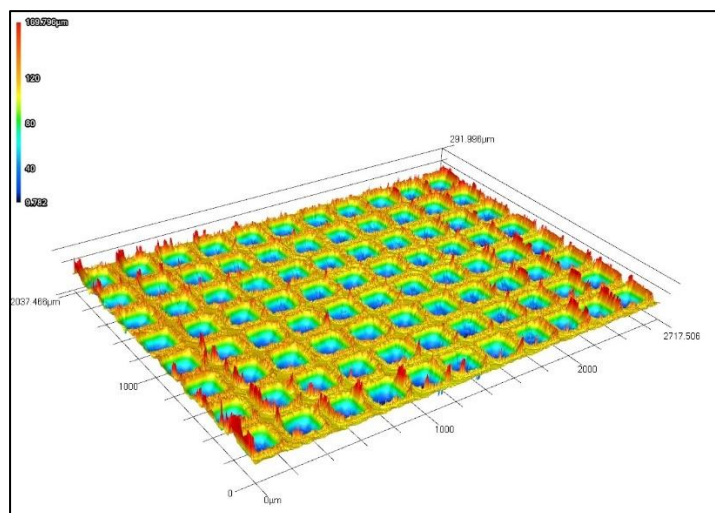
Obr. 4.38 – Obrobené mikrostruktury pomocí laseru



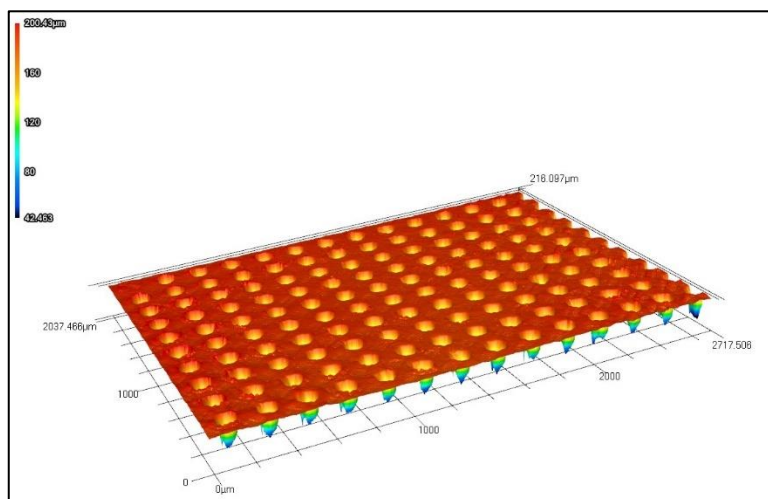
Obr. 4.39 – 3D zobrazení mikrostruktury typu vln, obráběno laserem



Obr. 4.40 – 3D zobrazení mikrostruktury typu kuželů, obráběno laserem



Obr. 4.41 – 3D zobrazení mikrostruktury typu komolých jehlanů, obráběno laserem



Obr. 4.42 – 3D zobrazení mikrostruktury typu podlouhlých válců, obráběno laserem

Obrobené mikrostruktury byly následně měřeny stejnou metodikou a zařízením o stejné přesnosti na ČVUT v Praze. Protokoly z měření jsou k náhledu v příloze diplomové práce.

Tab. 4.4 Tabulka měřených hodnot na ČVUT v porovnání s CAD daty

Typ reliéfu	Hloubka profilu [μm]		Rozteč profilu [μm]	
	CAD	Měření ČVUT	CAD	Měření ČVUT
Reliéf typu vln	100	101,13	447	447,06
Reliéf typu kuželů	150	147,00	200	200,34
Reliéf typu komolých kuželů	100	99,90	250	250,76
Reliéf typu podlouhlých válců	200	185,46	200	nezměřeno

5 Diskuze

Předkládaná diplomová práce se věnuje problematice mikrofrézování. Hlavním cílem této práce bylo zrealizovat experiment pro technologii mikrofrézování a zhodnotit dosažené výsledky v závislosti na dosažené kvalitě mikroreliéfů.

Pro dosažení vytyčeného cíle diplomové práce bylo nutné vytvořit kompletní metodiku experimentu, která zahrnovala následující: stanovení optimálních řezných podmínek, zvolení obráběné mikrostruktury, vhodného nástroje a v neposlední řadě i zvolení vhodného obráběného materiálu. Následně vytvořit metodiku pro:

1. měření topografie a drsnosti povrchu,
2. vyhodnocení naměřených výsledků.

Základní informace týkající se problematiky mikrofrézování jsou uvedeny v kapitole 2. Kapitola obsahuje definici mikrofrézování, porovnání s konvenčním frézování, popisuje mechanismus úběru třísky a popisuje vznik možných problémů, které mohou při procesu mikrofrézování nastat. Dále udává ucelené informace o nástrojích – mikrofrézách, jejich požadavků na řezné materiály a řezné materiály mikrofréz.

Dosažení požadovaného cíle diplomové práce je věnována kapitola 3 – Metodika experimentu a kapitola 4 - Experimentální část.

Přípravě vzorků a metodice prováděných experimentů se věnuje kapitola 3. V této kapitole je popsán způsob přípravy vzorků, výběr nástroje a obráběného materiálu a popis strojů a přístrojů, které byly použity během provádění experimentů.

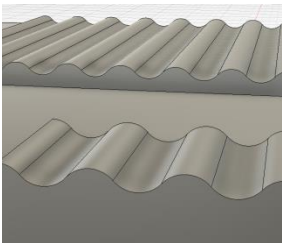
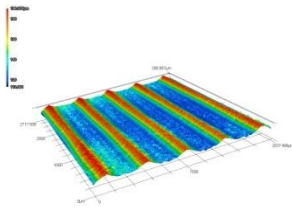
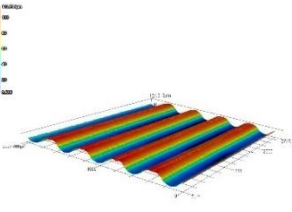
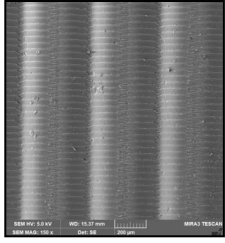
Kapitola 4 je věnována samotné realizaci experimentů. Je zde uvedena výroba vzorků, dosažené výsledky a replikace vzorků.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků lze shrnout následující poznatky:

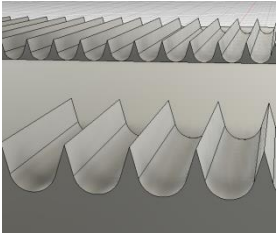
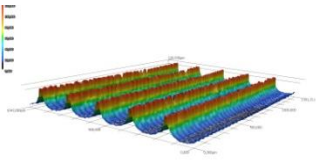
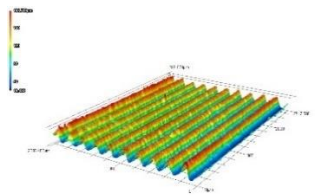
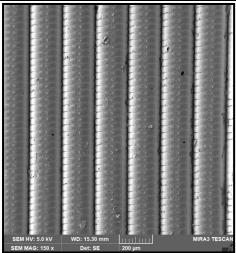
1. Schopnost mikrofrézování byla ověřena ve formě mikroreliéfů s požadovanými velikostmi hloubky profilu a rozteče jednotlivých prvků mikrostruktury.

2. Vytvořením mikroreliefů s různými parametry (hloubka, rozteč, úhly), bylo prokázáno, že proces mikrofrézování je schopen vyrobit mikroreliefy s různými geometriemi. Obrobené hierarchické mikrovzory se pohybovaly v měřítku 200 μm .
3. Kvalita přenesených mikrorozměrů mezi CAD modelem, mikrofrézovaným obrobkem, obrobkem vyrobeným laserovou technologií a výslednou replikací, je shrnuta v tab.: 5.1, 5.2, 5.3 a v tab. 5.4.

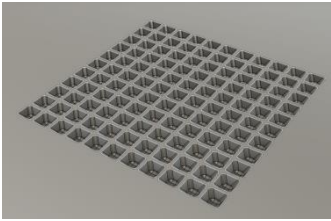
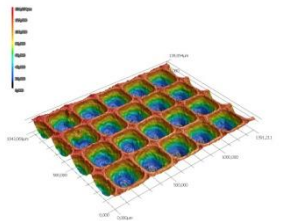
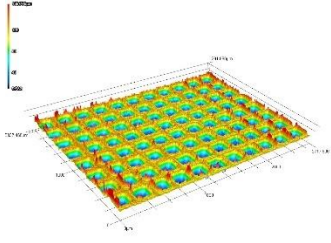
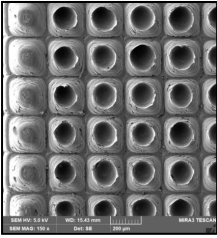
Tab. 5.1 – Zhodnocení kvality přenesených rozměrů pro vzorek č. 1

Vzorek č. 1 Reliéf typu vln		Hloubka profilu [μm]	Rozteč profilu [μm]	Čas [min]
CAD		100	447	30
Obrobek mikrofrézování TUL		$61,30 \pm 1,55$	$446,95 \pm 1,19$	150
Obrobek laser ČVUT		101,13	447,06	4
Replika obrobek mikrofrézování		$59,16 \pm 1,65$	$449,95 \pm 1,30$	15

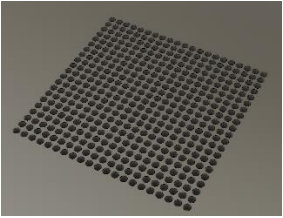
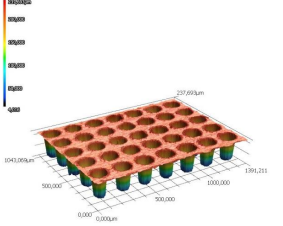
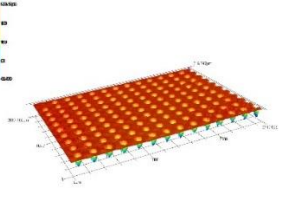
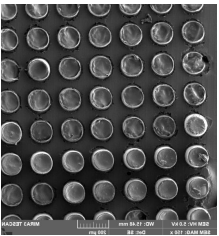
Tab. 5.2 – Zhodnocení kvality přenesených rozměrů pro vzorek č. 2

Vzorek č. 2 Reliéf typu kuželů		Hloubka profilu [μm]	Rozteč profilu [μm]	Čas [min]
CAD		150	200	30
Obrobek mikrofrézování TUL		$100,54 \pm 1,66$	$199,93 \pm 1,35$	240
Obrobek laser ČVUT		147,01	200,34	6
Replika obrobek mikrofrézování		$76,23 \pm 1,06$	$200,58 \pm 0,86$	15

Tab. 5.3 – Zhodnocení kvality přenesených rozměrů pro vzorek č. 3

Vzorek č. 3 Reliéf typu komolých jehlanů		Hloubka profilu [μm]	Rozteč profilu [μm]	Čas [min]
CAD		100	250	30
Obrobek mikrofrézování TUL		$103,72 \pm 1,24$	$251,54 \pm 1,36$	195
Obrobek laser ČVUT		99,90	250,76	10
Replika obrobek mikrofrézování		$91,13 \pm 1,79$	$250,56 \pm 2,17$	15

Tab. 5.4 – Zhodnocení kvality přenesených rozměrů pro vzorek č. 4

Vzorek č. 4 Reliéf typu podlouhlých válců		Hloubka profilu [μm]	Rozteč profilu [μm]	Čas [min]
CAD		200	200	30
Obrobek mikrofrézování TUL		$200,74 \pm 1,79$	$199,58 \pm 1,58$	225
Obrobek laser ČVUT		185,97	nezměřeno	21
Replika obrobek mikrofrézování		$134,57 \pm 1,91$	$200,89 \pm 1,49$	15

4. Z hlediska procesu mikrofrézování:

- Mikrofrézování má vysoké nároky na řídicí systém stroje (velké objemy dat NC programů, velké množství mikrodrah nástroje).
- Problematika pravidelné kontroly nástroje během procesu obrábění.
- Problematika kontroly obrobku obecně během procesu obrábění
- Problematické odstraňování otřepů vzniklých během procesu obrábění.
- Obráběné reliéfy mají dlouhé strojní časy.
- Vlnitost mikrofrézovaného povrchu může být zapříčiněno axiálním házením břitů, příčinou by mohla být i malá tuhost uložení vřetene stroje.

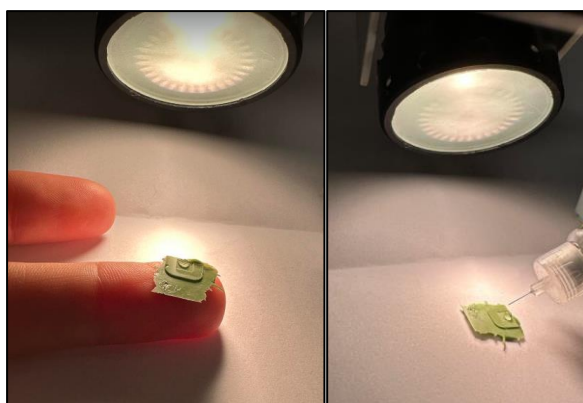
5. Z hlediska procesu replikování a replik:

- Replikovatelnost mikrofrézovaných hierarchických struktur je ověřena.
- Kvalitu přenesených rozměrů mezi obrobkem a replikou znázorňuje následující tabulka 5.2. Tabulka znázorňuje % dosažení stanovených rozměrů repliky v porovnání s obrobkem. Z tabulky je zřejmé, že u 3 ze 4 vzorků došlo k nárůstu velikosti rozteče profilu o cca 0,5 %.

Tab. 5.5 – Dosažená přesnost stanoveného rozměru replik pomocí procesu replikace

Číslo vzorku a typ reliéfu	Dosažená přesnost replik	
	Hloubka profilu [%]	Rozteč prvků profilu [%]
Vzorek č. 1 - Reliéf typu vln	96,51	100,67
Vzorek č. 2 - Reliéf typu kuželů	75,82	100,33
Vzorek č. 3 - Reliéf typu komolých jehlanů	87,86	99,61
Vzorek č. 4 - Reliéf typu podlouhlých válců	66,76	100,66

- U replikace uzavřených mikrostruktur je za potřeby vytvořit vzduchové kanály, pro odchod vzduchu a vytvoření tak úspěšné repliky anebo zvolení jiné metody replikace vzorků.
- Replikované vzorky mohou vykazovat požadované vlastnosti, jako je hydrofobnost, hydrofilnost. Důkazem je provedená replika vzorku č. 2, která vykazuje požadované vlastnosti hydrofobního povrchu.
- Přenesené rozměry reliéfu se po několikanásobné replikaci mikrostruktury (3x) nezměnily.



Obr. 5.1 – Testování hydrofobního povrchu repliky vzorku č. 2

6. Ekonomické zhodnocení technologie mikrofrézování bylo provedeno na základě: počtu použitých nástrojů, strojního času a sazby výrobního stroje, času stráveného na programování a přípravných operací, velikost obráběných polí je 3 x 3 mm.



Obr. 5.2 Obrobené hierarchické mikrostruktury mikrofrézováním

Tab. 5.6 – Ekonomické zhodnocení mikrofrézovaných vzorků

Číslo vzorku a typ reliéfu	Strojní čas [h]	Cena obrábění [Kč]	Cena za programování, přípravné operace, manipulace [Kč]	Počet nástrojů [ks]	Cena za nástroje [Kč]	Cena celkem [Kč]
Vzorek č. 1 – reliéf typu vln	2,5	3250	445	1	875	4820
Vzorek č. 2 – reliéf typu kuželů	4	5200	445	1	875	6920
Vzorek č. 3 – reliéf typu komolých jehlanů	3,25	4225	525	2	1750	6825
Vzorek č. 4 - reliéf typu podlouhlých válců	4	5600	525	2	1750	7875

7. Kvalita přenesených mikrorozměrů mezi CAD modelem a obrobkem je přehledně shrnuta v tabulce 5.1. Jsou zde uvedeny dosažené hodnoty mikrofrézováním v porovnání s CAD daty, zobrazené v %. Z tabulky je patrné, že dosažené přesnosti z hlediska rozteče profilu bylo dosaženo vždy na 99 % stanoveného rozměru.
- Naměřené odchylky mezi obroběným vzorkem a CAD modelem mohou být dále způsobeny: tuhostí soustavy SNOP, vůlí v ose Z použitého obráběcího stroje.

Tab. 5.7 – Dosažená přesnost stanoveného rozměru obráběných vzorků technologií mikrofrézování

Číslo vzorku a typ reliéfu	Dosažená přesnost obráběných vzorků	
	Hloubka profilu [%]	Rozteč prvků profilu [%]
Vzorek č. 1 - Reliéf typu vln	61,30	99,99
Vzorek č. 2 - Reliéf typu kuželů	67,03	99,97
Vzorek č. 3 - Reliéf typu komolých jehlanů	103,72	100,62
Vzorek č. 4 - Reliéf typu podlouhlých válců	100,37	99,79

8. V rámci porovnávacího měření byly mikrostruktury obrobny USP laserem na ČVUT v Praze, Ústav výrobních strojů a zařízení. Bylo zjištěno, že tato technologie nebyla schopna obrobit mikrostrukturovaný povrch o hloubce 200 μm , na rozdíl od mikrofrézování. Z pohledu drsnosti povrchu jsou obrobky uhlazenější, bez stop po dráhách nástroje. Dosažená hloubka u obrábění laserem byla 185,46 μm , u mikrofrézování byla dosažena hloubka 199,58 μm .
9. Uplatnění mikrofrézovaných struktur:
- Funkční mikrostrukturované povrchy – samočisticí, smáčivé, pro zlepšení chladičského účinku v elektronice, snížení odporu [29]
 - Lékařský průmysl – lékařské implantáty (např. mikrozámečky na připevnění k živé tkáni) [30], čipy do inzulínových pump
 - Dentální průmysl – dentální náhrady
 - Hodinářský průmysl – číselníky hodinek
 - Výroba elektrod (např. grafitových), výroba forem

6 Závěr

Předložená diplomová práce zpracovaná na téma Topologie a drsnost povrchu při mikrofrézování přispívá k rozšíření poznatků o technologickém procesu mikrofrézování. Hlavním cílem diplomové práce byla tvorba hierarchických mikrostruktur s využitím mikrofrézování a následné zkoumání dosažené rozměrové přesnosti. K dosažení plánovaného cíle bylo nutné nejprve hierarchické mikrostruktury navrhnout, vymodelovat vyrobit a následně replikovat.

Diplomová práce je členěna do 3 hlavních částí.

V teoretické části práce byl proveden rozbor dané problematiky a byly shrnuty dosavadní poznatky.

Metodická část práce se věnuje popisu a přípravě experimentu. Definuje použité stroje, zařízení, nástroj, obráběný materiál, řezné podmínky a v neposlední řadě přípravu vzorků a jejich proces replikace.

Experimentální část práce se věnuje provedení experimentu, vyhodnocení naměřených hodnot a následnému jejich zpracování.

Nedílnou součástí předkládané diplomové práce je diskuze a závěr.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků mikrofrézováním lze formulovat následující:

1. Je ověřeno, že navržené hierarchické mikrostruktury lze vyrobit mikrofrézováním s hloubkou profilu 200 μm .
2. Mikrostruktury vytvořené mikrofrézováním dosahovaly rozměrovou přesnost téměř 99 % v porovnání s CAD předlohou.
3. Z hlediska procesu mikrofrézování je problematická kontrola nástroje v průběhu samotného mikroobrábění a kontrola obráběného polotovaru.

4. Vyrobené hierarchické mikrostruktury lze pomocí procesu replikace kopírovat. Replika pak odpovídá povrchu obrobené mikrostruktury z 91 %. Zbýlých 9 % je způsobené uzavřenou mikrostrukturou. V této uzavřené mikrostrukturu zůstávají vzduchové bubliny, díky kterým nanesený silikon nezateče a zcela nevyplní negativ formy.
5. Nad rámec diplomové práce bylo zrealizováno porovnávací měření výroby mikrostruktur přesnější metodou (laser) na ČVUT v Praze, Ústavu výrobních strojů a zařízení. Za pomoci technologie obrábění laserem, byly obrobeny identické mikrostruktury. V rámci experimentu bylo zjištěno, že laser nebyl schopen obrobít mikrostrukturu o tvaru podlouhlých válců v hloubce 200 μm . Dosažená hloubka byla pouze 185,46 μm , kdežto při mikrofrézování byla dosažená hloubka 199,58 μm .

Práce souvisí s výzkumnými záměry v rámci SGS. Výsledky získané v této práci poslouží pro vědecko-výzkumný projekt SGS 21542/115 – Výzkum v oblasti mikroobrábění – mikrofrézování. Autorka předkládané práce není hlavní řešitelkou za TUL, ale významně se podílí na řešení projektu.

Směry dalšího vývoje v problematice mikrofrézování by byly následující:

- Vliv řezného nástroje (z hlediska geometrie, materiálového složení, volby povlaku) na kvalitu mikrorozměrů.
- Výzkum v oblasti monitorování mikrofrézovacího procesu.
- Studie vlivu otřepů vzniklých při mikrofrézování na funkčnost hierarchických struktur.

Seznam použité literatury

- [1] CHEN, Ni, et al. Advances in micro milling: From tool fabrication to process outcomes. Online. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. 160. 103670. Dostupné z: DOI: S0890695520306866.
- [2] O'TOOLE, Lorcan; KANG, Cheng-Wei; FANG, Feng-Zhou. Precision micro-milling process. Online. State of the art. *Advances in Manufacturing*. 2021. 9. 173-205. Dostupné z: DOI: s40436-020-00323-0.
- [3] HUO, Dehong. *Micro-cutting: fundamentals and applications*. Online. John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-0-470-97287-8.
- [4] JOE THOMPSON. Make a big deal out of micromilling: Each cutting process parameter becomes vital in small spaces. *Canadian Metalworking*. Online. Toronto: FMA Communications Canada, © 2023, 2021 Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/cuttingtools/make-a-big-deal-out-of-micromilling>. [citováno 2023-02-25].
- [5] DOUG PICKLYK. The Big Picture of Micromachining: A niche market that shows room for growth. *Canadien metal working*. online. Toronto: FMA Communications Canada, © 2023. February 14. 2016 Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/metalworking/the-big-picture-of-micromachining>. [citováno 2023-03-02].
- [6] BALÁZS, Barnabás Zoltán, et al. A review on micro-milling: recent advances and future trends. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. 112: 655-684. Dostupné z: DOI:s00170-020-06445-w.
- [7] SUZUKI, Hirofumi, et al. Development of micro milling tool made of single crystalline diamond for ceramic cutting. Online. *CIRP Annals*, 2013. 62.1: 59-62. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850613000978>.
- [8] CHENG, X., et al. Development of ultra-precision machining system with unique wire EDM tool fabrication system for micro/nano-machining. Online. *CIRP annals*, 2008, 57.1: 415-420. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850608000449>.
- [9] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [10] Micro End Mill • Micro Drill. In: *NS Tool*. Online. NS TOOL Co., © 2023. Dostupné z: https://www.ns-tool.com/en/products/product_information/micro/. [citováno 2023-03-01].
- [11] CAI, Yukui, et al. Hydrophobicity of pyramid structures fabricated by micro milling. Online. In: *2017 World Congress on Micro and Nano Manufacturing*. 2017. s. 1-4.

- [12] M.A. Ford® Twister® Micro-Tuff® Drill 0.10mmx1.70x38x3Sh. *M. A. Ford*. Online. Davenport, IA: © M.A. Ford. Dostupné z: <https://www.maford.com/product-details/305M0010>. [citováno 2023-03-01].
- [13] TuffCut® 3MV Series of Micro High Performance End Mills. *M. A. Ford*. Online. Davenport, IA: © M.A. Ford. Dostupné z: <https://www.maford.com/series-family/tuffcut-3mv>. [citováno 2023-03-01].
- [14] DIA-Praha s.r.o. *Diamantové nástroje pro třískové obrábění*. 2011. PDF; online. Dostupné z: https://www.diapraha.cz/uploads/assets/katalogy/pkd-katalog_becker_2011_cz.pdf. [citováno 2023-03-01].
- [15] RAHNAMA, Ramin; SAJJADI, Mozhdah; PARK, Simon S. Chatter suppression in micro end milling with process damping. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, 209.17: 5766-5776.
- [16] PARK, S. S.; MALEKIAN, M. Mechanistic modeling and accurate measurement of micro end milling forces. Online. *CIRP annals*, 2009, 58.1: 49-52.
- [17] GLEICH Aluminium. *EN AW 7075: Technický list*. Online. GLEICH Aluminium, © 2021. 2006. Dostupné z: https://gleich.de/wp-content/uploads/2021/04/cz_en_aw_7075.pdf. [citováno 2023-04-15].
- [18] Praha: PM-TECH. *FRÉZY TVRDOKOVOVÉ*. Online. © 2023 Dostupné z: <https://www.pm-tech.cz/>. [citováno 2023-04-15].
- [19] DOC. ING. DORA KROISOVÁ, PH.D. *Pokročilé materiály a struktury, Bionika I/II*. Liberec, 2023.
- [20] VANICELA, Bilitis Désirée, et al. Quantitative analysis of fine dust particles on moss surfaces under laboratory conditions using the example of *Brachythecium rutabulum*. Online. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28.37: 51763-51771. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-14218-5>.
- [21] VYMAZAL, Miloš. Rokyt cypřišovitý (*Hypnum cupressiforme*). Obrázek. In: *Flora Česka a Slovenska* [online]. Miloš Vymazal, © 2001-2023, 15. 02. 2022. Dostupné z: <https://www.flora-cs.com/foto/cz/139196/>. [citováno 2023-04-15].
- [22] PETR KOCNA. Ibišek trojdílný (*Hibiscus trionum*). Obrázek. In: *Flora CS* [online]. Miloš Vymazal, © 2001-2023, 2015. Dostupné z: <https://www.flora-cs.com/foto/cz/54764/>. [citováno 2023-05-19].
- [23] KOUROUNIOTI, Rea L. Antoniou, et al. Buckling as an origin of ordered cuticular patterns in flower petals. Online. *Journal of the Royal Society Interface*, 2013, 10.80. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3565735/>.
- [24] List Lotos. Obrázek In: *Okrasné dřeviny* [online]. Bernolákovo: Szomolányi Rudolf. Dostupné z: http://okrasnedreviny.sk/obr/Lotos/vseobecne/list_3.jpg. [citováno 2023-04-25].

- [25] DOC. ING. DORA KROISOVÁ. *Bionika - biologie a technika*. TUL. Čelákovice. 2014. 38 s.
- [26] KROISOVÁ, Dora. (CZ). *Způsob získání nanostrukturovaného hierarchického povrchu pozitivního otisku kopírovaného přírodního povrchu*. 308 915 B6. Uděleno 2021.
- [27] KROISOVÁ, Dora; DVOŘÁČKOVÁ, Štěpánka; KŮSA, Petr. Formation of Nanostructure during Replication of a Hierarchical Plant Surface. Online. *Nanomaterials*. 2021. 11.11:2811. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/nano11112811>.
- [28] PRIMUS, Tomáš, et al. Femtosecond laser processing of advanced technical materials. Online. 2023. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/107746>.
- [29] ZHANG, Shaojian, et al. Advances in ultra-precision machining of micro-structured functional surfaces and their typical applications. Online. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 142: 16-41. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695519301014>.
- [30] FILIZ, Sinan, et al. Micromilling of microbarbs for medical implants. Online. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48.3-4: 459-472. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.020>.

Přílohy

Příloha č. 1 – CD