

Obrobitelnost WPC materiálů při frézování

Petr Raszka

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Petr Raszka
Osobní číslo:	T22056
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Obrobitelnost WPC materiálů při frézování

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše k tématu práce
- Analýza metod a nástrojů používaných při obrábění WPC materiálů
- Návrh experimentu: výběr materiálů, nástrojů
- Realizace obrábění WPC materiálů
- Vyhodnocení a diskuze výsledků, porovnání s teoretickými předpoklady

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

Seznam doporučené literatury:

- BÍLEK, Ondřej a LUKOVICS, Imrich. Výrobní inženýrství a technologie. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 9788074544712.
- HUTYROVA, Zuzana, et al. Wood filled plastics—Machining and surface quality. In: Proceedings of the International Electronic Conference on Materials, Basel, Switzerland. 2016.
- WU, Zhanwen, et al. Study on helical milling performance of wood-plastic composites. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2022, 37: 143-154.
- ZHU, Zhaolong, et al. Machinability of different wood-plastic composites during peripheral milling. Materials, 2022, 15.4: 1303.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

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

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....

podpis autora

ABSTRAKT

Závěrečná práce se zaměřuje na frézování WPC materiálů, konkrétně na vliv abrazivních vlastností tohoto materiálu na opotřebení nástrojů, což ovlivňuje drsnost povrchu obrobků. V teoretické části jsou rozebrány základy obrábění, detailně popsány jevy při frézování a složení a vlastnosti kompozitních materiálů. V praktické části je pak proveden experiment, zaměřen na testování obrobitelnosti WPC materiálů pomocí fréz ze slinutých karbidů a vliv povlakování na trvanlivost nástrojů, výslednou strukturu povrchu obráběním těmito nástroji a tvorbu třísek.

Klíčová slova: obrábění, frézování, kompozit, drsnost povrchu, opotřebení nástrojů, slinuté karbidy

ABSTRACT

The final thesis focuses on the milling of WPC materials, specifically on the influence of the abrasive properties of this material on tool wear, which affects the surface roughness of workpieces. The theoretical part discusses the basics of machining, describes in detail the phenomena during milling and the composition and properties of composite materials. In the practical part, an experiment is carried out to test the machinability of WPC materials using cemented carbide cutters and the effect of coating on tool durability, the resulting surface texture by machining with these tools and chip formation.

Keywords: machining, milling, composite, surface roughness, tool wear, cemented carbides

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Ondřeji Bílkovi Ph.D. za odborné vedení práce, přínosné konzultace a cenné rady, které mi pomohly při řešení náročných částí výzkumu. Dále děkuji své rodině, která mě během studia i zpracovávání této práce podporovala.

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

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚCÍCH PROCESŮ	15
1.1 ÚVOD DO TEORIE OBRÁBĚNÍ.....	15
1.2 HISTORIE A VÝVOJ OBRÁBĚNÍ.....	16
1.3 TYPY OBRÁBĚNÍ	17
1.3.1 Konvenční metody obrábění	17
1.3.2 Nekonvenční metody obrábění	19
1.3.3 Abrazivní procesy	19
1.4 ŘEZNÉ PODMÍNKY A JEVI PŘI FRÉZOVÁNÍ	20
1.4.1 Řezná rychlost.....	20
1.4.2 Posuvová rychlost	21
1.4.3 Hloubka řezu	21
1.4.4 Řezná síla	22
2 FRÉZOVÁNÍ.....	26
2.1 FRÉZOVACÍ PROCES	26
2.2 TYPY A KATEGORIE FRÉZOVÁNÍ	26
2.2.1 Obvodové frézování	27
2.2.2 Čelní frézování	27
2.2.3 Výroba závitů	28
2.2.4 Okružovací frézování	28
2.2.5 Vysokorychlostní frézování	29
2.3 STROJE PRO FRÉZOVÁNÍ	29
3 DŘEVO-PLASTOVÉ KOMPOZITY	31
3.1 CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	31
3.2 SLOŽENÍ KOMPOZITŮ	32
3.2.1 Matrice - pojivo.....	32
3.2.2 Výztuž	33
3.3 DŘEVO-PLASTOVÉ KOMPOZITY (WPC)	35
3.4 VÝROBA WPC	36
3.4.1 Proces výroby WPC	36
3.5 VLASTNOSTI WPC	37
3.5.1 Testování obrobitelnosti WPC různými typy frézovacích operací	37
4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	40
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
5 CÍL PRÁCE	42
6 TEORETICKÝ PODKLAD EXPERIMENTU	43

6.1	GENERACE G-KÓDU	43
6.2	FRÉZOVACÍ OPERACE.....	43
6.3	MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE	44
7	METODIKA, MATERIÁLY A TECHNOLOGICKÉ VYBAVENÍ EXPERIMENTU	45
7.1	HYPOTÉZY A VÝZKUMNÉ OTÁZKY	45
7.2	SPECIFIKACE TESTOVANÉHO WPC MATERIÁLU.....	45
7.3	TECHNOLOGICKÁ ZAŘÍZENÍ VYUŽITÁ V EXPERIMENTU	47
7.3.1	Pásová pila PPK–175 T (PROMA)	47
7.3.2	CNC frézka DMG MORI – DMU 50.....	49
7.3.3	Přednastavovací přístroj Haimer UNO 20/40 (Microvision)	50
7.3.4	Drsnoměr SJ 410 (MITUTOYO)	51
7.3.5	Mikroskop ProScope HR CSI (Bodelin)	52
7.3.6	Frézovací nástroje.....	53
7.4	EXPERIMENTÁLNÍ POSTUP	54
8	VÝSLEDKY	56
8.1	DRSNOST POVRCHU	56
8.2	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ	57
8.3	VO1 – DRUH TRÍSEK	58
8.4	VO2 – ZMĚNA TVARU BŘITU NÁSTROJE BĚHEM OPOTŘEBOVÁNÍ	60
8.4.1	Analýza nástroje bez povlaku.....	60
8.4.2	Analýza nástroje s diamantovým povlakem.....	61
8.5	VO3 – STOPY FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ NA POVRCHU OBROBKU	63
8.6	DETEKCE KOVOVÝCH ČÁSTIC V OBRÁBĚNÉM MATERIÁLU	64
9	DISKUZE	66
9.1	SHRNUTÍ KLÍČOVÝCH VÝSLEDKŮ.....	66
9.2	OBJASNĚNÍ A ROZBOR HYPOTÉZ	66
9.2.1	H1 – Kvalita povrchu	66
9.2.2	H2 – Životnost nástrojů.....	66
9.3	SPECIFIKOVANÉ VÝZKUMNÉ OTÁZKY	67
9.3.1	VO1: Jaký druh třísek vytváří nástroje ze slinutých karbidů s povlakem a bez povlaku?	67
9.3.2	VO2: Jak se změní tvar břitu nástroje během opotřebování?.....	67
9.3.3	VO3: Jsou na obrobeném povrchu patrné stopy po zubech frézy?	67
9.4	NÁKLADOVÁ ANALÝZA	67
	ZÁVĚR.....	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	74

SEZNAM TABULEK.....	76
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	77
SEZNAM PŘÍLOH.....	78

ÚVOD

Frézování WPC materiálů představuje náročný technologický proces kvůli vysoké abrazivitě a heterogenní struktuře těchto materiálů, vyžaduje optimalizaci řezných podmínek, volbu vhodného nástroje a zkušenosti v oblasti zpracovávání materiálů, kterým se s různým složením mění jejich vlastnosti.

Tyto materiály jsou typicky tvořeny polymerní matricí (HDPE, PP, PVC), plnivem ve formě dřevěných třísek nebo vláken, různými barvivy a látkami, které usnadňují jejich zpracování či ovlivňují jejich mechanické a chemické vlastnosti.

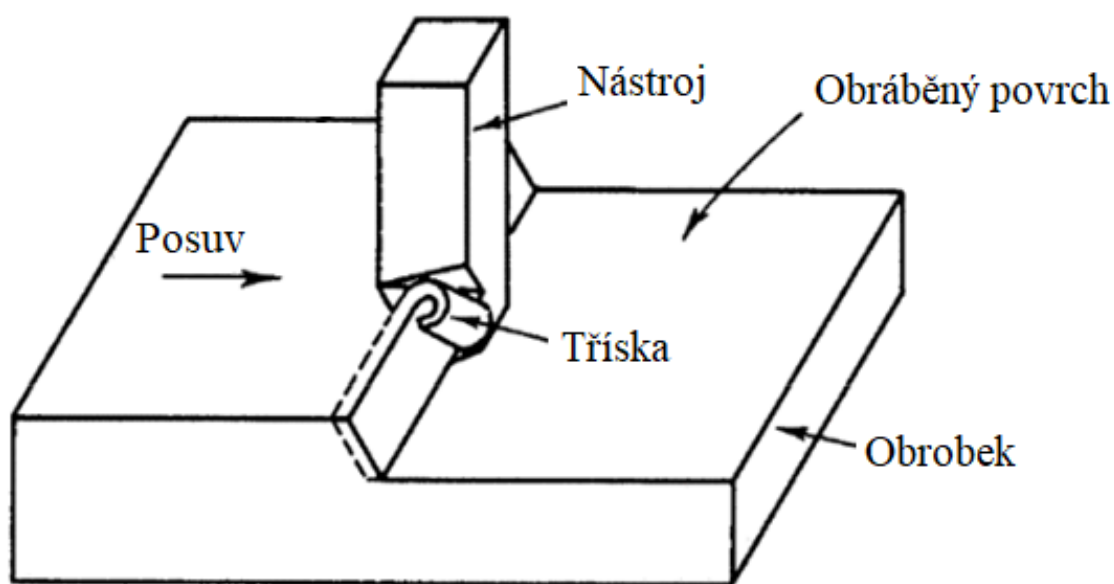
WPC materiály nacházejí nejširší uplatnění ve stavebnictví a truhlářské výrobě, kde jsou schopny konkurovat tradičním dřevěným materiálům. Jejich největší výhodou jsou jejich výrazně lepší hydrofobní vlastnosti ve srovnání s přírodním dřevem, které vyžaduje pravidelnou povrchovou úpravu ve formě nátěrů či impregnace kvůli jejich navlhavosti, WPC materiály díky své polymerní matrici tyto údržbové postupy nepotřebují. Díky tomu se zvyšuje jejich životnost a snižují náklady na údržbu, jsou proto vhodnější pro venkovní aplikace, například terasové podlahy, zahradní nábytek či fasády. Díky možnostem úpravy jejich složení si lze navolit například barevné provedení, přidat antimikrobiální přísady nebo upravit podíl dřevěné složky pro dosažení optimálních vlastností.

V této práci je podrobněji rozebrán proces frézování WPC materiálu, složeného primárně z dřevěného prášku a HDPE. Tento kompozitní materiál s sebou přinesl mnohá technologická úskalí, především kvůli své nestejnorodé struktuře, která při obrábění vytváří nerovnoměrné zatížení nástroje, což způsobuje zvýšené a nerovnoměrné opotřebení nástroje a také zhoršení kvality obrobeného povrchu, proto je cílem práce zjistit, jaký má vliv abrazivních vlastností materiálu na opotřebení nástrojů a jaká bude výsledná drsnost obrobené plochy, která souvisí právě s opotřebením řezných břitů nástroje.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚCÍCH PROCESŮ

Obrábění je výrobní metoda, zaměřená na výrobu součástí požadovaného tvaru a rozměru postupným odebráním materiálu z původního polotovaru, výsledný produkt se nazývá obrobek, část nástroje, která odebírá třísku při konvenčním obrábění, je označována jako řezná hrana (ostří). [1]



Obrázek 1 Tvorba třísky na obrobku

(zdroj: [2])

1.1 Úvod do teorie obrábění

Hlavní podmínkou obrábění je vzájemný pohyb nástroje a obrobku, jenž se nazývá řezným pohybem a skládá se z hlavního pohybu a vedlejších pohybů. Hlavní pohyb je pohybem strojního zařízení, který umožňuje odebrání alespoň jedné třísky a vedlejší pohyby určují, jak plynule se bude oddělovat tříska a jaká bude hloubka řezu. [1]

V dnešní době je obrábění důležitou součástí výrobního průmyslu většiny ekonomicky vyspělých zemí. Každé průmyslové odvětví, nejčastěji zaměřené na auta, vlaky, lodě, letadla, elektroniku či stavební prvky, má k dispozici velké množství pracovníků, zaměřených na obrábění, kteří se snaží učinit pokrok v této oblasti a zdokonalit proces využitím logického myšlení, inovativního přístupu a díky schopnostem aktivně

vyhledávat nové poznatky. Ať už je to prostý operátor stroje, konstruktér či metalurg, každý se snaží přijít na to, jak zdolat výzvy v podobě obrábění nových materiálů, kvalitnějšího povrchu, vyšší přesnosti či snížení nákladů na proces. Málo z nich ale chápe, co se děje v oblasti řezání na mikroskopické úrovni, což je to, co nejvíce ovlivňuje obrobiteľnost materiálů, účinnost nástrojů a výslednou kvalitu obrobeného povrchu, proto je důležité mít v procesu odborné a zkušené pracovníky a současně investovat do modernějších zařízení, aby se dosáhlo těch nejlepších výsledků v oblasti výroby produktů pro konečného zákazníka. [2]

Celosvětově se investice do průmyslu zvyšuje každým rokem, kromě období krizí, kdy se vlivem inflace (růstu cen například během ropných šoků nebo narušením dodavatelských řetězců) či deflace (poklesu cen, primárně při recesi – poklesu ekonomické aktivity) mění ceny nákladů na výrobu a stagnuje poptávka a nabídka produktů. Investování do průmyslu je jedním z hlavních způsobů, jak měřit hodnotu majetku zemí. Směr těchto investic je ovlivněn technologickými požadavky klíčových odvětví. Nejvíce investic směřuje do obrábění kovů, méně pak do oblasti zpracovávání polymerů. Jedním z důvodů je ten, že obráběním kovů jsme schopni dosáhnout velmi přesných tolerancí a drsností povrchů. Dalším důvodem může být univerzalita, možnost vyrábět komplikované tvary s množstvím prvků velmi rychle, levně a jednoduše (pro menší série výrobků) prostým řízením dráhy standartního řezného nástroje, než investovat čas a zdroje do výroby forem pro lití, vstřikování nebo tváření. Zpracovávání polymerů, například vstřikování či vytlačování, nabízí řadu výhod oproti obrábění kovů, především výroba lehkých, koroziodolných a designově flexibilních výrobků. [3]

1.2 Historie a vývoj obrábění

Nejstarší důkaz o obrábění máme z období starověku, kdy staří Egyptané, Řekové a Římané používali speciální nástroje a metody na opracovávání kamene, dřeva a kovů. Využívali ruční nástroje jako pily, dláta a pilníky pro přesné tvarování materiálů. [4]

Ve starověkém Egyptě okolo roku 1300 před naším letopočtem vyvinuli jednoduchý soustruh – na Obrázku 3, který vyžadoval minimálně dvě osoby k obsluze, poháněný zařízením podobném luku, kterým jeden soustružník roztáčel obráběný kus a druhý operátor používal ruční nástroje ke tvarování a řezání materiálu. Tento jednoduchý princip se v průběhu staletí zdokonaloval až do podoby dnešního moderního číslicově programovaného soustruhu. [4]



Obrázek 2 Egyptský předchůdce soustruhu

(zdroj: [4])

V 18. století, s příchodem průmyslové revoluce, došlo k rozvoji a ke zdokonalení obráběcích strojů, díky čemuž se změnily výrobní procesy a zavedla se mechanizace a automatizace, což zvedlo produktivitu a celkově se zvýšila přesnost výroby. [4]

1.3 Typy obrábění

Dle způsobu, jakým odebíráme materiál z obrobku, lze obrábění rozdělit na konvenční, nekonvenční a abrazivní metody, přičemž každá z nich má specifický mechanismus oddělování materiálu. [1]

1.3.1 Konvenční metody obrábění

Konvenční metody obrábění, často označované jako „klasické třískové obrábění“, zahrnují procesy, při kterých dochází k fyzikálně-mechanickému oddělování materiálu obrobku pomocí řezného břitu nástroje. [5]

Při tomto obrábění se používají nástroje, jejichž řezné hrany a tvary jsou přesně navrženy a definovány pro specifické operace a účely. Tyto nástroje, povětšinou kovové, případně s destičkami z jiného materiálu, mají jasně stanovenou geometrii, která určuje, jak bude materiál obrobku odebírán, a zajišťuje požadovanou přesnost, kvalitu povrchu a efektivitu procesu. Mezi konvenční metody obrábění patří soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, protahování, hoblování a obrážení. [1]

Soustružení, operace prováděna na soustruhu, je způsob obrábění rotačních součástí, při níž se obrobek otáčí a koná hlavní řezný pohyb, klíčový prvek celého

soustružnického procesu, který umožňuje odebírání materiálu nástrojem. Vedlejší řezný pohyb dělá nástroj, soustružnický nůž, a může být podélný – nástroj se pohybuje ve směru osy obrobku a příčný – nástroj jede ve směru kolmém na osu obrobku. [1]

Frézování je technologická metoda obrábění materiálu pomocí nástroje (frézy), který rotuje kolem své osy a pomocí břitů po obvodu nástroje obrábí stacionární obrobek. [1]

Vrtání, procedura určena k vytváření válcových a tvarových děr, je nízké produktivní metoda s malou přesností (IT 10-13), proto jsou díry zpřesňovány pomocí operace vystružování, kde je možné dosáhnout třídy přesnosti od IT 5 do IT 10. Nástrojem pro základní vrtání je povětšinou dvoubřitý vrták s řeznými hranami na hrotě, pro vystružování je používán převážně vícebřitý výstružník. [1]

Vyvrtávání je způsob vytváření otvorů přesných geometrických tvarů v přesných roztečích vrtáním, vyvrtáváním a vystružováním, je využíván zejména pro sériovou a hromadnou výrobu. Na strojích, vyvrtávačkách, lze také frézovat (zejména pokud se jedná o vodorovnou vyvrtávačku z důvodu tuhosti konstrukce a přesnému vedení os), orýsovat (přípravná operace, při které se na povrch obrobku vyznačují obrysové čáry či středové body jako vodítko pro další obrábění) nebo také řezat závity vnitřní i vnější. [6]

Protahování a protlačování je velmi produktivní proces, určený pro dokončování tvarových děr (vnitřní protlačování a protahování) a tvarových ploch (vnější protlačování a protahování). Rozdíl mezi protlačováním a protahováním je v konstrukci nástroje a jeho upnutí. Při protlačování je nástroj upnut v lisu a působí se tlakovou silou směrem do materiálu, během protahování je nástroj (protahovák, mající řadu zubů s postupně rostoucími rozměry) upnut do speciálního protahovacího stroje a relativně se pohybuje vůči obrobku, který je pevně upnut. V záběru je vždy počet zubů odpovídající poměru mezi délkou obrobené plochy a rozteče mezi jednotlivými zuby nástroje. [5]

Hoblování a obrážení jsou málo efektivní a ekonomické obráběcí operace, určené pro obrábění rovných povrchů a drážek. Hoblování je vhodnější pro delší obrobky (25m x 10m), které jsou pevně upnuty ve stole, který se horizontálně pohybuje dopředu a zpátky. Vodorovná příčná lišta, která se může vertikálně posouvat, umístěná nad pracovní plochou, je vybavena jednou a více nástrojovými hlavami. V této hlavě je upnut řezný nástroj, který při pohybu stolu dopředu zabírá do materiálu obrobku a odebírá třísku. Vzhledem k výrazné délce obráběného materiálu je vhodné využít tzv. třískolam (angl. *chip*

breaker). Toto zařízení brání vzniku kontinuálních třísek, čímž významně zvyšuje bezpečnost obráběcího procesu. Kvůli čekací době, než se nástroj vrátí do původní pozice, je tato metoda vhodná pouze pro kusovou výrobu, která je běžná u dlouhých a velkých výrobků. Obrážení je principem prakticky stejná operace jako hoblování, jen s tím rozdílem, že se pohybuje nástroj. Obrobky bývají menší (1m x 2m) a z důvodu nízké produktivity se obrážení používá především pro speciální operace, například výrobu ozubení obrážením. [7]

1.3.2 Nekonvenční metody obrábění

Dlouhodobě se hledají a zkoumají různé metody a způsoby, jak rychleji, přesněji a bez použití značných řezných sil obrábět citlivé, tenké díly. Rovněž s nástupem pokročilých kompozitů a nových tvrdých a křehkých materiálů roste potřeba obrábět pomocí netradičních metod, které nezpůsobují vnitřní materiálové změny či mechanicky nezatěžují slabší části výrobků. Mezi tyto postupy patří například chemické, elektrochemické, paprskové a elektrotermické obrábění. [8]

1.3.3 Abrazivní procesy

Abrazivní metody obrábění, kam patří broušení, honování, lapování, leštění, omílání a superfinišování, zahrnují použití abrazivních zrn k odstranění materiálu z obrobku pomocí nástrojů s nedefinovanou geometrií, což znamená, že řezná zrna jsou rozmístěna nepravidelně, každé má odlišnou velikost, tvar a orientaci. Rozměry řezných zrn jsou velmi malé, odebírají malou třísku, vzniká tak velmi jemný povrch. [1]

Tyto metody se často využívají pro jemné dokončovací práce, přesné tvarování a obrábění převážně kovů, tvrdých nebo křehkých materiálů, jako jsou například kameny, sklo a některé druhy plastů. [8]

Nejnámější operací, patřící mezi abrazivní metody obrábění, je jistě broušení. Tato metoda obrábění využívá k odebírání třísky válcový nástroj – brousicí kotouč, jehož abrazivní zrna jsou spojena pojivem organického, nebo anorganického původu. Hlavní, rotační pohyb koná mnohabřitý nástroj, kterým při vysokých řezných rychlostech odebírá třísku z obrobku. Právě tyto vysoké řezné rychlosti, společně s náhodnou geometrií brusných zrn, způsobují vznik velmi vysokých teplot v obrobku. Touto metodou lze obrábět válcové, tvarové a čelní plochy, rovněž otvory, závit, nebo například ozubená kola či modulové frézy. [1]

1.4 Řezné podmínky a jevy při frézování

Řezné podmínky určují, jakou rychlostí se bude z materiálu ubírat tříska. Tyto podmínky, společně s vlastnostmi obráběného materiálu, definují výkon, potřebný k provedení řezu. Je potřeba je nastavit tak, aby bylo možné obrábět na dostupném obráběcím zařízení. Zároveň je třeba zohlednit životnost nástroje ve vztahu s těmito podmínkami. Řezné podmínky jsou: řezná rychlost, rychlost posuvu a hloubka řezu. Volba těchto parametrů je důležitou součástí efektivního, ekonomického a kvalitního obrábění nejen pro technology, ale i pro operátory obráběcích strojů, konstruktéry, plánovače ale i pro zákazníky, kteří tímto dostanou nejkvalitnější a nejlepší výsledný produkt. [8]

Studování sil, působících na nástroj je neméně důležité pro správné navržení pracovního stroje tak, aby se minimalizovaly deformace strojních součástí, zachovala se zamýšlená rozměrová a povrchová přesnost a také proto, aby obrobek nebyl přebytně namáhán a vydržel obráběcí proces. [7]

1.4.1 Řezná rychlost

Řezná rychlost (v_c) je rychlost, kterou se pohybuje obvodová část nástroje vůči nástroji v místě řezu. Obvykle se udává ve stopách nebo metrech za minutu a musí být převedena na otáčky vřeten za minutu z toho důvodu, že obráběcí procesy jsou převážně prováděny na strojích s rotujícím vřetenem. Převod na otáčky je znázorněn tímto vztahem [8]:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad [\text{otáčky za minutu}] \quad (1)$$

kde:

n – otáčky nástroje (min^{-1})

v_c – řezná rychlost (m/min)

D – průměr nástroje (mm)

Vztah pro řeznou rychlost, okamžitou rychlost hlavního pohybu uvažovaného bodu na ostří vzhledem k obrobku [5]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \quad (2)$$

kde:

v_c – řezná rychlost (m/min)

D – průměr nástroje (mm)

n – otáčky nástroje (min^{-1})

1.4.2 Posuvová rychlost

Posuv nastavujeme na převodovce stroje, posuv za minutu f definujeme jako dráhu nástroje v milimetrech, kterou urazí stůl frézky za jednu minutu [9]:

$$f = f_z \cdot z \cdot n \quad \left[\frac{\text{mm}}{\text{ot}} \right] \quad (3)$$

Kde:

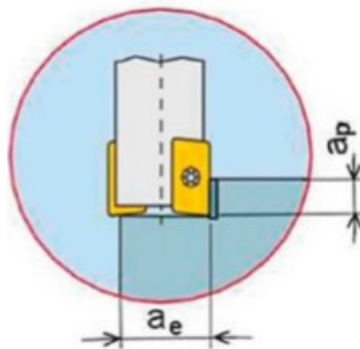
f_z – posuv na zub (mm/zub)

z – počet zubů na nástroji

n – otáčky nástroje (min^{-1})

1.4.3 Hloubka řezu

Hloubka řezu je maximální hloubka materiálu, kterou odebere nástroj při obrábění, dělí se na axiální (a_p) – hloubka třísky ve směru osy frézy a radiální (a_e) – také známý jako překrytí frézy, hloubka třísky ve směru kolmo k ose frézy. [10]



Obrázek 3 Hloubka třísky

(zdroj: [10])

1.4.4 Řezná síla

Pro určení řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu v poloze určené úhlem φ_i . Celková řezná síla při válcovém frézování frézou s přímými zuby F_i se rozkládá na složky F_{ci} a F_{cNi} , respektive na složky F_{fi} a F_{fNi} , znázorněné v Obrázku 4. Kde:

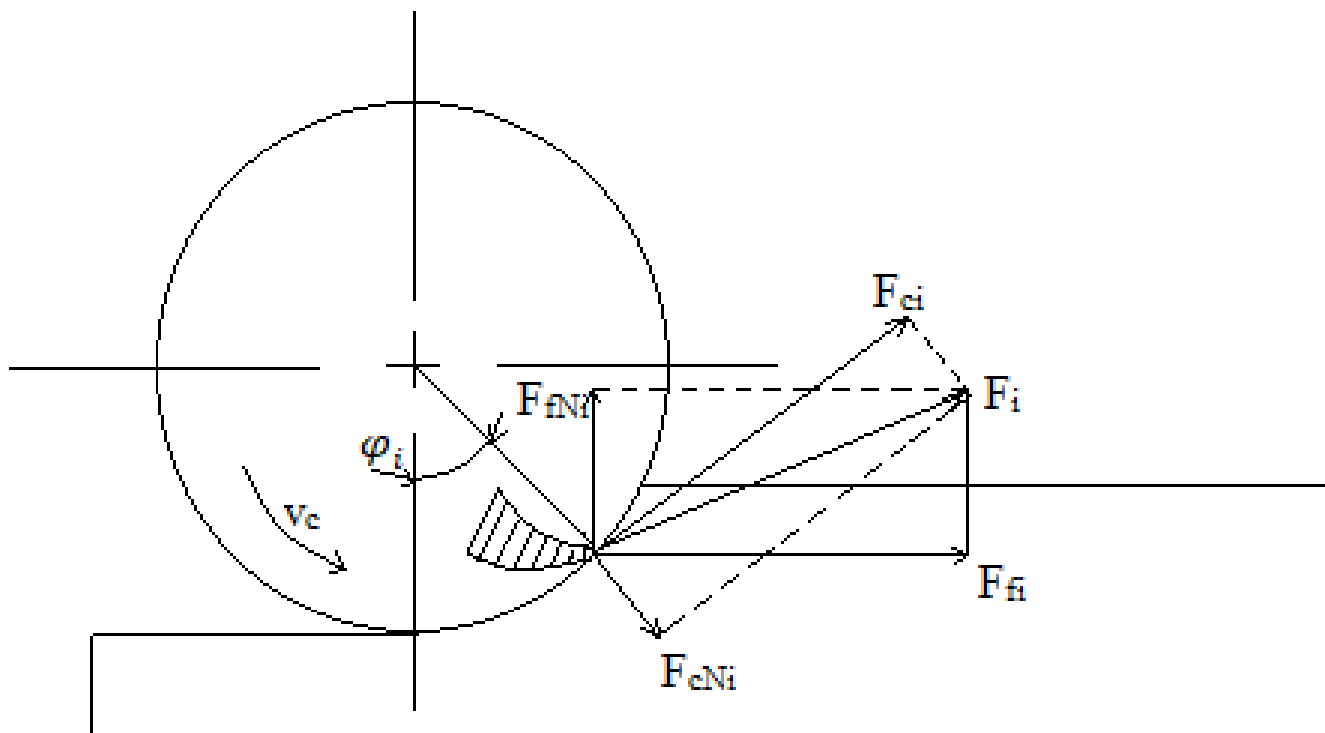
F_i – celková řezná síla

F_{ci} – řezná síla

F_{cNi} – kolmá řezná síla

F_{fi} – posuvová síla

F_{fNi} – kolmá posuvová síla



Obrázek 4 Znázornění řezných sil při nesousledném frézování v pracovní rovině P_{fe}

(zdroj: [5])

Řezná síla F_{ci} je vyjádřena pomocí měrné řezné síly p_i a průřezu třísky A_{Di} :

$$F_{ci} = p_i \cdot A_{Di} = p_i \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (4)$$

Kde:

F_{ci} – celková řezná síla

p_i – měrná síla

A_{Di} – průřez třísky

a_p – šířka záběru ostří

f_z – posuv na zub

φ_i – úhel posuvového pohybu

Měrnou řeznou sílu k_{ci} je možné vyjádřit vztahem, který obsahuje empiricky stanovené hodnoty konstant C_{Fc} a x (Tabulka 1):

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (5)$$

Kde:

k_{ci} – měrná řezná síla

C_{Fc} – empiricky stanovená konstanta pro výpočet tečné složky řezné síly F_c pro frézování

x – empiricky stanovená hodnota exponentu

h_i – jmenovitá tloušťka třísky v libovolné fázi jejího odřezávání

f_z – posuv na zub

φ_i – úhel posuvového pohybu

Po dosazení měrné řezné síly a úpravě do vztahu pro řeznou sílu F_{ci} (4):

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \quad (6)$$

Avšak tyto vztahy jsou odvozeny ze silových poměrů na jednom břitu, při frézování ale zabírá obvykle více zubů současně. Řezné síly tedy závisí na počtu zubů v záběru a jejich poloze vůči obrobku. Pro určení potřebného krouticího momentu a výkonu na vřetenu frézky je podstatná celková řezná síla F_c , její výpočet pro válcové frézování je:

$$F_c = \sum_{i=1}^{i=n} F_{ci} = c_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \sum \sin^x \varphi_i \quad (7)$$

Vztah pro výpočet krouticího momentu všech zubů je dán jako:

$$M_k = F_c \cdot \frac{D}{2} = \left(c_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \right) \cdot \frac{D}{2} \quad (8)$$

Kde:

D – průměr frézy

n_z – počet zubů

Výpočet celkové řezné síly F_c při čelním frézování:

$$F_c = \sum_f F_{ci} = c_{Fz} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin \kappa_r^{x-1} \sum_i \sin^x \varphi_i \quad (9)$$

Kde:

κ_r – nástrojový úhel nastavení hlavního ostří

Pro výpočet řezných sil se používají empiricky stanovené hodnoty konstant C_{Fc} a exponentů x při frézování válcovou a čelní frézou. Tyto hodnoty pro nejčastější materiály jsou uvedeny v Tabulce 1.

Tabulka 1 Hodnoty konstant C_{Fc} a exponentů x při frézování válcovou a čelní frézou

Obráběný materiál	Válcové frézy	
	C_{Fc}	x
Nelegovaná ocel $R_m = 450 \text{ MPa}$	1200	0,63
650 MPa	1380	0,72
850 MPa	1600	0,72
Chromniklová ocel $R_m = 550 \text{ MPa}$	1390	0,66
800 MPa	1440	0,72
900 MPa	1740	0,74
Litina HB $R_m = 180\text{-}200 \text{ MPa}$	850	0,67
	950	0,67
Bronz $R_m = 220 \text{ MPa}$	420	0,60

Na základě těchto konstant je možný výpočet vybraných složek celkové řezné síly. [5]

2 FRÉZOVÁNÍ

Tento způsob strojního oddělování materiálu je po soustružení nejčastější metodou obrábění rovinných i tvarových ploch, při tomto procesu každý břit (zub nástroje-frézy) odebírá třísku. [1]

2.1 Frézovací proces

Během obrábění frézováním, frézovací nástroj (fréza) je upnut ve vřetenu frézovacího stroje (frézky) a koná hlavní pohyb, vedlejší pohyb (posuv) nejčastěji koná obrobek, může ho vykonávat ale i nástroj v určitých případech, například během frézování na portálové frézce, kde pevně upnutý obrobek je obráběn portálem s nástroji, který nad obrobkem přejíždí po vymezené trase a frézuje. [10]

2.2 Typy a kategorie frézování

Frézování můžeme rozdělit na několik různých typů a podkategorií podle různých kritérií, jako jsou směry řezu, použití fréz, způsob obrábění, nebo typy operací. Podle způsobu, jakým fréza zabírá, rozlišujeme frézování čelem čelní frézy, obvodem válcové frézy a frézování okružovací a planetové. [1]

Podle směru pohybu frézy vůči posuvu obrobku je možné rozdělit frézování na sousledné (sousměrné) a nesousledné (protisměrné), dle toho se mění i průřez třísky od nejvyšší hodnoty do nuly a vice versa. [1]

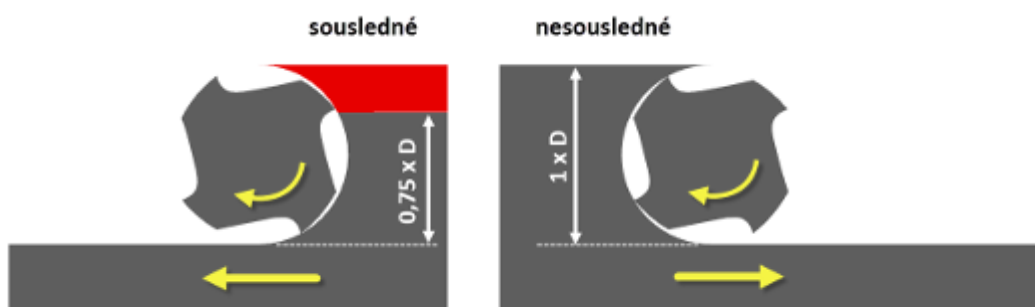
Sousledné frézování

Při sousledném frézování se nástroj otáčí ve stejném směru jako posuv obrobku. Obrobená plocha vzniká ve chvíli, kdy zub nástroje opouští záběr. Síly, vytvořené procesem míří většinou dolů do materiálu. Tato metoda je výhodná díky možnosti využití vyšších rezných rychlostí, což je dáno delší životností břitů nástroje, zároveň nižšími nároky na rezný výkon a menšími sklony ke chvění. Také rezné síly působící směrem do materiálu vytváří přitlačnou sílu, proto zde lze použít jednodušší upínací zařízení. Tento způsob frézování také vytváří povrch s menší povrchovou drsností. [5]

Nesousledné frézování

Válcová fréza pro nesousledné frézování se otáčí proti směru posuvu obrobku, výsledná obrobená plocha je vytvářena během vnikání nástroje do obráběného předvýrobku. Tříska vzniká až po skluzu břitu po ploše, obrobené předchozím zubem, kvůli tomuto efektu

vznikají silové účinky a deformace, které opotřebovávají břit nástroje. Síla, vyvolaná odporem materiálu vůči pronikání nástroje, má složku, která směřuje nahoru od obráběné plochy a odtažuje obrobek z upínacího systému. Hlavní výhodou tohoto způsobu frézování je menší opotřebení posuvového šroubu a matice stolu stroje, kterým zároveň není potřeba nijak vymezovat vůli, nevýhodou je hromadění třísek před nástrojem. [5]



Obrázek 5 Sousedné a nesousedné frézování

(zdroj: [11])

2.2.1 Obvodové frézování

Pro obvodové frézování se používají především válcové a tvarové frézy, zuby těchto fréz jsou rozmístěny pouze po obvodu nástroje, hloubka záběru se nastavuje kolmo k ose frézy a směru posuvu. [5]

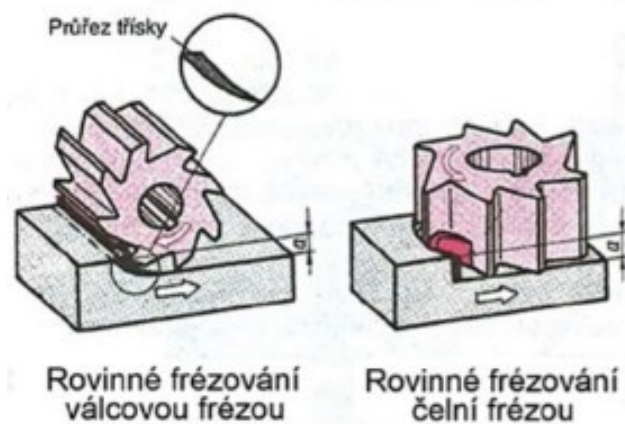
Výsledný řezný pohyb při válcovém frézování je prodloužená cykloida, která vzniká kombinací rotačního pohybu frézy a lineárního posuvu obrobku. [1]

2.2.2 Čelní frézování

Čelní frézování slouží k obrábění plochých povrchů (desky, lože strojů, drážky), nástrojem je zde čelní fréza, která má zuby na spodní kruhové části frézy, osa její rotace je kolmá k obráběnému dílci. Zde se frézování také rozděluje na sousledné a nesousledné, při sousledném čelním frézování nástroj rotuje po směru posuvu obrobku, při nesousledném se otáčí do protějšího směru vůči posuvu obrobku. [7]

Kvůli vzájemnému pohybu mezi zuby a obrobkem, operace čelního frézování po sobě na povrchu obrobku zanechává stopy po obrábění, podobně jako je tomu u soustružení. Drsnost povrchu a tloušťka třísky při čelním obrábění závisí hlavně na geometrii řezného rohu destičky frézy a posuvu na zub. Úhel náběhu řezné destičky má přímý vliv na tloušťku

třísky, jelikož se zvyšujícím se úhlu náběhu se zmenšuje tloušťka třísky, zvětšuje se délka kontaktu destičky s materiálem a tím i šířka třísky, plocha třísky však zůstává stejná. [7]



Obrázek 6 Obvodové a čelní frézování

(zdroj:[10])

2.2.3 Výroba závitů

Pro přesné a efektivní frézování závitů se používají stopkové frézy s profilem závitu ve tvaru drážek s požadovanou roztečí. Tento nástroj se otáčí a během řezání se pohybuje ve spirále stoupání závitu. Pro tuto operaci je běžné používat sousledné frézování, z důvodů dosažení vyšší přesnosti závitu, snížení řezných sil a nižšímu opotřebení nástroje. [10]

2.2.4 Okružovací frézování

Tato operace slouží k obrábění vnějších ploch dlouhých tyčí a také pro výrobu závitů. Odlišuje se od ostatních operací použitím závitorezného prstence, kde jsou břitové destičky připevněny na vnitřní straně tohoto prstence. Prstenec koná otáčivý pohyb kolem součásti a na jeden přejezd nástroje vyfrézuje celý závit. Jedná se o velmi produktivní a rychlou výrobu speciálních závitů, například pro posuvové nebo kostní šrouby, šnekové převody a medicínské implantáty. [12]



Obrázek 7 Závitořezný prstenec

(zdroj: [12])

2.2.5 Vysokorychlostní frézování

Mezi méně obvyklé metody frézování patří především vysokorychlostní frézování, které je velmi důležitým procesem v leteckém a automobilovém průmyslu, jedná se o metodu, která zajišťuje vyšší produktivitu (díky vysokým rychlostem posuvu) a nižší výrobní náklady. Často se jedná o obrábění hliníkových slitin a sendvičových kompozitů. Otáčky vřetene se zde pohybují v rozmezí 20 000 až 80 000 1/min, obráběcí stroje proto musí mít velmi tuhé konstrukce, kvalitní upínací zařízení, dobré chlazení a vyskytuje se zde problém s odvodem třísek, právě kvůli vysoké rychlosti odebrání materiálu. [7]

2.3 Stroje pro frézování

Frézovací stroje patří mezi nejvíce univerzální a nejužitečnější stroje ze všech obráběcích strojů, díky možnostem provádění široké řady obráběcích operací. Moderní frézovací stroje jsou schopné například frézovat, vrtat, vyvrtávat a řezat závity s vysokou přesností. V dnešní době existuje velká škála moderních univerzálních obráběcích strojů, s rozmachem moderních číslicově řízených obráběcích strojů a obráběcích center však tyto univerzální stroje jsou postupně nahrazovány, ačkoliv manuálně řízené stroje jsou pořád velmi oblíbené, například pro malosériovou výrobu nebo tvorbu prototypů. [7]

První frézovací stroj byl sestaven roku 1820 americkým vynálezcem jménem Eli Whitney, který si jej však nikdy nepatentoval. [13]

Stroje určené pro frézování se rozdělují dle konstrukce stroje na vertikální, vodorovné a univerzální dle orientace hlavy nástroje, dále je lze rozdělit podle počtu os na jednoosé, dvouosé, tříosé a víceosé a konečně podle typu řízení na manuálně obsluhované a CNC (počítačem řízené). [7]



Obrázek 8 Univerzální frézka FGU32

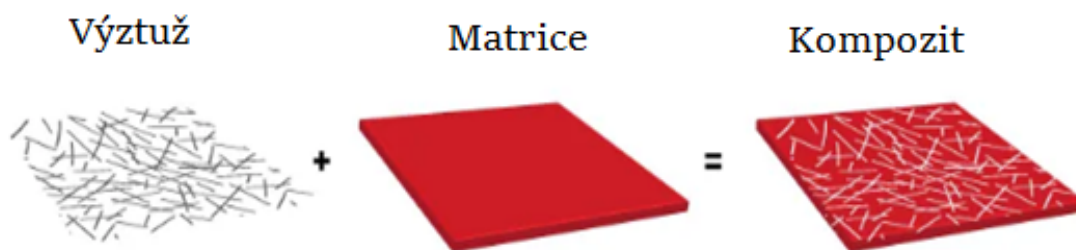
(zdroj: [14])

3 DŘEVO-PLASTOVÉ KOMPOZITY

Kompozitní materiály, jejichž struktura je tvořena dřevěnou výztuží a polymerní matricí, jsou označovány jako dřevo-plastové kompozity (v angličtině WPC – Wood Plastic Composite). Poptávka po materiálu s nižšími nároky na údržbu než přírodní dřevo a s vyšší trvanlivostí stále roste, v roce 2022 hodnota odvětví průmyslu, zaměřeného na WPC, byla přibližně 7 miliard USD a je odhadováno, že do roku 2035 dosáhne hodnoty až 20 miliard USD. Kromě lepší udržitelnosti má tento materiál řadu ekonomických, ekologických a uživatelsky vítaných výhod, jako například možnost recyklace plastů a zbytků dřeva, či možnost vyrábět zboží, které je vysoce přizpůsobitelné požadavkům zákazníka (barva a textura nábytku, podlahovin, stavebních prvků). [15]

3.1 Charakteristika kompozitních materiálů

"Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostou sumací." [16, s. 45]



Obrázek 9 Složení kompozitního materiálu

(zdroj:[17])

Kompozitní materiály lze definovat jako kombinaci dvou a více materiálů, která vede k lepším výsledným parametrům, než když jsou jednotlivé složky použity samostatně. Oproti kovovým slitinám si každá složka kompozitu zachovává své původní fyzikální, chemické a mechanické charakteristiky. [18]

Hlavní předností kompozitů jsou jejich vysoké poměry pevnosti a tuhosti k hmotnosti, z tohoto důvodu se jedná o jedny z nejdůležitějších materiálů pro průmysl, například v leteckém průmyslu, kde je hmotnost daných komponent klíčovou vlastností. [7]

Za příklad kompozitu může být považováno i dřevo, jehož struktura je tvořena celulóзовými vlákny, která jsou ohebná a zároveň pevná v tahu a ligninem, který se chová jako pojivo. Rovněž každá rostlina a každá část živého organismu je kompozitem, kupříkladu vnitřní část kosti, tvořena měkkou, houbovitou strukturou, zajišťuje stabilitu tvrdého povrchu kosti při namáhání tlakem a přenos smykového zatížení při namáhání ohybem. [16]

Nejstarší příklad použití kompozitních materiálů, datovaný do období 4000 let př. n. l., je používání vláken slámy pro vyztužení jílu, ze kterého se pak vyráběly cihly. V 19. století přišel objev železobetonu, kde je spojován křehký beton s ocelovými tyčemi, které mu dodávají potřebnou pevnost v tahu, samotný beton totiž má velmi nízkou až prakticky zanedbatelnou pevnost v tahu. [7]

3.2 Složení kompozitů

Kompozit, materiál, který vznikl kombinací jiných materiálů, je tvořen dvěma základními fázemi: spojitá, primární fáze (matrice - pojivo) a nespojitá, sekundární fáze (výztuž, dispergovaná plniva). [19]

3.2.1 Matrice - pojivo

Tato fáze zajišťuje spojení sekundární fáze v jeden celek (odtud název pojivo), přenos síly na sekundární fázi, separuje od sebe části sekundární fáze a zároveň ji chrání před vnějšími účinky prostředí. Materiály matic mohou být polymerní, kovové a keramické. Polymerní matrice mají vysokou odolnost proti rozpouštědlům a hoření, dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti. Kovové fáze mají menší tloušťku stěny pro požadovanou tuhost kompozitu a keramická fáze je omezena křehkostí keramiky. [19]

Hlavním parametrem pro kvalitní kompozit je zajištění adheze matrice a výztuže, proto se nanáší na vlákno apretace, pro lepší fyzické a chemické vazby. Pojivo by mělo mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby došlo k úplnému namočení vlákna při výrobě. [20]

Matrice u polymerních kompozitů se rozděluje na termosety (reaktoplasty) a termoplasty. [20]

Termosetické pryskyřice

Termosetické pryskyřice, často využívané jako pojiva v kompozitních aplikacích, představují houževnaté, tepelně a chemicky odolné matrice, které během vytvrzování vytvářejí trvalou trojrozměrnou síťovou strukturu. Ve výchozím stavu jsou nízkomolekulární a převážně v tekutém stavu. Také jejich viskozita při teplotě zpracování, v porovnání s termoplasty, je řádově mnohem nižší, proto se jednodušeji zpracovávají, lépe smáčejí a prosycují vlákna. Z energetického hlediska jsou také výhodnější, jejich zpracování totiž probíhá za podstatně nižších teplot. Tyto pryskyřice se vytvrzují použitím katalyzátoru a urychlovače, případně přidáním energie ve formě tepla nebo záření. Tento proces je zásadní, protože kompozit díky němu získává své konečné mechanické a chemické vlastnosti. [20]

Termoplastické matrice

Termoplasty jsou vyztužovány obvykle vlákny, které mohou být krátké (zejména pro zpevnění matrice pro vstřikovací procesy), dlouhé (tato vlákna se převážně zavádí z extruderu přímo do lisovací formy), nebo nekonečně dlouhá (pro přípravu polotovarů z termoplastů vyztuženými skleněnou rohoží, tkaninou či jednosměrnými pásy). Obecné porovnání termoplastických matric s termosety je obtížné z důvodu velkého množství druhů používaných termoplastických materiálů. Termoplasty jsou při normální teplotě pevné látky, přívodem tepla se z nich stávají tekutiny (obvykle při teplotách nad 200 °C). Také používání rozpouštědel není tak jednoduché, jako u termosetů. Po přidání rozpouštědla do termoplastické matrice pro snížení viskozity a následném odstranění rozpouštěcího přípravku termoplastům zůstává snížená odolnost proti korozi při napětí. [20]

Termoplastické matrice lze tvarovat a jsou zpracovatelné pouze po zahřátí nad teplotu roztavení a nedochází v nich k chemické reakci. [20]

Oba typy matric se zpracovávají při zvýšené teplotě, po procesu je tedy potřeba chlazení produktu. [20]

3.2.2 Výztuž

Dalším potřebným prvkem kompozitního materiálu, který zásadním způsobem ovlivňuje, jakých vlastností kompozit dosahuje, je nespojitá fáze neboli výztuž. Může být ve formě částic, krátkých a dlouhých vláken a whiskerů (velmi křehké, dlouhé bezporuchové vláknové krystaly malého průměru s vysokou pevností – až 1000 MPa). [19]

Dle struktury a geometrické charakteristiky dispergované fáze, lze kompozity rozdělit na vláknové kompozity, částicové kompozity (partikulární, granulární), s plynovými inkluzemi (pěnobeton, lehčené polymery), nebo s částicemi pravidelných tvarů (kuličky a destičky). Vlákná mohou být dlouhá (většinou uspořádaná, často skleněná, uhlíková nebo polymerní), nebo krátká (částečně nebo zcela neuspořádaná, převážně uhlíková, borová, wolframová či azbestová), oba případy mají specifické uplatnění. [16]

Skleněná vlákna

Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu vláknových kompozitů jsou textilní skleněná vlákna, a to díky jejich nízké ceně, vynikajícím elektroizolačním vlastnostem, nehořlavosti a lehké hmotnosti. Zároveň jsou izotropní, s materiálovými vlastnostmi v podélném i příčném směru totožnými. Mají podobný modul pružnosti v tahu jako hliník a ve srovnání s ocelí mají jednu třetinu hodnoty modulu pružnosti v tahu oceli. Vyrábí se tažením z trysek, celý proces začíná ve sklářské peci, kdy se při teplotě přibližně 1 400 °C taví křemičitý písek, vápenec, kaolin, dolomit, kyselina boritá a kazivec, kde vzniká E-sklovina. Ta se po několika dnech kanálky rozvádí do spřádacích trysek z platinové slitiny, zahřátých na určitou teplotu, aby z nich sklovina pomalu vytékala a tuhla do tvaru vláken. Tato vlákna mají průměr asi 2 mm, je potřeba je zkalibrovat na zvolený průměr pomocí rychle rotujícího navíjecího ústrojí, nejčastěji se kalibruje na průměr 10 nebo 14 μm. Tímto vzniká spřádací vlákno, ze kterého je potřeba spřádáním vyrobit přízi a ta je dále zpracovávána na tkaniny a pásy. [20]

Aramidová vlákna

Tato vlákna jsou na bázi lineárních organických polymerů, jejich výhoda je velmi vysoká pevnost a tuhost. Fenylová jádra a aramidové skupiny jsou navzájem spojeny vodíkovými můstky, jejich pravidelné uspořádání zajišťuje řetězcům jejich vysokou tuhost, teoretická odhadovaná pevnost těchto vláken je až 200 000 N/mm². [20]

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou ceněna pro svou extrémní pevnost a tuhost, jsou však málo tažná. Pro jejich výrobu se používají 3 výchozí materiály: celulóza, PAN - polyakrylonitril a smola. Tyto suroviny se nejprve karbonizují, při tomto procesu se odštěpí většina prvků, kromě uhlíku, zvyšováním teploty se zvyšuje i karbonizace (přeměna uhlíkatého materiálu na grafitovou strukturu) a tím i mechanické vlastnosti. [20]

Uhlíková vlákna mají více než 90ti procentní obsah uhlíku, méně než 7 % dusíku, pod 1 % kyslíku a 0,3 % vodíku, rozsah hodnot vyráběných průměrů bývá 5–10 μm . Jejich pevnost a modul pružnosti se mění v širokém rozsahu, v závislosti na stupni orientace uhlíkových vrstev a na počtu vadných míst, způsobených při výrobě. [20]

Používají se především na průmyslové aplikace (stavebnictví, větrné elektrárny, tlakové nádoby, automobilový a lodní průmysl), letectví a sportovní potřeby. Uhlíková vlákna se využívají především pro svůj vysoký poměr pevnosti k hmotnosti, možnosti vytvořit složitější a aerodynamičtější konstrukce, vzhled a tepelnou stabilitu. [20]

3.3 Dřevo-plastové kompozity (WPC)

Dřevo-plastové kompozity představují moderní materiál, který si získává oblibu a přitahuje stále větší pozornost díky svým speciálním vlastnostem a způsobu výroby z recyklovaných materiálů. Výztuží bývá obvykle dřevní vlákno nebo moučka, piliny a jiné celulózové zdroje, tyto materiály vznikají jako odpad během zpracovatelského procesu dřeva. Tato dřevěná plniva, jejichž využití je velmi ekologické, jsou vhodná pro konstrukční i nekonstrukční využití, mohou nahrazovat syntetická plniva, a tím snížit dopad na životní prostředí. Jako matrici pro výrobu WPC se používají termoplasty, nejčastěji polypropylen (PP), snadno získatelný těžením odpadů ze skládek. Čistý, nerecyklovaný polypropylen má vysokou chemickou stabilitu, dobré mechanické vlastnosti, houževnatost a tepelnou odolnost, recyklovaný PP si zachovává velmi podobné fyzikálně-chemické vlastnosti. Mezi další polymery pro matrici se často zařazují materiály jako polyethylentereftalát (PET), polyethylen (PE), kyselina polymlečná (PLA), polyvinylchlorid (PVC) a polyuretan (PU). [21]

WPC v dnešní době často nahrazují konvenční materiály díky svým superiorním vlastnostem, především nízké hustotě, nízkým nákladům na zpracování, nehořlavosti, mechanickým vlastnostem, obnovitelnosti a rozložitelnosti. [21]



Obrázek 10 WPC materiál

(zdroj: [22])

3.4 Výroba WPC

Výroba WPC spočívá v kombinaci dřevěných plniv, termoplastických polymerů a přísad pro zlepšení vlastností. Suroviny se míchají pomocí míchače, kde se směs homogenizuje, následně taví, tvaruje a ochlazuje za účelem vytvoření profilů a produktů. Tvarování probíhá nejčastěji vytlačováním, nebo lisováním. [22]

3.4.1 Proces výroby WPC

Proces výroby WPC začíná volbou správných surovin pro danou aplikaci a dle dostupných zdrojů. Suroviny je třeba správně zaskladnit a zacházet s nimi, aby nedošlo k jejich znečištění. Dřevěný prášek je třeba udržet při požadované vlhkosti, aby nedocházelo ke shlukování nebo špatné přilnavosti. Vlhkost je třeba pravidelně kontrolovat nejen během uskladnění ale i během procesu výroby. Stejně důležitý je i výběr správného typu plniva, které musí být kompatibilní s dřevěnou výztuží a poskytuje zásadní vlastnosti, jako přilnavost, pružnost a odolnost vůči environmentálním vlivům. [22]



Obrázek 11 Vytlačovací linka na výrobu WPC

(zdroj: [22])

3.5 Vlastnosti WPC

Z obecného hlediska jsou vlastnosti kompozitních materiálů výjimečné z důvodu jejich modifikovatelnosti. Pro každou aplikaci kompozitního materiálu je totiž možné navrhnout specifické složení pro dosažení požadovaných vlastností. WPC materiály nabízejí široké spektrum odolností a pevností, což umožňuje optimalizaci výrobních nákladů a efektivní využití materiálu dle konkrétních požadavků. [22]

U WPC kompozitů je důležité zdůraznit jejich rezistenci vůči vnějším vlivům, jako jsou vlhkost, ultrafialové záření nebo teplotní změny. Tato odolnost zajišťuje výrobkům z WPC dlouhotrvající kvalitu, životnost a mechanickou soudržnost. Zároveň nevyžadují speciální údržbové operace jako jsou nátěry či barvení, jsou totiž vysoce odolné vůči deformaci, praskání a blednutí i vůči hnilobě, rozkladu a termitům. [22]

3.5.1 Testování obrobiteľnosti WPC různými typy frézovacích operací

Testování obrobiteľnosti WPC materiálů pomocí různých typů frézování je důležitým krokem pro zjištění, jak se tento materiál chová při obrábění a jaké nástroje a parametry jsou nejvhodnější pro dosažení kvalitního výsledku. Obrobiteľnost WPC materiálů je ovlivněna řadou faktorů, mezi které patří složení materiálu, zvolená obráběcí operace, typ použitého nástroje, podmínky obrábění a nastavení řezných parametrů. Díky těmto testům obrobiteľnosti se získávají cenné informace, které slouží k rozvíjení teoretických i praktických znalostí a přispívají ke zlepšení procesů obrábění dřevoplastových kompozitů v průmyslových podmínkách. [23]

Jedním ze způsobů obrábění WPC materiálů je prosté obvodové frézováním, které je charakterizované pohybem frézy podél obvodu obrobku, přičemž řezný nástroj odstraňuje materiál pomocí rotačního pohybu. Studie Zhu et al. (2022) ukazuje, že optimální parametry pro obvodové frézování WPC zahrnují řeznou rychlost 9,0 m/s, posuv na zub 0,3 mm a hloubku řezu 1,5 mm. Tyto parametry vedou k minimálnímu opotřebení nástroje a vysoké kvalitě povrchu. V této studii je testováno obrábění WPC materiálů s různým složením pojiva, jmenovitě je zde použito WPC s obsahem polypropylenu, polyethylenu a polyvinylchloridu. Z testů vyplývá, že nejvyšší řezné síly a teploty při obrábění dosahuje WPC materiál složený z polypropylenu, který zároveň nejvíce opotřebovává nástroj. Dále jsou zde zkoumány druhy třísek, které jednotlivé materiály vytvářejí, u polypropylenového i polyethylenového kompozitu vznikají vločkové třísky, vytváření vločkových třísek výrazně opotřebovává řezné břity a způsobuje sníženou stabilitu a kvalitu řezu nástroje. PVC kompozit produkuje jehličkové třísky díky jeho nižší houževnatosti, která zapříčiňuje rychlé porušení povrchu během frézování. Volbou této obráběcí operace lze dosáhnout vysoké kvality povrchu, ale vyžaduje pečlivé nastavení parametrů, aby se minimalizovalo opotřebení nástroje a tepelné zatížení materiálu. [23]

Čelní frézování je další metoda obrábění pro WPC materiály, která byla podrobena testům obrobitelnosti. Materiál je zde odebírán z čela obrobku rotující frézou, která je schopna odstranit velké objemy materiálu na jeden záběr, což značně zkracuje dobu obrábění. Předmětem studie Zhu et al. (2024) je optimalizovat proces obrábění WPC materiálů pomocí čelního frézování, s ohledem na řezné síly a kvalitu obrobeného povrchu. Analyzují se zde vlivy tří hlavních parametrů: hloubka řezu, rychlost vřetene a úhel nastavení. S rostoucí hloubkou řezu se zvyšuje výsledná řezná síla, protože se odstraňuje více materiálu, což zvyšuje řezný odpor. Při zvyšujících se otáčkách vřetene výsledná síla nejprve klesá (kvůli menšímu úběru materiálu na otáčku), ale poté roste (kvůli zvýšené teplotě řezu a tvorbě nahromaděné hrany na nástroji, což zvyšuje řezný odpor). Větší úhel nastavení snižuje výslednou sílu, protože ostřejší nástroj snadněji vniká do materiálu a snižuje řezný odpor. Na základě tohoto testování byly stanoveny ideální parametry: hloubka řezu 0,50 mm, rychlost vřetene 7841 1/min a úhel čela nástroje 15°. Tyto podmínky vedou k nejnižším hodnotám výsledné síly a drsnosti povrchu, což je klíčové pro zlepšení výkonu a kvality obrábění WPC v průmyslových aplikacích. [24]

Další zkoumanou metodou pro obrábění WPC materiálů je šroubovicové (helikální) frézování. Šroubovicové frézování je pokročilý proces vytváření otvorů, při kterém nástroj

opisuje šroubovitou dráhu a zároveň se otáčí kolem své osy, což umožňuje přesné a kvalitní obrábění s nižšími řeznými silami a lepší úpravou povrchu ve srovnání s běžným vrtáním [25]. Studie Wu et al. (2022) identifikovala optimální parametry pro šroubovicové frézování WPC: otáčky vřetena 6254 1/min, posuv 5 m/min, hloubka řezu 0,5 mm a úhel šroubovice 54°. Tyto parametry vedou k minimálním řezným silám a vynikající kvalitě povrchu. Zjistilo se, že řezné síly rostou s rostoucími otáčkami vřetene, hloubkou řezu a úhlem šroubovice, největší vliv na řezné síly měla hloubka řezu. Řezné síly ve směrech os X, Y, Z byly změřeny na Kistler 9257B dynamometru, avšak při zkoumání řezných sil nelze pouze pomocí F_x a F_y odhalit vliv řezných faktorů na řezný proces, proto se zavádí síly F_t jako složka řezné síly kolmá na směr poloměru frézy, F_r jako složka řezné síly rovnoběžná se směrem poloměru a θ , což je úhel mezi směrem otáčení a směrem posuvu. Experiment ukazuje korelaci mezi řeznou silou a otáčkami vřetena, s rostoucí rychlostí vřetena, F_t a F_r ukazují rostoucí trend, pro F_r je růst výraznější. Důvod toho je, že s rostoucími otáčkami vřetena měl moment setrvačnosti významný vliv na řeznou sílu. Kvalita obrobeného povrchu se zlepšovala zvolením vyšších otáček vřetene a zhoršovala s rostoucím úhlem šroubovice a hloubkou řezu. Tato metoda způsobuje vůči obvodovému frézování menší opotřebení nástroje díky plynulejšímu řeznému procesu a zároveň generuje nižší řezné síly i teploty. [26]

4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

V teoretické části této bakalářské práce je shrnuta obecná problematika technologie obráběcích procesů se zaměřením na frézování, složení a vlastnosti kompozitních materiálů a frézování kompozitních materiálů s podílem dřevěných složek. Je zde popsána jejich výroba a možné způsoby pro jejich obrábění, zároveň je zde shrnuto několik zahraničních článků o provedených experimentech s různými typy frézování a interpretace jejich výsledku, tyto články pomohly formovat experimentální část této závěrečné práce a snad i tento výzkum přinese platné, správné a obohacující výsledky v této oblasti.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL PRÁCE

Primárním cílem praktické části bakalářské práce bylo experimentálně vyhodnotit vliv různých typů fréz na obrobitelnost kompozitního materiálu při frézování na CNC stroji při zachování stejných řezných podmínek.

V rámci této studie bylo možné využít školní dílnu v prostorách Fakulty aplikované informatiky ve Zlíně, vybavené moderním CNC frézovacím centrem, pásovou pilou a přednastavovacím zařízením pro měření opotřebení nástrojů.

Analyzované byly tyto parametry: výsledná drsnost povrchu zkušebního vzorku, mikrostruktura jeho povrchu, opotřebení břitů nástroje po určitém počtu řezů stejným nástrojem a v neposlední řadě také morfologie třísek, vzniklých při obrábění.

Výstupy této práce mohou sloužit jako podklad pro optimalizaci výběru nástrojů při obrábění heterogenních kompozitních materiálů. Experimentální výsledky prokázaly, že fréza, povlakovaná diamantem, vykazovala výrazně menší opotřebení s vyšší životností ve porovnání s nepovlakovaným nástrojem, což značilo nižší náklady na nástroje v dlouhodobém horizontu i přes vyšší pořizovací cenu nástroje z důvodu redukce nákladů na častou výměnu nástrojů, která by se promítla i do produktivity z důvodu častého přerušení procesu obrábění na již zmiňovanou výměnu nástroje. Dále se zjistilo, že fréza s diamantovým povlakem byla schopna konzistentně vytvářet kvalitní povrch i přes abrazivost materiálu, jenž byla způsobena nestejnými velikostmi částic výztuže v matrici, která urychlovala opotřebení nástroje. V konečném důsledku by tedy bylo pro firmy výhodnější investovat do dražších povlakovaných nástrojů, nejen z ekonomického hlediska, ale i pro poskytnutí kvalitního a konzistentního konečného výrobku pro zákazníka.

6 TEORETICKÝ PODKLAD EXPERIMENTU

Hlavní myšlenkou testování bylo zjistit, jakým způsobem abrazivní WPC materiál interaguje s řezným nástrojem a kolik řezů je třeba na zřetelné opotřebení břitů frézy. Toto opotřebení se projeví na úbytku materiálu řezné hrany a tím se změní drsnost povrchu na obrobene hraně.

6.1 Generace G-kódu

Pro frézování na CNC obráběcím centru bylo třeba vytvořit 3D model v programu SIEMENS NX 2406, zvolit vhodnou frézovací operaci, sestavit parametry obrábění a vygenerovat G-kód, který je esenciální pro transportaci dat ze softwaru do obráběcího stroje.

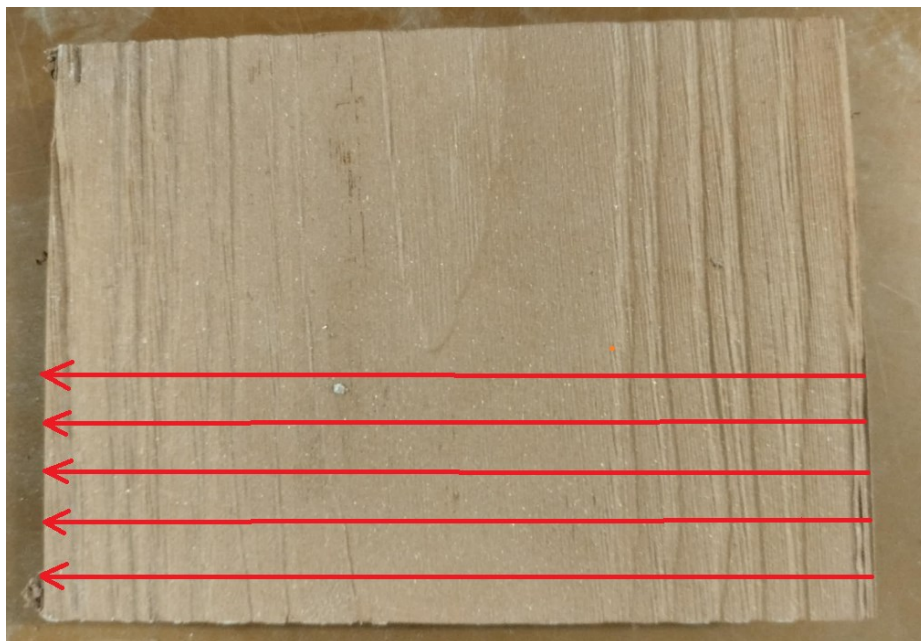
Po úspěšném převedení G-kódu do obráběcího centra byly již dříve připravené testované vzorky WPC materiálu postupně upnuty do pracovního prostoru stroje a proběhly frézovací cykly, přičemž po každé frézovací operaci proběhlo měření opotřebení nástroje a výsledné drsnosti povrchu finální vrstvy.

6.2 Frézovací operace

Zvolená frézovací operace byla funkce Cavity mill (frézování dutin) s využitím řezné strategie ZIG-Linear (jednosměrné frézování) s těmito parametry:

- Řezná rychlost – $v_c = 150 \text{ m/min}$
- Otáčky vřetene – $n = 5968 \text{ min}^{-1}$
- Posuvová rychlost – $v_f = 596,8 \text{ mm/min}$
- Posuv na zub – $f_z = 0,05 \text{ mm}$

Na každém obrobku bylo provedeno 100 řezů o délce 140 mm, přičemž šířka jednoho řezu byla 0,5 mm. Celkem bylo provedeno 600 řezů nástrojem bez povlaku a 400 řezu frézou s diamantovým povlakem, z důvodu velmi malé změny drsnosti povrchu obrobku obráběním nástrojem s diamantovým povlakem.



Obrázek 12 Grafické znázornění dráhy řezného nástroje – metoda Zig

(zdroj: [vlastní])

6.3 Měření opotřebení nástroje

Po zhotovení 100 řezů na každém zkušebním vzorku bylo třeba nástroj vyjmout ze zásobníku nástrojů, očistit natlakovaným vzduchem a adhezivní hmotou a poté vložit do nastavovacího zařízení MICROVISION UNO 20 / 40 pro změření průměru nástroje. Měření probíhalo rotací nástroje o 360° , přičemž snímač zařízení zaznamenal maximální detekovanou odchylku od nominálního průměru.

7 METODIKA, MATERIÁLY A TECHNOLOGICKÉ VYBAVENÍ EXPERIMENTU

7.1 Hypotézy a výzkumné otázky

Pro tento výzkum byly formulovány tyto hypotézy:

H1: Kvalita povrchu

Povlakovaný nástroj vytvoří povrch s $\sigma \geq 10\%$ nižší průměrnou hodnotou R_a než nástroj bez povlaku.

Metoda ověření: Měření drsnosti povrchu R_a na obrobku po každých 100 řezech pomocí drsnoměru.

H2: Životnost nástrojů

Diamantový povlak frézy sníží opotřebení břitu o $\geq 20\%$ oproti nepovlakovanému nástroji při zachování identických řezných podmínek.

Metoda ověření: Měření nástrojů po každých 100 řezech pomocí nastavovacího zařízení Haimer UNO 20/40 (Microvision).

Specifikované výzkumné otázky:

VO1: Jaký druh třísek vytváří nástroje ze slinutých karbidů s povlakem a bez povlaku?

VO2: Jak se změní tvar břitu nástroje během opotřebování?

VO3: Jsou na obrobeném povrchu patrné stopy po zubech frézy?

7.2 Specifikace testovaného WPC materiálu

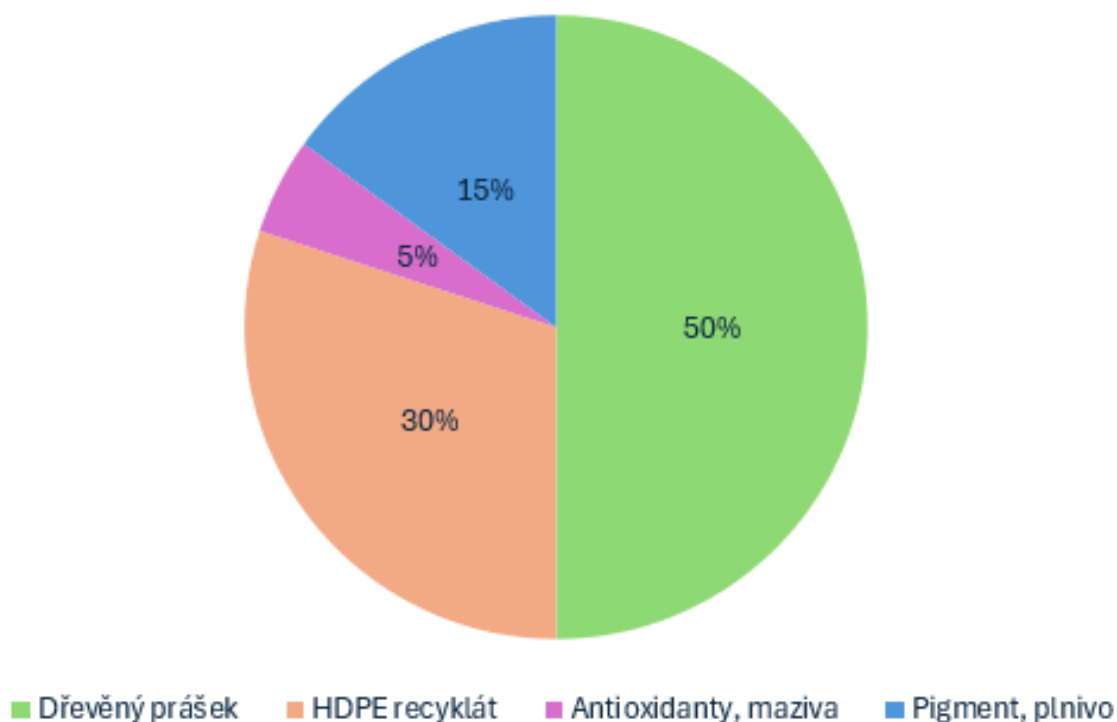
Testovaný materiál Lambowood (výrobce: Zhejiang Kejie New Material Co., LTD) je plný podlahový profil o rozměrech 140 mm × 20 mm × 2 900 mm, vyrobený vytlačováním. Pro lepší manipulaci v CNC obráběcím centru byl následně rozřezán pásovou pilou PPK–175 T (PROMA) na kratší segmenty o délce 100 mm při zachování šířky a výšky (140 mm × 20 mm). [27]



Obrázek 13 WPC Lambowood, Brownish red

(zdroj: [vlastní])

Jeho složení je popsáno na Obrázku 19, výztuž se skládá z dřevěné moučky a jako matrice je zde použitý recyklovaný vysokohustotní polyethylen. Dalšími přísadami jsou zde antioxidanty, maziva, výplně a barviva. Kvalita toho výrobku odpovídá normě ČSN EN 15534-1+A1 (649330) Kompozity na bázi dřeva a termoplastů (obvykle nazývané kompozity plast-dřevo (WPC) nebo kompozity s přírodními vlákny (NFC)) - Část 1: Zkušební metody pro charakterizaci směsí a výrobků. [27] [28]



Obrázek 14 Složení WPC profilů Lambowood

(zdroj:[27])

7.3 Technologická zařízení využitá v experimentu

Pro experiment bylo využito 5 přístrojů a strojů a dva nástroje. Pro přípravu zkušebních vzorků byla klíčovým strojem pásová pila, hlavním pracovištěm pak byla CNC frézka, na které byl prováděn samotný experiment. Dále bylo využito nastavovacího přístroje pro měření opotřebení nástroje, drsnoměru pro změření jakosti obrobeného povrchu a digitálního USB mikroskopu pro zachycení snímků opotřeбенé hrany nástroje a obrobeného povrchu ve vysokém rozlišení. Jako frézovací nástroje byly vybrány dvě rohové frézy s tlačným řezem ze slinutých karbidů.

7.3.1 Pásová pila PPK–175 T (PROMA)

Prvním využitým zařízením byla pásová pila PPK–175 T (PROMA), která měla za úkol rozdělit koupený materiál na kusy, aby jej bylo možné upnout do upínacího zařízení obráběcího stroje.

Parametry:

- Příkon: 750 W
- Napětí: 400 V
- Hmotnost pásové pily: 168 kg
- Rozměry pilového pásu: 2360 x 20 x 0,9 mm
- Řezná rychlost: 34/41/59/98 m/min



Obrázek 15 Pásová pila PPK - 175 T (PROMA)

(zdroj: [vlastní])

7.3.2 CNC frézka DMG MORI – DMU 50

Realizace testů obrobitelnosti WPC materiálů probíhala na CNC frézce s naklápěcím rotačním stolem DMG MORI – DMU 50. Tento stroj je určen pro pětiosé simultánní obrábění s vysokou přesností, disponuje automatizovaným zásobníkem pro až 30 nástrojů a systémem přímého měření dráhy ve všech osách. Taktéž je vybaven pokročilými řídicími systémy a softwary od firem Siemens a Celos. [29]

Parametry:

- Maximální pojezd v ose X: 650 mm
- Maximální pojezd v ose Y: 520 mm
- Maximální pojezd v ose Z: 475 mm
- Maximální zatížení stolu: 300 kg
- Otáčky: 15 000 1/min



Obrázek 16 CNC frézka DMG MORI - DMU 50

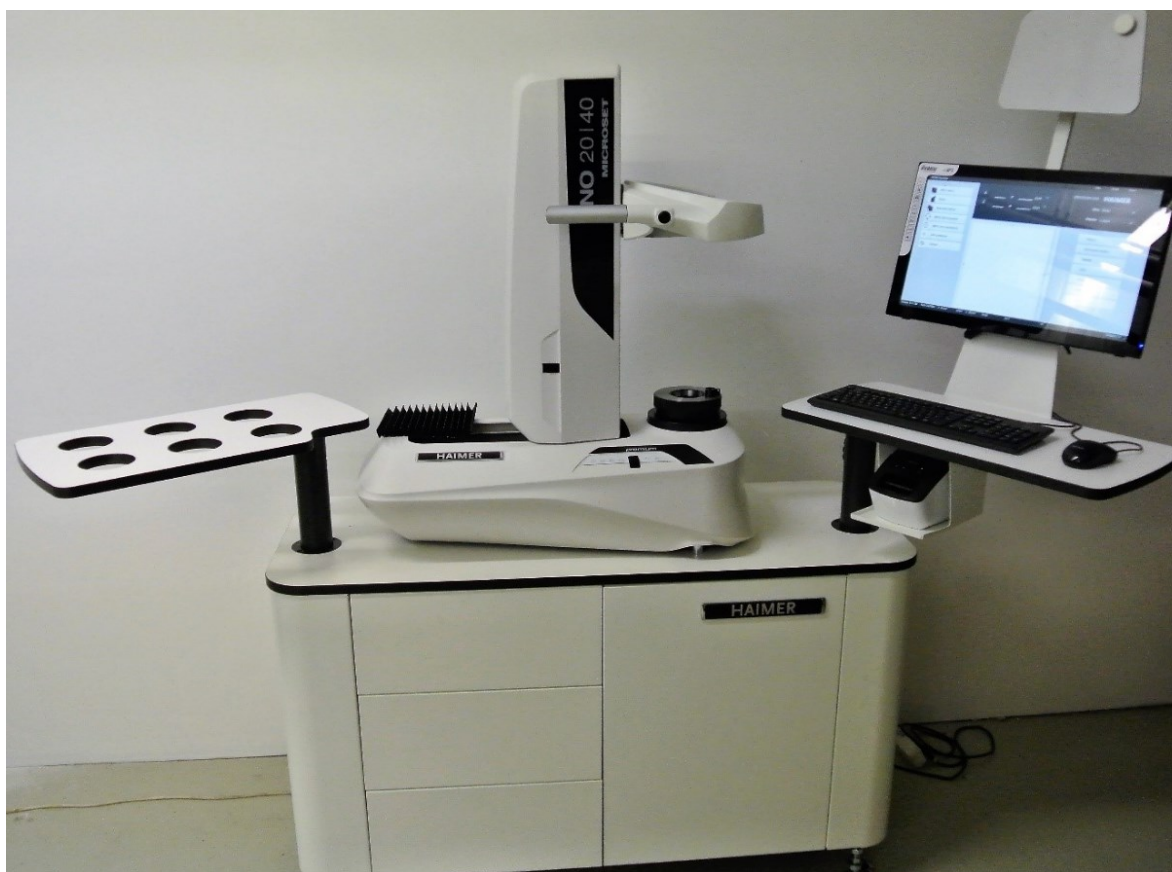
(zdroj: [29])

7.3.3 Přednastavovací přístroj Haimer UNO 20/40 (Microvision)

Tento přístroj slouží k měření a nastavování nástrojů pro frézování, vrtání a soustružení. V tomto experimentu byl využit pro změření posunutí řezné hrany ve směru X po každém frézovacím cyklu, z čehož bylo možné vyvodit opotřebení nástroje. [30]

Parametry:

- Měřicí rozsah: 400 mm
- Přesnost opakování: $\pm 2 \mu\text{m}$
- Přesnost zobrazení: $5 \mu\text{m}$
- Maximální hmotnost nástroje: 30 kg



Obrázek 17 Přednastavovací přístroj Haimer UNO 20/40 (Microvision)

(zdroj: [30])

7.3.4 Drsnoměr SJ 410 (MITUTOYO)

Pro měření drsnosti povrchu obrobeného zkušebního vzorku byl použit drsnoměr SJ-410 s pokročilými měřicími funkcemi. Využívá systém měření bez kluzné patky, disponuje dotykovým ovládáním a vestavěnou tiskárnou. Je vhodný pro měření skutečného profilu (P), profilu drsnosti (R) či profilu vlnitosti (W). [31]

Parametry:

- Rozsah posuvu: 25 mm
- Rychlost měření: 0,05/0,1/0,2/0,5/1 mm/s
- Poloměr snímacího hrotu: 2 μm
- Hmotnost: 2,8 kg
- Rozsah měření: 800 μm ; 80 μm ; 8 μm (2,4 mm s volitelnými doteky)



Obrázek 18 Drsnoměr SJ 410 (MITUTOYO)

(zdroj: [31])

7.3.5 Mikroskop ProScope HR CSI (Bodelin)

Tento mikroskop je součástí laboratorní sady, vhodné pro profesionální a výzkumné účely, především v oblasti forenzních věd. Obsahuje 4 výměnné objektivy se zvětšením až 400x, speciální polarizační objektiv pro tvoření snímků s minimálním oslněním a integrovaný LED osvětlovací systém. Lze použít jako ruční zařízení, zároveň sada obsahuje stativ pro stacionární použití. Jeho kompatibilita s Windows a Mac OS umožňuje nahrávání snímků přímo do počítače pro snadnou dokumentaci a analýzu vzorků. V experimentu byl využit pro pořizování snímků opotřebovaných zubů fréz a pro analýzu mikrostruktury obrobeného povrchu. [32]

Parametry:

- Senzor: 1.3 MP, 1/4“ Aptina Color CMOS
- Objektivy: 0 - 10x, 30x, 100x, 400x
- Osvětlení: LED kroužky na každém objektivu



Obrázek 19 Pokročilá laboratorní sada ProScope HR CSI (Bodelin)

(zdroj: [33])

7.3.6 Frézovací nástroje

Použity byly dvě frézy ze slinutého karbidu, přičemž jedna měla povlakovaný povrch z diamantu a druhá byla bez povlaku. Fréza bez povlaku (Obrázek 20 – nahoře) byla podle technického listu vyvinuta pro optimální obrábění kompozitních materiálů, fréza s diamantovým povlakem se specializovala na obrábění grafitu a honeycomb sendvič kompozitů. Výběr nástrojů proběhl s ohledem na tloušťku obráběného materiálu, bylo třeba vybrat takové nástroje, aby celá délka břitu byla schopna frézovat celou tloušťku materiálu na jeden řez. Byly vybrány dva levotočivé nástroje o osmi zubech, s tlačným řezem a průměrem břitu 8 mm.

Tabulka 2 Tabulka parametrů řezných nástrojů

Nástroj	Průměr řezné části (mm)	Počet břitů (-)	Délka (mm)	Délka břitu (mm)	Cena (CZK+DPH)
Fréza bez povlaku	8	8	70	22	2 199,-
Fréza s diamantovým povlakem	8	8	75	32	3 975,-

Důležitým faktorem pro obrábění pro komerční účely by byla i cena nástrojů, která by se propsala do nákladů firmy, fréza bez povlaku byla pořízena za cenu 2199 CZK s DPH, fréza s diamantovým povlakem byla koupena se slevou za 3 975 CZK s DPH, bez slevy by bylo možné nástroj objednat za 6 207 CZK s DPH. [34][35]

Fréza bez povlaku



Fréza s diamantovým povlakem



Obrázek 20 Frézovací nástroje ze slinutých karbidů

(zdroj: [vlastní])

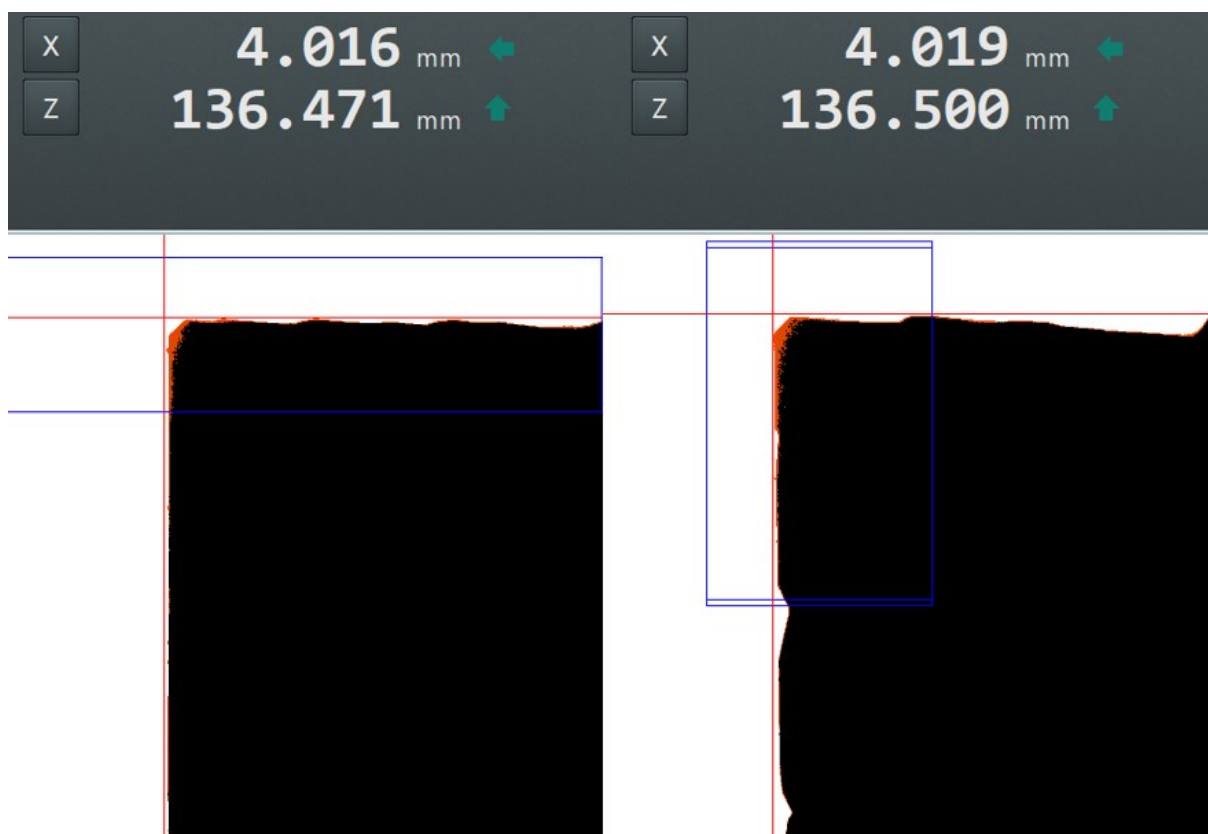
7.4 Experimentální postup

Testování obrobiteľnosti WPC materiálu, získaného od společnosti WPC Centrum, bylo provedeno na pětiosém CNC frézovacím centru DMU 50 (DMG MORI). Pro srovnávací analýzu byly zvoleny dva slinutokarbidové frézovací nástroje (dodavatel: Garant) – jeden opatřený diamantovým povlakem a druhý bez povlaku. Oba nástroje měly identický průměr, shodný počet zubů a podle specifikace byly určeny pro obrábění tenkých materiálů.

Pro typ nástroje bez povlaku bylo provedeno 6 sérií po 100 řezech na WPC materiálu, nástroj s diamantovým povlakem absolvoval 4 série po 100 řezech, přičemž po prvních 100 řezech novým nástrojem byl vždy odebrán vzorek třísek pro analýzu jejich morfologie. Po každé sérii následovalo vyjmutí nástroje i obrobku za účelem měření opotřebení nástroje, drsnosti obrobeného povrchu Ra a pořízení mikroskopických snímků.

Měření opotřebení nástroje probíhalo na přednastavovací přístroji Haimer UNO 20/40 (Microvision) pomocí funkce sigma, která snímala maximální hodnoty X a Z v milimetrech, bylo potřeba nástrojem otáčet, aby sonda kumulativně nasnímala tyto maximální hodnoty

a tím vytvořila snímek, který vykazuje nejvyšší body na těle nástroje. Tyto nejvyšší body jsou poté ukazateli opotřebení nástroje, protože v důsledku opotřebení nástroje se tyto body posunují směrem ke středu nástroje z důvodu ztráty materiálu nástroje. Tyto hodnoty byly po každé frézovací sérii zaznamenány do protokolu. Na Obrázku 21 lze vidět snímek frézy s diamantovým povlakem, pořízený v aplikaci HAIMER Microvision.



Obrázek 21 Snímek nástroje s diamantovým povlakem před (vlevo) a po (vpravo) sérii frézování v aplikaci HAIMER Microvision

(zdroj: [vlastní])

Drsnost obrobené plochy se prováděla s pomocí drsnoměru SJ 410 (MITUTOYO), kde bylo provedeno 25 měření na různých místech obrobené plochy.

Výsledná struktura povrchu obrobené plochy a břitů nástroje byla dokumentována pomocí mikroskopu ProScope HR CSI (Bodelin), kde bylo použito zvětšení 100x, bylo využito stativu pro přesné a kolmé snímání obrazu.

8 VÝSLEDKY

Experimentální data prokázala významný vliv diamantového povlaku na kvalitu obrábění WPC materiálu. V následující části jsou prezentovány výsledky měření drsnosti povrchu, opotřebení nástrojů, data související s hypotézami H1 a H2 a odpovědi na výzkumné otázky VO1-VO3.

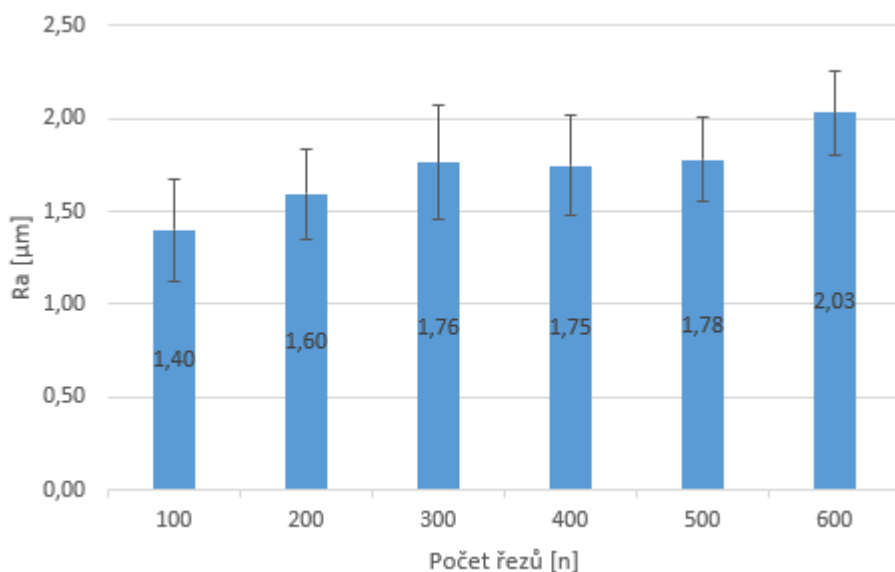
8.1 Drsnost povrchu

Klíčové zjištění: Změřená drsnost u nástroje s diamantovým povlakem ($1,00 \pm 0,16 \mu\text{m}$, $n = 4$) vykazuje výrazně nižší variabilitu než u nástroje bez povlaku ($1,72 \pm 0,26$, $n = 6$), což potvrzuje vyšší stabilitu obrábění.

Zároveň byla potvrzena hypotéza H1, drsnost povrchu vytvořená nástrojem s diamantovým povlakem skutečně vytváří povrch s nižší průměrnou hodnotou Ra nejen o požadovaných 10 %, ale o 42 %, což výrazně překračuje původní očekávání.

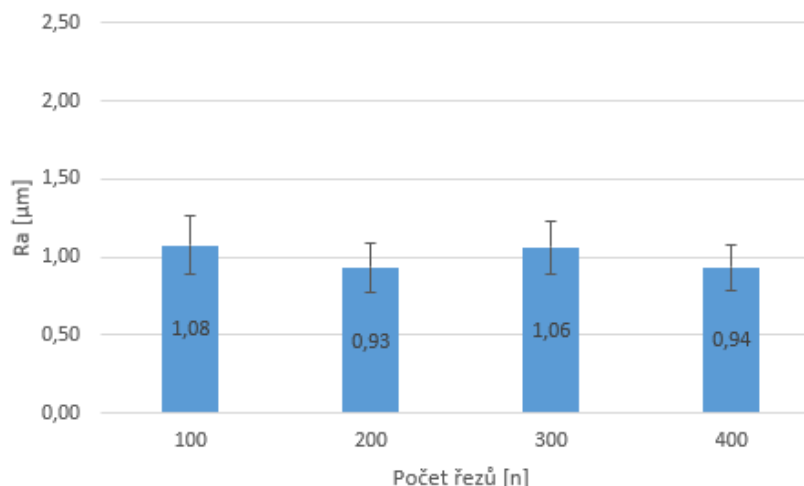
Tabulka 3 Srovnání drsnosti povrchu Ra pro oba typy nástrojů

Parametr	Diamantový nástroj (n=4)	Nástroj bez povlaku (n=6)
Průměrná Ra [μm]	$1,00 \pm 0,16$	$1,72 \pm 0,26$
Minimální Ra [μm]	0,93	1,40
Maximální Ra [μm]	1,08	2,03



Obrázek 22 Závislost Ra na počtu řezů - nástroj bez povlaku

(zdroj: [vlastní])



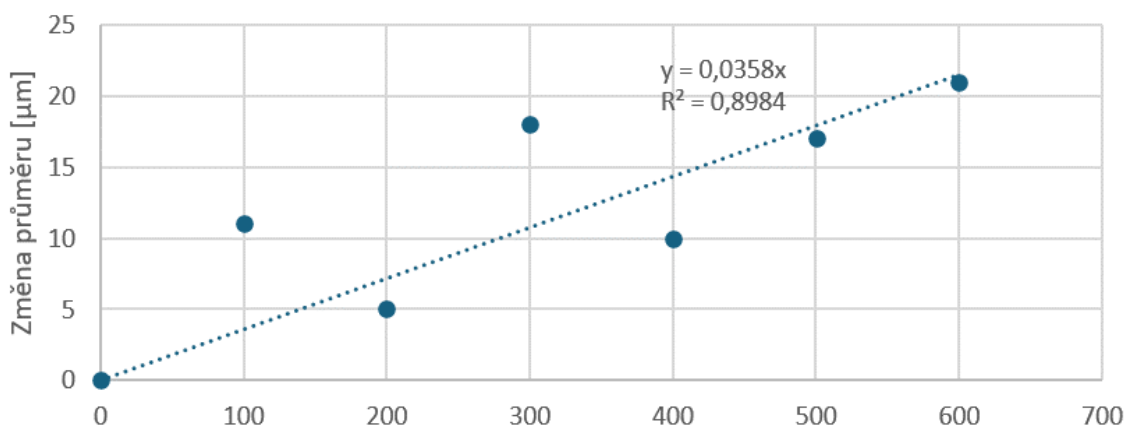
Obrázek 23 Závislost Ra na počtu řezů – nástroj s dia povlakem

(zdroj: [vlastní])

8.2 Opotřebení nástrojů

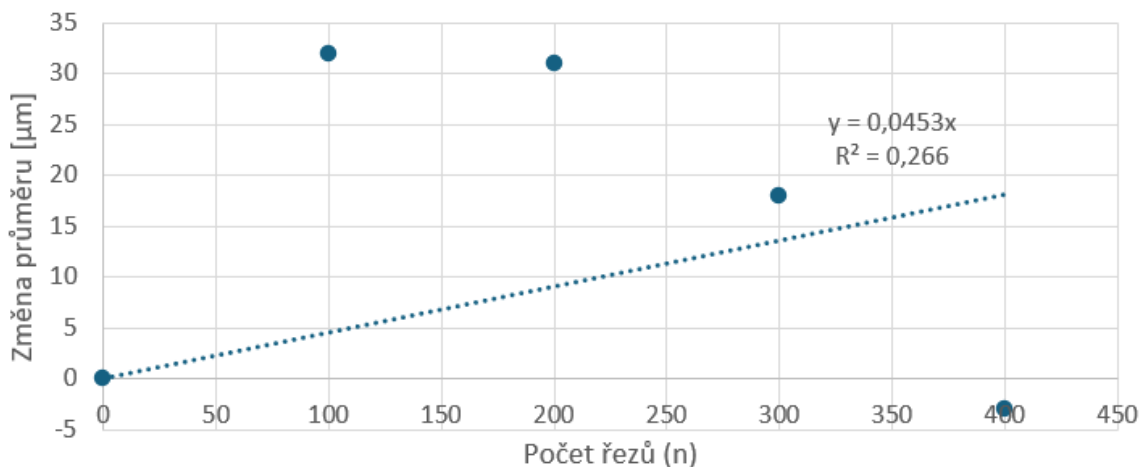
Klíčové zjištění: Fréza bez povlaku vykazuje lineární nárůst opotřebení s vysokou mírou korelace, což značí rovnoměrné a předvídatelné opotřebení, zatímco fréza s diamantovým povlakem vykazuje nepravidelný trend s velmi slabou korelací.

Hypotéza H2 předpokládala, že diamantový povlak při zachování stejných řezných podmínek sníží opotřebení nástroje o nejméně 20 %, což se experimentálně podařilo vyvrátit, na rozdíl od očekávání se zvýšilo opotřebení nástroje s diamantovým povlakem o 26,5 %, hypotéza H2 tedy nebyla potvrzena.



Obrázek 24 Změna průměru frézy bez povlaku

(zdroj: [vlastní])



Obrázek 25 Změna průměru frézy s diamantovým povlakem

(zdroj: [vlastní])

Kvůli velmi náhodnému rozdělení naměřených hodnot v grafu na Obrázku 25, lze jen obtížně predikovat stabilitu obrábění frézou s diamantovým povlakem. Hodnota $R^2 = 0,266$ naznačuje slabý lineární vztah mezi proměnnými a tento model není vhodný pro vysvětlení dat, nelze tedy hovořit o korelaci mezi počtem řezů a opotřebením nástroje s diamantovým povlakem, což i vyplývá z hodnot drsnosti po každých 100 řezech, přestože jsou tyto hodnoty velmi nízké v porovnání s nástrojem bez povlaku, nevykazují přímý lineární růst.

8.3 VO1 – Druh třísek

Během experimentu byly odebrány vzorky třísek pro oba typy nástrojů po jejich první obráběcí sérii. Oba nástroje vytvářely vločkové třísky a lze konstatovat, že třísky vytvořené frézou bez povlaku (Obrázek 26) měly tendenci být větší než třísky vytvořené frézou s diamantovým povlakem (Obrázek 27).



Obrázek 26 Třísky po obrábění nástrojem bez povlaku

(zdroj: [vlastní])



Obrázek 27 Třísky po obrábění nástrojem s diamantovým povlakem

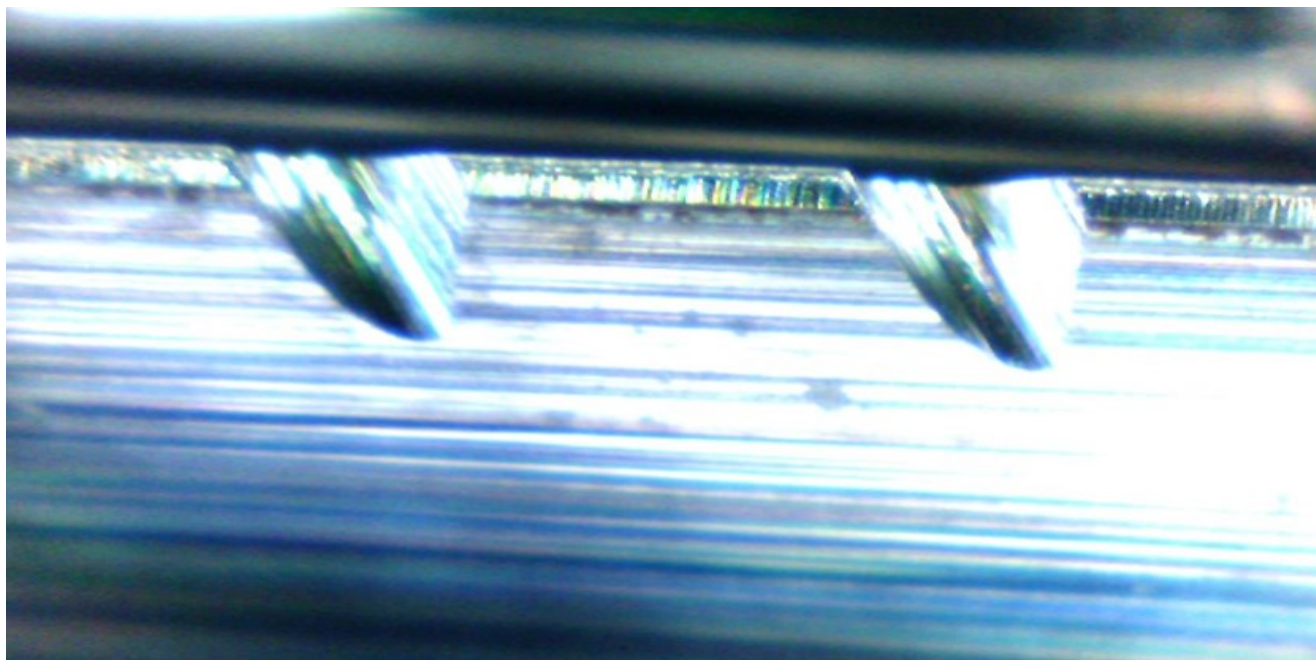
(zdroj: [vlastní])

8.4 VO2 – Změna tvaru břitu nástroje během opotřebování

Snímky pořízené pomocí mikroskopu ProScope HR CSI (Bodelin) srovnávají nástroj před podstoupením experimentu a po poslední sérii obrábění.

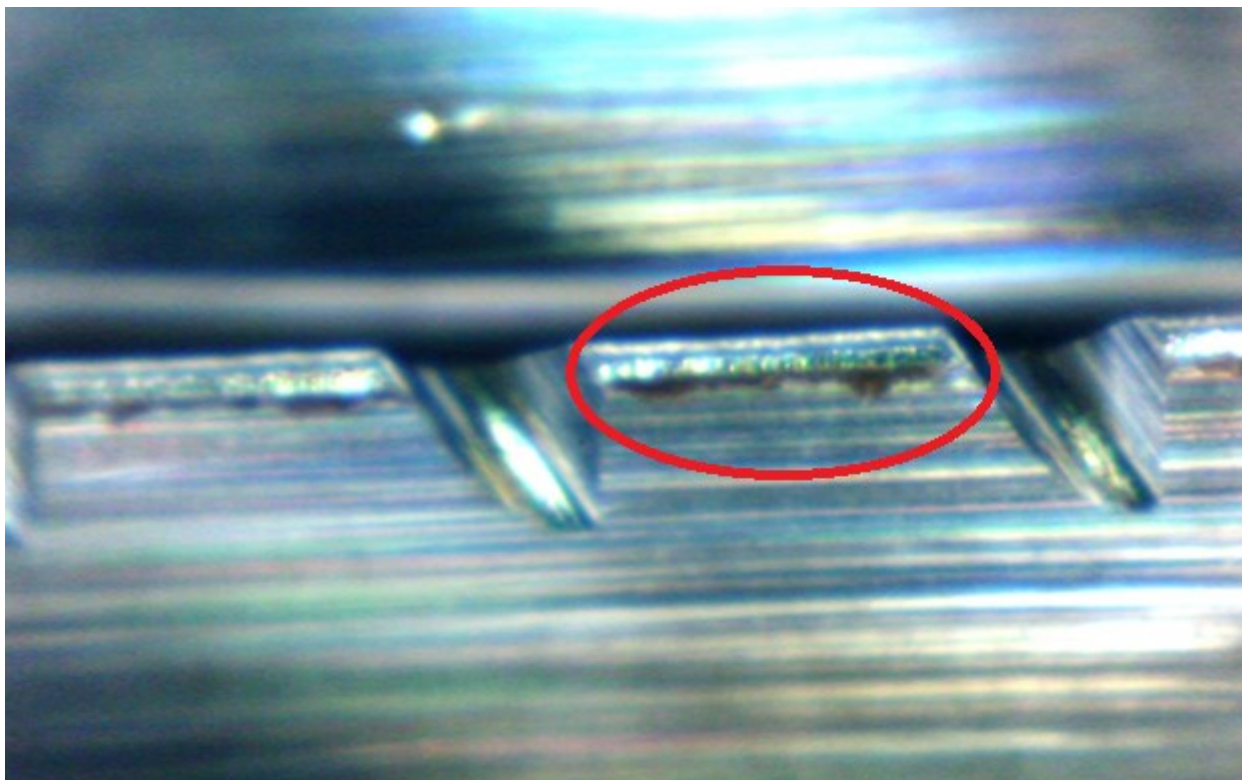
8.4.1 Analýza nástroje bez povlaku

Na Obrázku 28 lze vidět břit nástroje bez povlaku bez jakéhokoliv opotřebení, po srovnání s Obrázkem 29 lze vidět nejspíše vznik hřebenových trhlinek na břitu nástroje, což je formou únavového opotřebení, které je pravděpodobně způsobeno tepelným šokem, nebo spáleninami z dřevěných fragmentů, obsažených v obráběném materiálu. Tato degradace řezné hrany se následně projevila na drsnosti povrchu Ra, kde je zřejmý jasný pokles výsledné kvality povrchu.



Obrázek 28 Břit nástroje bez povlaku před frézováním – 100x zvětšení

(zdroj: [vlastní])

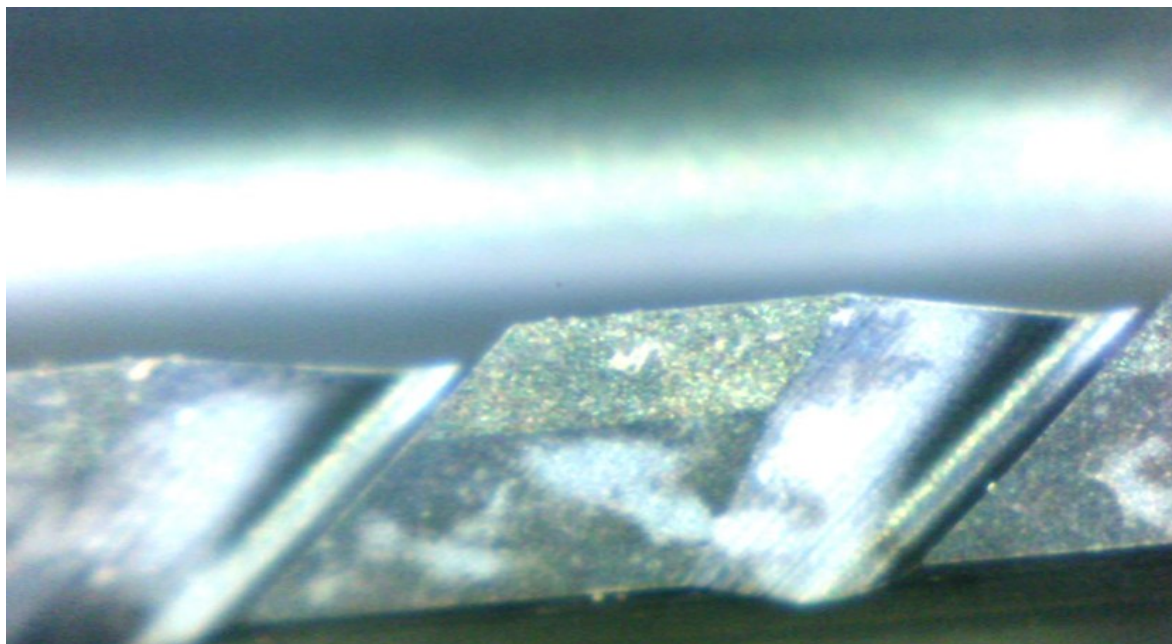


Obrázek 29 Břit nástroje bez povlaku po 600ti řezech - 100x zvětšení

(zdroj: [vlastní])

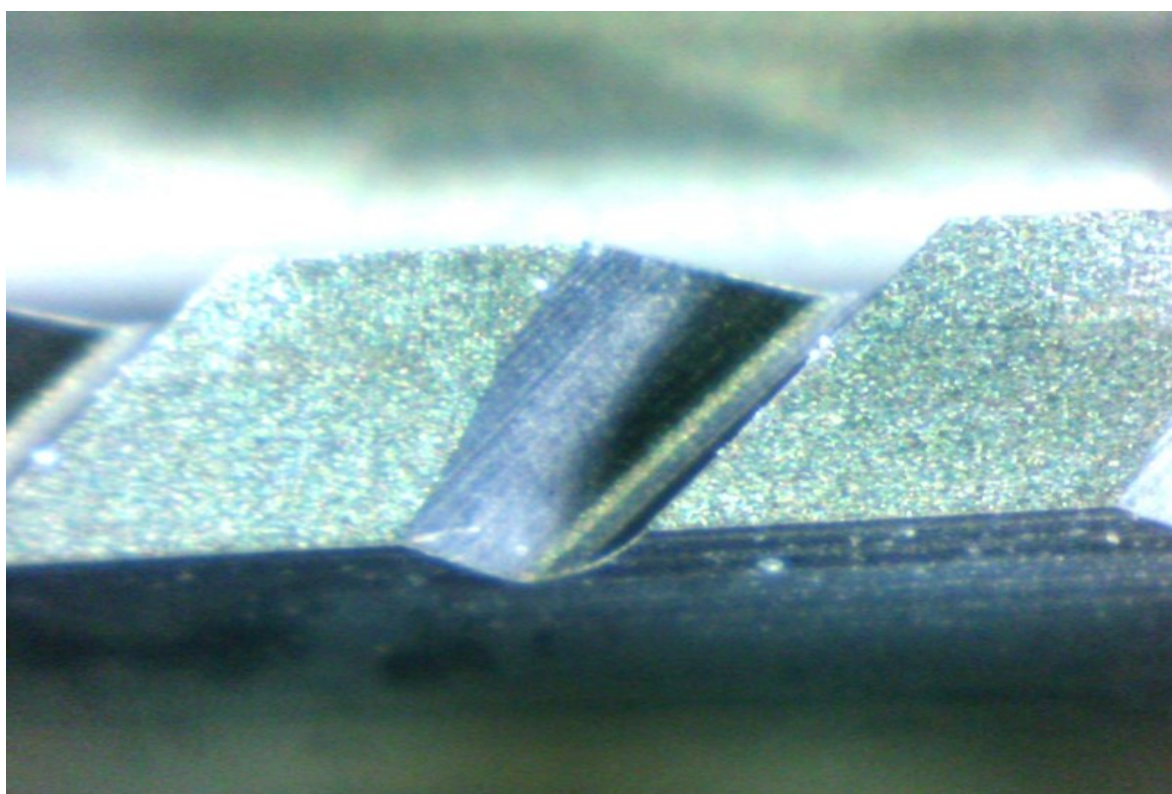
8.4.2 Analýza nástroje s diamantovým povlakem

Břit diamantového nástroje před procesem frézování je na Obrázku 30, ve srovnání s Obrázkem 31 po proběhnutí 400 řezů lze pozorovat řeznou hranu bez jakýkoliv přídavných jevů. Diamantový povlak nejeví žádné zřetelné známky opotřebení či vylamování na analyzovaném segmentu nástroje.



Obrázek 30 Břit nástroje s diamantovým povlakem před frézováním - 100x zvětšení

(zdroj: [vlastní])



Obrázek 31 Břit nástroje s diamantovým povlakem po 400 řezech - 100x zvětšení

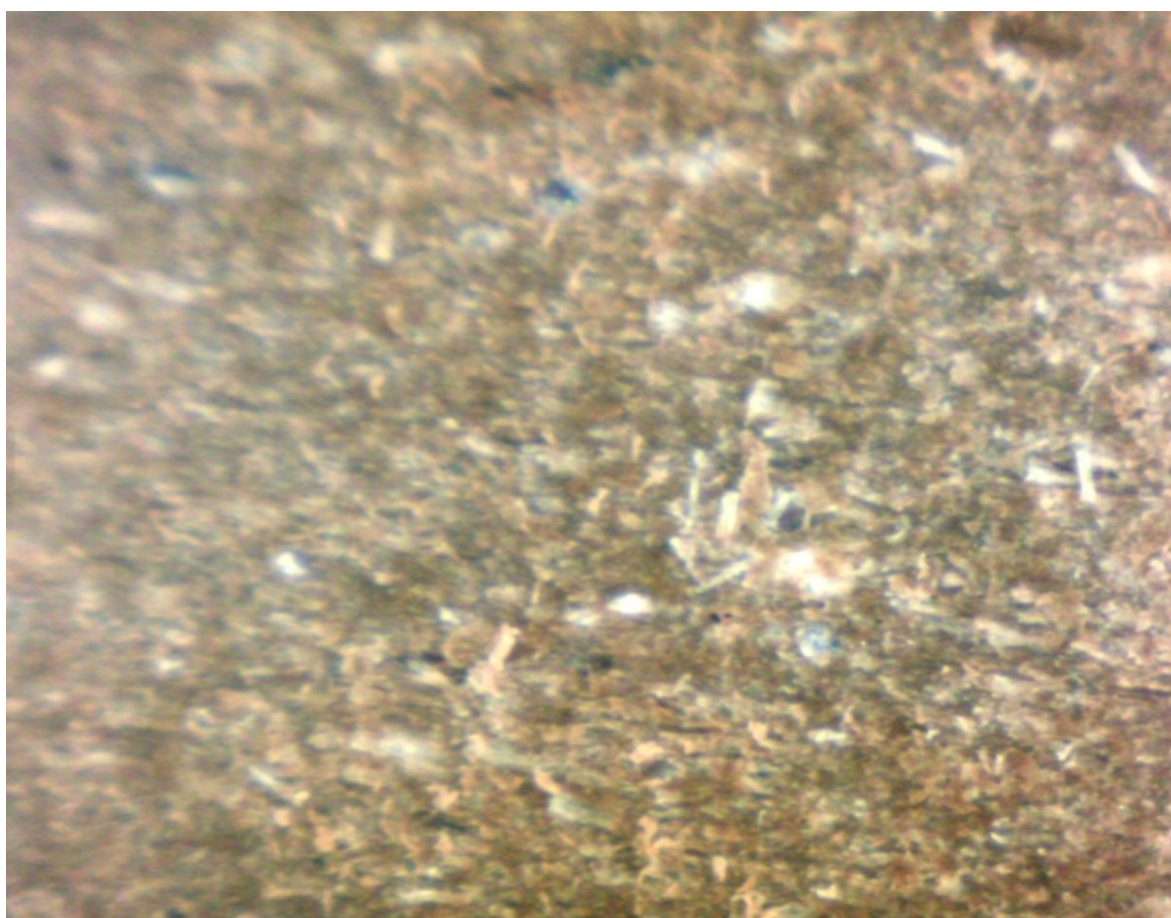
(zdroj: [vlastní])

8.5 VO3 – Stopy frézovacích nástrojů na povrchu obrobku

Pořízením snímků po provedení poslední série frézování přináší odpověď na otázku, zda fréza na konci experimentu bude zanechávat stopy po zubech na testovaném vzorku.

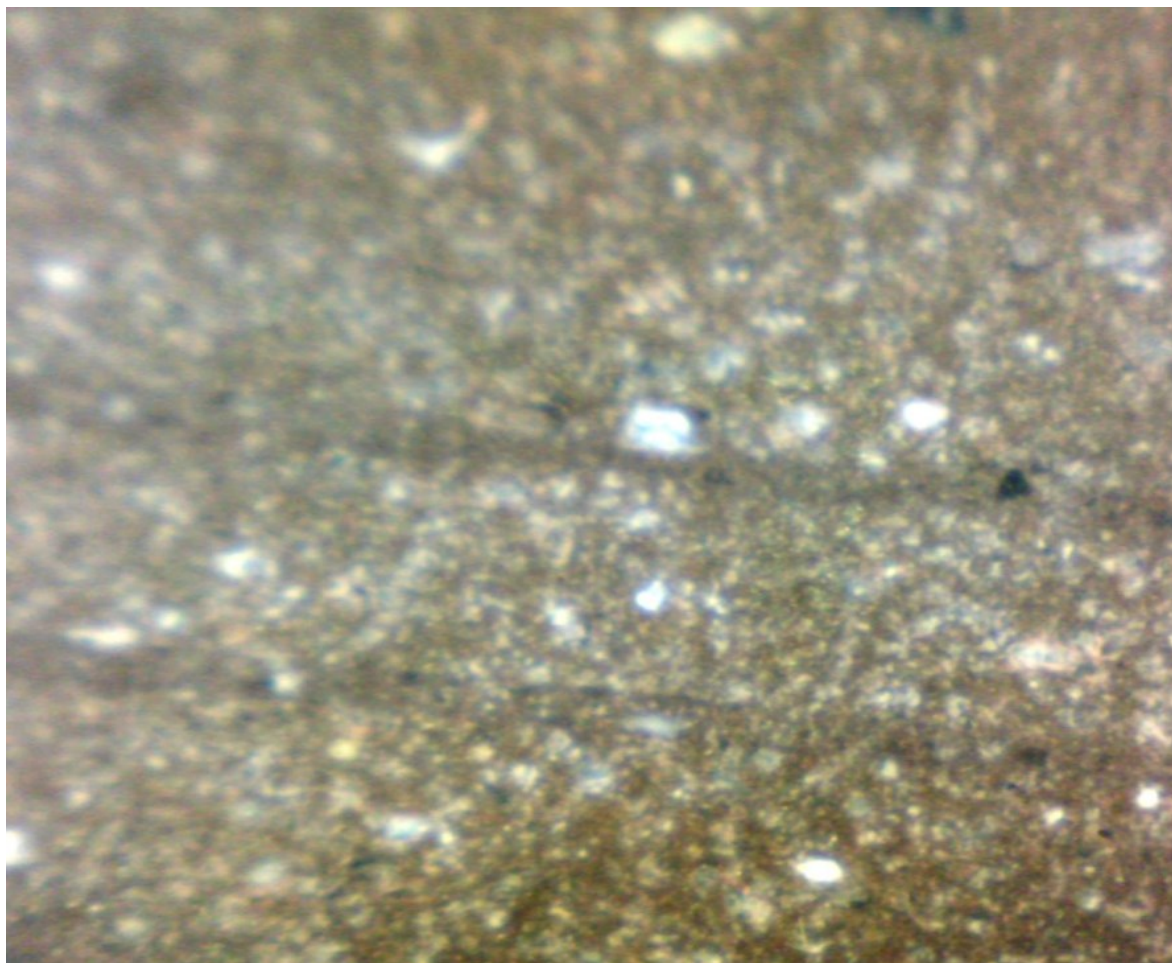
Na Obrázku 32 lze vidět zvětšenou strukturu obrobené plochy nástrojem bez povlaku po 600ti řezech, která nenese žádné viditelné stopy po zubech frézy.

Jinak je tomu u povrchu plochy obrobené nástrojem s diamantovým povlakem po 400 řezech – Obrázek 33, která nese známky vytvoření rýhy, způsobenou pravděpodobně zuby nástroje.



Obrázek 32 Výsledná struktura povrchu obrobku po frézování nástrojem bez povlaku po 600ti řezech - zvětšení 100x

(zdroj: [vlastní])



Obrázek 33 Výsledná struktura povrchu obrobku po frézování nástrojem s diamantovým povlakem po 400 řezech - zvětšení 100x

(zdroj: [vlastní])

8.6 Detekce kovových částic v obráběném materiálu

Překvapivým zjištěním během obrábění WPC materiálu byl nález kovových částic (Obrázek 34) různého charakteru a velikostí v jeho struktuře, jejichž přítomnost nebyla uvedena v dodacích dokumentech. Tento nález může značit kontaminaci během výroby nebo zpracování surovin. Jejich vliv na opotřebení nástroje nelze vyloučit, mohly urychlit opotřebení frézy (H2) zvýšením abrazivního účinku daného materiálu.



Obrázek 34 Kovové fragmenty v dodaném WPC materiálu - zvětšení 100x

(zdroj: [vlastní])

9 DISKUZE

9.1 Shrnutí klíčových výsledků

Diamantový povlak frézy ze slinutých karbidů snížil drsnost povrchu (hypotéza H1) o 42 %, neprokázal však hypotézu H2 o vlivu na snížení opotřebení, což je v rozporu s očekáváním.

9.2 Objasnění a rozbor hypotéz

9.2.1 H1 – Kvalita povrchu

Velmi výrazné snížení hodnot drsnosti povrchu R_a o 42 % při použití nástroje s diamantovým povlakem potvrzuje hypotézu H1, i při nízkém počtu měření lze díky nízké variabilitě ($\pm 0,07$ mm) a těsné korelaci mezi počtem řezů a drsnosti ($R^2 > 0,9$ u diamantového nástroje) doložit předvídatelný trend stability obrábění.

9.2.2 H2 – Životnost nástrojů

Navzdory obecnému přesvědčení o trvanlivosti nástrojů s diamantovým povlakem se podařilo experimentálně vyvrátit hypotézu H2 o vlivu diamantového povlaku na zvýšení trvanlivosti nástroje, nástroj s diamantovým povlakem vykazoval zvýšení opotřebení nástroje o 26,5 % oproti nepovlakovanému nástroji, zároveň tento povlakovaný nástroj vytvářel rýhy na povrchu posledního obrobeného kusu, což by mohlo značit selhání nástroje při obrábění abrazivního WPC materiálu, který obsahoval kromě HDPE recyklátu a dřevěného prášku i částice neidentifikovatelného kovu, které mohly interferovat s měřením. Dalšími z možností, proč data ukázaly větší míru opotřebení, než se očekávalo, mohou být vibrace během měření, problémy s povlakem spojené s odlupováním diamantového potahu, špatná volba měřicích bodů v softwaru a ukládání zbytků obráběného materiálu na břit, které se nepodařilo eliminovat čištěním kompresovaným vzduchem a adhezivní hmotou.

9.3 Specifikované výzkumné otázky

9.3.1 VO1: Jaký druh třísek vytváří nástroje ze slinutých karbidů s povlakem a bez povlaku?

Oba nástroje tvořily vločkovité třísky nepravidelných rozměrů, nástroj s diamantovým povlakem produkoval výrazně jemnější třísky oproti nepovlakovanému nástroji, tento rozdíl může být tvořen sníženým třením diamantového povlaku s WPC materiálem, tvrdostí diamantu a lepším odvodem tepla.

9.3.2 VO2: Jak se změní tvar břitu nástroje během opotřebování?

Během obrábění došlo u nepovlakovaného nástroje ke značnému a okem viditelnému opotřebení řezných hran, projevem byl například černý okraj břitu nástroje, způsoben nejspíše tepelným šokem nebo spáleninami ze dřeva, zároveň se otupila horní strana břitu a snížil se kumulativní obraz průměru nástroje, změřený na Haimer UNO 20/40 (Microvision).

Na fríze s povlakem nebyly nalezeny žádné viditelné známky opotřebení na zkoumaném segmentu.

9.3.3 VO3: Jsou na obrobeném povrchu patrné stopy po zubech frézy?

Na povrchu vzorku obrobeném nástrojem bez povlaku nebyly nalezeny žádné stopy po zubech nástroje.

Povrch testovaného vzorku, jenž byl obroben nástrojem s diamantovým povlakem byly skutečně nalezeny rýhy pozorovatelné holým okem, pravděpodobně způsobené řeznými hranami nástroje, nevylučuje se ani možnost adheze materiálu na břit (což může způsobit nárůstek na řezné hraně), mikro-odtržení povlaku, nedostatečného upnutí obrobku, nebo kontaminace řezné zóny fragmenty kovu, obsaženými v materiálu.

9.4 Nákladová analýza

V této analýze se porovnávají dva nástroje, fréza bez povlaku a fréza s diamantovým povlakem, z hlediska kvality obrábění a ceny. Z Tabulky 4 lze vyčíst, že dražší nástroj (fréza s diamantovým povlakem) poskytuje nižší kvalitu povrchu a méně výrazné stopy po obrábění, zatímco levnější fréza bez povlaku má nižší počáteční náklady, ale z dlouhodobého hlediska může vést k vyšším výdajům.

Tabulka 4 Ekonomicko-technická analýza fréz s ohledem na kvalitu povrchu

Parametr	Fréza bez povlaku	Fréza s diamantovým povlakem
Jakost povrchu (Ra)	Vyšší (horší)	Nižší (lepší)
Viditelné stopy po frézování	Výrazné	Méně výrazné
Cena nástroje	Nižší	Vyšší

Z těchto údajů je zřejmé, že volba nástroje má přímý dopad na náklady a efektivitu výroby. Díky lepším povrchovým vlastostem obrobku obrobeném frézou s diamantovým povlakem může být eliminována potřeba dodatečného obrábění, čímž se ušetří čas i peníze. I když je tento nástroj na počátku dražší, v sériové výrobě se takto počáteční investice vrátí v podobě vyšší produktivity a nižších nákladů na dodatečné úpravy.

Konečná volba nástroje tedy závisí na konečné aplikaci, zatímco investice do kvalitnějšího nástroje se vyplatí tam, kde se klade důraz na přesnost a hospodárnost procesu, levnější nástroj může vystačit pro méně náročné úkoly, například pro vytváření funkčních součástek (které nepotřebují být vysoce přesné) nebo v malosériové výrobě. Volba levnějšího nástroje se teda vyplatí tam, kde počáteční úspory na ceně nástroje převažují nad dlouhodobými náklady.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá obrobitelností WPC materiálů při frézování, přičemž hlavním tématem bylo navrhnout experiment zaměřený na vliv výběru nástroje na vlastnosti obrobeného materiálu a charakteristiku opotřebení nástroje. Vedlejšími výstupy práce jsou analýza tvorby třísek při frézování kompozitních materiálů a detailní rozbor deformace řezného břitů v závislosti na počtu řezných cyklů.

Ačkoliv nástroj s diamantovým povlakem neprokázal optimální výsledky v oblasti odolnosti vůči opotřebení, jeho přínos pro kvalitu obrobeného povrchu byl výrazný. Naměřené hodnoty drsnosti (R_a) zůstaly konzistentní bez známek degradace, s výjimkou jedné izolované anomálie, rýhy na posledním vzorku. Ta může být způsobena nehomogenitou dodaného WPC materiálu nebo dočasným vznikem nárůstu na ostří.

Z dlouhodobého hlediska představují povlakované nástroje výhodnou investici, zejména pro provozy s vysokou produkcí, kde je potřeba zachovat konzistenci kvality obrobených povrchů.

Práce přinesla cenné údaje pro výběr nástrojů pro obrábění WPC materiálů, a naznačuje směr dalšího výzkumu. Pokračování této tematiky v rámci diplomové práce by bylo přínosné, zejména s ohledem na optimalizaci řezných parametrů a dlouhodobé testování životnosti nástrojů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BÍLEK, Ondřej a LUKOVICS, Imrich. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [2] *Metal Cutting*. Online. 4th edition. Elsevier, 2000. ISBN 978-0-08-051145-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpMCE00012/toc>. [cit. 2024-12-04].
- [3] CHILDS, Thomas. *Metal machining: theory and applications*. Online. New York: Elsevier, 2000. ISBN 978-0-0805-2402-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpMMTA0004/toc>. [cit. 2025-05-12].
- [4] KAAST MACHINE TOOLS, INC. *Exploring the Fascinating History of Machining*. Online. KAAST MACHINE TOOLS, INC. KAAST MACHINE TOOLS. 2023. Dostupné z: <https://kaast-usa.com/exploring-the-fascinating-history-of-machining/>. [cit. 2024-12-03].
- [5] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [6] ŠTRAJBL, Jan. *Obráběcí stroje*. 3. uprav. a dopln. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit.
- [7] KALPAKJIAN, Serop; SCHMID, Steven R. a SEKAR, K. S. Vijay. *Manufacturing engineering and technology*. 7th. Jurong, Singapore: Pearson Education South Asia, 2014. ISBN 978-981-06-9406-7.
- [8] OBERG, Erik; JONES, Franklin Day; HORTON, Holbrook Lynedon; RYFFEL, Henry H. a MCCAULEY, Christopher J., BRENGELMAN, Laura (ed.). *Machinery's handbook: a reference book for the manufacturing and mechanical engineer, designer, drafter, metalworker, toolmaker, machinist, hobbyist, educator, and student*. Online. 32nd edition. South Norwalk: Industrial Press, 2024. ISBN 978-1-5231-6179-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpMHE0004K/toc>. [cit. 2025-05-12].
- [9] DRÁBEK, František. *Frézování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
- [10] ŠTULPA, Miloslav. *Technologie obrábění: CNC soustružení, frézování, vrtání pro praxi*. Online. Grada, 2022. ISBN 978-80-271-4588-1. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/e-kniha/technologie-obrabeni-2055080/>. [cit. 2025-05-12].
- [11] UNICUT. *Sousledné a nesousledné frézování*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.unicut.cz/sousledne-a-nesousledne-frezovani>. [cit. 2025-02-16].
- [12] SANDVIK COROMANT. *Okružovací frézování závitů*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/threading/thread-whirling>. [cit. 2025-02-16].
- [13] MIRSKY, Jeannette. *Eli Whitney*. Online. Britannica. 2024, s. 1. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Eli-Whitney>. [cit. 2024-12-07].
- [14] REPOZ S.R.O. *Obráběcí a tvářecí stroje*. Online. 2025. Dostupné z: <https://repoz.cz/frezka-univerzalni-fgu32-1>. [cit. 2025-02-16].
- [15] VASILJEVS, Lotars O.; ZABAROVSKA, Roze; GULEVSKA, Eva; CIRULE, Dace; SANSONETTI, Errj et al. Changes in Wood Plastic Composite Properties After Natural Weathering and Potential Microplastic Formation. Online. *Forests*. 2024, roč. 15, č. 12, s. 1-15. ISSN 1999-4907. Dostupné z:

- <https://www.mdpi.com/journal/forests>, <https://doi.org/10.3390/fl5122102>. [cit. 2024-12-05].
- [16] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-734-88. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:58e8b460-317f-11e3-8d9d-005056827e51>.
- [17] ROMEORIM. *What are Composites?* Online. 2025. Dostupné z: <https://romeorim.com/what-are-composites/>. [cit. 2025-02-16].
- [18] CAMPBELL, Flake Charles. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. Online. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK: Elsevier, 2004. ISBN 978-0-08051-098-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpMPAC0002/toc>. [cit. 2024-12-03].
- [19] HLUCHÝ, Miroslav a KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie I*. 1. díl, Nauka o materiálu. 4té. Praha: Scientia, 2007. ISBN 80-7183-262-6.
- [20] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [21] NUKALA, Satya Guha; KONG, Ing; KAKARLA, Akesh Babu; TSHAI, Kim Yeow a KONG, Win. Preparation and Characterisation of Wood Polymer Composites Using Sustainable Raw Materials. Online. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 15, s. 1-21. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14153183>. [cit. 2025-01-24].
- [22] UD MACHINE SOLUTION TECHNOLOGY CO., LTD. *Zvládnutí vytlačování WPC: Pohledy do výroby dřevoplastových kompozitů*. Online. 2025. Dostupné z: <https://ud-machine.com/cs/blog/wpc-extrusion/#>. [cit. 2025-02-07].
- [23] ZHU, Zhaolong; BUCK; WANG, Jinxin; WU, Zhanwen; XU, Wei et al. Machinability of Different Wood-Plastic Composites during Peripheral Milling. Online. *MDPI*. 2022, roč. Leden 2022, č. 15, article 4, s. 1-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma15041303>. [cit. 2024-12-04].
- [24] ZHU, Zhaolong; BUCK, Dietrich; SONG, Meiqi; TANG, Qi; GUAN, Jun et al. Enhancing face-milling efficiency of wood-plastic composites through the application of genetic algorithm-back propagation neural network. Online. *Wood Material Science & Engineering*. 2024, roč. 2024, č. 19, s. 1-8. ISSN 1748-0272. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2388844>. [cit. 2025-02-16].
- [25] PEREIRA, Robson Bruno Dutra; BRANDÃO, Lincoln Cardoso; DE PAIVA, Anderson Paulo; FERREIRA, João Roberto a DAVIM, J. Paulo. A review of helical milling process. Online. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2017, roč. 2017, č. 120, s. 27-48. ISSN 08906955. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.05.002>. [cit. 2025-02-16].
- [26] WU, Zhanwen; ZHANG, Feng; HU, Yong; ZHU, Zhaolong a GUO, Xiaolei. Study on helical milling performance of wood-plastic composites. Online. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2022, roč. 2022, č. 37, s. 143-154. ISSN 1878-0016. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.01.003>. [cit. 2024-12-04].
- [27] *Lambowood*. Online. Lambowood. 2025. Dostupné z: <https://www.wpccentrum.cz>. [cit. 2025-05-01].
- [28] TECHNOR PRINT - TECHNICKÉ NORMY ČSN. ČSN EN 15534-1+A1 (649330), *Kompozity na bázi dřeva a termoplastů (obvykle nazývané kompozity plast-dřevo*

(WPC) nebo kompozity s přírodními vlákny (NFC)) - Část 1: Zkušební metody pro charakterizaci směsí a výrobků. 2018.

- [29] *Frézka CNC s naklápěcím rotačním stolem DMG MORI – DMU 50*. Online. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. 2025. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/o-fakulte/ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/vedaavyzkum/pristrojovevybaveni/frezka-cnc-s-naklapecim-rotacnim-stolem-dmg-mori-dmu-50/>. [cit. 2025-05-01].
- [30] *Měřicí, kontrolní a testovací stroje, měřidla, optické přístroje, snímače, měřicí ústředny*. Online. Fakulta technologická - Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 2025. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/vedaavyzkum/pristrojovevybaveni/merici-kontrolni-a-testovaci-stroje/>. [cit. 2025-05-10].
- [31] *Série 178 - Přenosné přístroje na měření drsnosti povrchu*. Online. Mitutoyo. 2025. Dostupné z: https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/1292249401020/Surftest%20SJ-410/index.xhtml?jsessionid=681FB058AC1A629775C62A35234FAEEF. [cit. 2025-05-10].
- [32] *Bodelin Technologies ProScope HR*. Online. Bhphotovideo. 2025. Dostupné z: https://www.bhphotovideo.com/c/product/459228-REG/Bodelin_Technologies_PS_HR_ALAB_ProScope_HR_Advanced_Digital.html/overview. [cit. 2025-05-10].
- [33] *ProScope HR CSI - Advanced Lab Kit*. Online. Amazon. 2025. Dostupné z: <https://www.amazon.ca/ProScope-HR-CSI-Advanced-Lab/dp/B000QYHYUY>. [cit. 2025-05-10].
- [34] *TK fréza Composite tlačný řez, bez povlaku*. Online. Hoffmann Group. 2025. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/p/209542-4>. [cit. 2025-05-12].
- [35] *TK fréza tlačný řez, diamant*. Online. Hoffmann Group. 2025. Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/p/209535-8>. [cit. 2025-05-12].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Tvorba třísky na obrobku	15
Obrázek 2 Egyptský předchůdce soustruhu	17
Obrázek 3 Hloubka třísky	21
Obrázek 4 Znázornění řezných sil při nesousledném frézování v pracovní rovině P_{fe}	22
Obrázek 5 Sousledné a nesousledné frézování	27
Obrázek 6 Obvodové a čelní frézování.....	28
Obrázek 7 Závitořezný prstenec	29
Obrázek 8 Univerzální frézka FGU32	30
Obrázek 9 Složení kompozitního materiálu.....	31
Obrázek 10 WPC materiál	36
Obrázek 11 Vytlačovací linka na výrobu WPC	37
Obrázek 12 Grafické znázornění dráhy řezného nástroje – metoda Zig	44
Obrázek 13 WPC Lambowood, Brownish red.....	46
Obrázek 14 Složení WPC profilů Lambowood	47
Obrázek 15 Pásová pila PPK - 175 T (PROMA).....	48
Obrázek 16 CNC frézka DMG MORI - DMU 50	49
Obrázek 17 Přednastavovací přístroj Haimer UNO 20/40 (Microvision)	50
Obrázek 18 Drsnoměr SJ 410 (MITUTOYO)	51
Obrázek 19 Pokročilá laboratorní sada ProScope HR CSI (Bodelin).....	52
Obrázek 20 Frézovací nástroje ze slinutých karbidů	54
Obrázek 21 Snímek nástroje s diamantovým povlakem před (vlevo) a po (vpravo) sérii frézování v aplikaci HAIMER Microvision.....	55
Obrázek 22 Závislost R_a na počtu řezů - nástroj bez povlaku.....	56
Obrázek 23 Závislost R_a na počtu řezů – nástroj s dia povlakem	57
Obrázek 24 Změna průměru frézy bez povlaku.....	57
Obrázek 25 Změna průměru frézy s diamantovým povlakem.....	58
Obrázek 26 Třísky po obrábění nástrojem bez povlaku	59
Obrázek 27 Třísky po obrábění nástrojem s diamantovým povlakem.....	59
Obrázek 28 Břit nástroje bez povlaku před frézováním – 100x zvětšení	60
Obrázek 29 Břit nástroje bez povlaku po 600ti řezech - 100x zvětšení.....	61
Obrázek 30 Břit nástroje s diamantovým povlakem před frézováním - 100x zvětšení	62
Obrázek 31 Břit nástroje s diamantovým povlakem po 400 řezech - 100x zvětšení	62
Obrázek 32 Výsledná struktura povrchu obrobku po frézování nástrojem bez povlaku po 600ti řezech - zvětšení 100x.....	63

Obrázek 33 Výsledná struktura povrchu obrobku po frézování nástrojem s diamantovým povlakem po 400 řezích - zvětšení 100x.....	64
Obrázek 34 Kovové fragmenty v dodaném WPC materiálu - zvětšení 100x.....	65

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Hodnoty konstant C_{Fc} a exponentů x při frézování válcovou a čelní frézou	25
Tabulka 2 Tabulka parametrů řezných nástrojů.....	53
Tabulka 3 Srovnání drsnosti povrchu R_a pro oba typy nástrojů.....	56
Tabulka 4 Ekonomicko-technická analýza fréz s ohledem na kvalitu povrchu.....	68

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

n Otáčky nástroje

v_c Řezná rychlost

f_z Posuv na zub

z Počet zubů na nástroji

D Průměr nástroje

HDPE Vysokohustotní polyethylen

PET Polyethylentereftalát

PE Polyethylen

PLA Kyselina polymléčná

PVC Polyvinylchlorid

WPC Wood Plastic Composite

R_a Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu

SK Slinutý karbid

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Naměřené hodnoty drsností

Příloha P II: Hodnoty drsností po použití Grubbsova testu odlehlých hodnot a grafy závislosti drsnosti na počtu řezů

Příloha P III: Technický list frézy bez povlaku

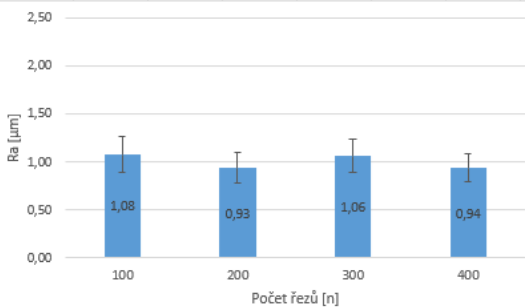
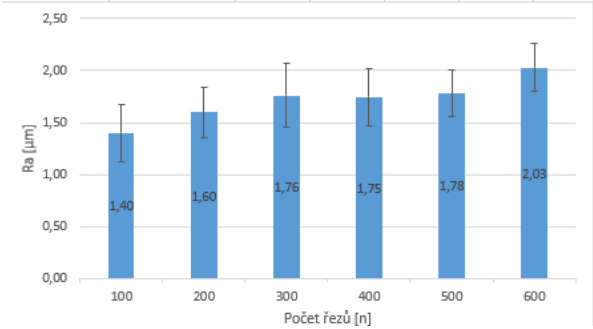
Příloha P IV: Technický list frézy s diamantovým povlakem

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ HODNOTY DRSNOSTÍ

	Naměřené hodnoty			Bez povlaku				S povlakem		
vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
drsnost	1,791	1,718	1,478	1,842	1,664	2,188	1,392	1,462	1,163	1,35
	1,295	1,302	2,112	1,869	1,614	2,256	1,116	0,956	1,104	0,976
	1,958	1,566	1,931	1,953	1,61	2,11	1,487	1,034	0,984	0,898
	1,656	1,727	1,775	2,397	1,596	1,943	1,006	1,029	0,713	1,168
	1,866	1,808	1,526	1,561	1,316	1,87	0,81	1,182	0,848	1,079
	1,519	1,671	1,448	2,08	1,732	2,278	1,215	0,922	0,826	1,222
	1,233	1,993	1,37	2,495	1,788	2,64	1,184	0,736	1,055	1,091
	0,894	1,487	1,292	1,442	2,152	2,415	1,134	0,684	1,286	1,099
	1,3	1,289	2,077	1,942	1,673	2,062	0,873	0,859	1,005	0,708
	1,386	1,796	2,052	1,928	1,541	2,14	1,135	1,091	0,691	0,824
	1,451	1,421	1,789	2,14	1,947	2,225	0,82	0,929	1,127	1,034
	1,131	1,64	1,423	1,825	1,859	2,4	0,792	0,85	0,938	1,005
	1,246	1,397	1,185	1,317	1,768	2,171	0,843	1,256	1,04	1,08
	1,06	1,456	2,118	1,359	2,055	1,978	0,925	0,777	1,242	0,777
	1,463	1,49	2,281	1,706	1,735	1,892	0,967	1,188	0,981	0,759
	1,688	1,931	1,888	1,815	1,532	1,814	1,475	0,917	1,255	0,83
	0,862	1,932	1,756	1,685	2,21	2,172	1,001	0,99	1,115	0,899
	1,324	1,174	1,959	1,995	1,863	1,753	1,481	0,833	1,026	1,285
	1,345	1,206	2,166	1,405	2,32	2,154	0,989	0,7	1,336	0,84
	1,295	2,815	2,516	1,571	1,712	1,862	1,174	0,795	1,08	0,768
	1,586	1,747	1,821	1,351	1,672	1,726	1,096	1,088	1,145	0,812
	1,603	1,467	1,529	1,817	2,089	1,798	1,121	0,89	0,973	0,891
	1,142	1,397	1,663	1,707	2,096	1,506	1,183	1,425	1,236	0,784
	1,517	1,758	1,992	1,593	1,554	1,998	1,291	0,775	1,297	0,966
	1,383	1,94	1,619	1,637	1,927	2,018	1,189	0,981	1,073	0,997
průměr	1,39976	1,64512	1,79064	1,77728	1,801	2,05476	1,10796	0,97396	1,06156	0,96568

PŘÍLOHA P II: HODNOTY DRSNOSTÍ PO POUŽITÍ GRUBBSOVA TESTU ODLEHLÝCH HODNOT A GRAFY ZÁVISLOSTÍ DRSNOSTI NA POČTU ŘEZŮ

Hodnoty po použití Grubbsova testu odlehlých hodnot						Bez povlaku		S povlakem				
Počet řezů	100	200	300	400	500	600		100	200	300	400	
	1,791	1,718	1,478	1,842	1,664	2,188		7	8	9	10	
	1,295	1,302	2,112	1,869	1,614	2,256		1,392	0,956	1,163	0,976	
	1,958	1,566	1,931	1,953	1,61	2,11		1,116	1,034	1,104	0,898	
	1,656	1,727	1,775	2,397	1,596	1,943			1,029	0,984	1,168	
	1,866	1,808	1,526	1,561	1,316	1,87		1,006	1,182	0,713	1,079	
	1,519	1,671	1,448	2,08	1,732	2,278		0,81	0,922	0,848	1,222	
	1,233	1,993	1,37	1,442	1,788	2,415		1,215	0,736	0,826	1,091	
	0,894	1,487	1,292	1,942	2,152	2,062		1,184	0,684	1,055	1,099	
	1,3	1,289	2,077	1,928	1,673	2,14		1,134	0,859	1,286	0,708	
	1,386	1,796	2,052	2,14	1,541	2,225		0,873	1,091	1,005	0,824	
	1,451	1,421	1,789	1,825	1,947	2,4		1,135	0,929	0,691	1,034	
	1,131	1,64	1,423	1,317	1,859	2,171		0,82	0,85	1,127	1,005	
	1,246	1,397	1,185	1,359	1,768	1,978		0,792	1,256	0,938	1,08	
	1,06	1,456	2,118	1,706	2,055	1,892		0,843	0,777	1,04	0,777	
	1,463	1,49	2,281	1,815	1,735	1,814		0,925	1,188	1,242	0,759	
	1,688	1,931	1,888	1,685	1,532	2,172		0,967	0,917	0,981	0,83	
	0,862	1,932	1,756	1,995	2,21	1,753		1,475	0,99	1,255	0,899	
	1,324	1,174	1,959	1,405	1,863	2,154		1,001	0,833	1,115	0,84	
	1,345	1,206	2,166	1,571	1,712	1,862		0,989	0,7	1,026	0,768	
	1,295	1,747	1,821	1,351	1,672	1,726		1,174	0,795	1,336	0,812	
	1,586	1,467	1,529	1,817	2,089	1,798		1,096	1,088	1,08	0,891	
	1,603	1,397	1,663	1,707	2,096	1,506		1,121	0,89	1,145	0,784	
	1,142	1,758	1,992	1,593	1,554	1,998		1,183	0,775	0,973	0,966	
	1,517	1,94	1,619	1,637	1,927	2,018		1,291	0,981	1,236	0,997	
	1,383							1,189		1,297		
										1,073		
Průměr	1,40	1,60	1,76	1,75	1,78	2,03	1,72	1,08	0,93	1,06	0,94	1,00
Sigma +	0,28	0,24	0,31	0,27	0,23	0,22	0,26	0,18	0,16	0,17	0,14	0,16
Sigma -	-0,28	-0,24	-0,31	-0,27	-0,23	-0,22		-0,18	-0,16	-0,17	-0,14	
Parametr	Dia nástroj (n=4)		Nástroj bez povlaku (n=6)									
Průměrná Ra	1,00 ± 0,16		1,72 ± 0,26									
Minimální Ra	0,93		1,40									
Maximální Ra	1,08		2,03		Graf pro nástroj bez povlaku				Graf pro nástroj s diamantovým povlakem			



PŘÍLOHA P III: TECHNICKÝ LIST FRÉZY BEZ POVLAKU

Technický list

Garant

TK fréza Composite tlačný řez, bez povlaku, Ø h10 DC: 8Mmm



Údaje o objednávce

Artikové číslo	209542 8M
GTIN	4062406366179
Třída artiklu	100

Popis

Provedení:
Specificky **dále vyvinutý břit nástroje** pro optimální obrábění kompozitních materiálů.
Konstrukční délka jako **DIN 6527 dlouhá**.
Levá spirála, **tlačný řez**. Materiál je přitlačován na podložku. Velmi vhodné pro tenké materiály.

Technický popis

Šířka rohové fazetky při 45°	0,16 mm
Ø břitu D _c	8 mm
Úhel sklonu šroubovice	8 stupeň
Nepodepřená délka L ₁ včetně uvolnění	32 mm
Uvolňovací Ø D ₁	7,8 mm
Délka břitu L _c	22 mm
Směr přísuvu	Horizontální, šikmý a vertikální
Počet zubů Z	8
Stopka	DIN 6535 HA s h6
Ø stopky D _s	8 mm
Tolerance jmenovitý Ø	h10
Rohový úhel čela	45 stupeň
Posuv f _z pro frézování drážek v GFK CFK	0,031 mm

Technický list

Celková délka L	70 mm
Povlak	bez povlaku
Řezný materiál	TK
Norma	DIN 6527
Šířka záběru a_e při operaci frézování	Plná drážka hloubka řezu 1×D
Vnitřní chlazení	ne
Barevný kroužek	černá
Druh produktu	Rohová fréza

Údaje o uživateli

	Použití	V_c	Kód ISO
PVDF GF20	vhodný	80 m/min	N
POM GF25	vhodný	80 m/min	N
PA 66 GF30	vhodný	80 m/min	N
PEEK GF30	vhodný	80 m/min	N
PTFE CF25	vhodný	80 m/min	N
PEEK CF30	vhodný	80 m/min	N
Hybridy	vhodný		
Honeycomb sendvič	vhodný	165 m/min	N
CFK	vhodný	120 m/min	N
GFK, CFK	vhodný	120 m/min	N
Grafit	vhodný	180 m/min	N
mokrý max.	vhodný		
suché	vhodný		
Vzduch	vhodný		

PRILOHA P IV: TECHNICKÝ LIST FRÉZY S DIAMANTOVÝM POVLAKEM

Technický list



TK fréza tlačný řez, diamant, Ø h10 DC: 8mm



Údaje o objednávce

Artikové číslo	209535 8
GTIN	4045197478375
Třída artiklu	10Y

Popis

Provedení:
 Vysoce výkonná geometrie s vícenásobným ozubením pro extrémně velký objem obrábění během jedné pracovní operace.
 Levá spirála, **tlačný řez**. Materiál je přitlačován na podložku. Velmi vhodné pro tenké materiály.

Technický popis

Ø břitu D _c	8 mm
Posuv f _z pro frézování drážek v GFK CFK	0,05 mm
Počet zubů Z	8
Posuv f _z pro frézování drážek v grafitu	0,05 mm
Šířka rohové fazetky při 45°	0,16 mm
Ø stopky D _s	8 mm
Celková délka L	75 mm
Délka břitu L _c	32 mm
Směr přísuvu	Horizontální, šikmý a vertikální
Stopka	DIN 6535 HA s h6
Tolerance jmenovitý Ø	h10
Rohový úhel čela	45 stupeň
Povlak	diamant
Řezný materiál	TK

Technický list

Norma	Výrobní norma
Šířka záběru a_e při operaci frézování	Plná drážka hloubka řezu $1 \times D$
Vnitřní chlazení	ne
Barevný kroužek	černá
Druh produktu	Rohová fréza

Údaje o uživateli

	Použití	V_c	Kód ISO
PVDF GF20	vhodný	200 m/min	N
POM GF25	vhodný	190 m/min	N
PA 66 GF30	vhodný	170 m/min	N
PEEK GF30	vhodný	150 m/min	N
PTFE CF25	vhodný	180 m/min	N
PEEK CF30	vhodný	160 m/min	N
Hybridy	vhodný		
Honeycomb sendvič	vhodný	350 m/min	N
GFK	vhodný	190 m/min	N
GFK, CFK	vhodný	190 m/min	N
Grafit	vhodný	340 m/min	N
mokrý max.	vhodný		
suché	vhodný		
Vzduch	vhodný		

Vhodné produkty

<https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hom/p/209535-8>