



Diplomová práce

Frézování kompozitních desek vyztužených skelnými vlákny ve firmě Autoneum CZ s.r.o. pro technické aplikace

Studijní program:

N0722A270001 Technologie plastů a kompozitů

Autor práce:

Ing. Lenka Kyselá

Vedoucí práce:

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

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Frézování kompozitních desek vyztužených skelnými vlákny ve firmě Autoneum CZ s.r.o. pro technické aplikace

Jméno a příjmení:

Ing. Lenka Kyselá

Osobní číslo:

S21000326

Studijní program:

N0722A270001 Technologie plastů a kompozitů

Zadávající katedra:

Katedra obrábění a montáže

Akademický rok:

2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o problematice frézování kompozitních materiálů vyztužených skelnými vlákny se zaměřením na materiál nástroje a geometrii, orientaci vláken a analýzu vlivu opotřebení nástroje.
2. Volba obráběného materiálu (kompozitní desky vyztužené skelnými vlákny), řezných nástrojů (fréz) a řezných podmínek bez procesního média.
3. Návrh metodiky experimentů pro frézování kompozitních desek vyztužených skelnými vlákny.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje v závislosti na použitém nástroji (z hlediska materiálového složení) a jeho geometrii a na orientaci vláken obráběného materiálu a vzniklé delaminaci.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce:

Jazyk práce:

tištěná/elektronická

Čeština

Seznam odborné literatury:

1. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
2. BILÍK, O. Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění. Ostrava: Vysoká škola báňská TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.
4. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
5. Firemní podklady k nástrojům a obráběnému materiálu.

Vedoucí práce:

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

Datum zadání práce:

2. října 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 2. dubna 2024

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

L.S.

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

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

ANOTACE

Předkládaná diplomová práce poskytuje informace o frézování kompozitního materiálu tvořeného polypropylenem plněným skelnými vlákny.

Hlavním cílem diplomové práce bylo stanovit vhodné řezné nástroje pro frézování kompozitních desek s obsahem barviv a aditiv, vyztužených skelnými vlákny. Problematika frézování kompozitních materiálů je popsána v teoretické části.

Experimentální část je věnována praktické části – přípravě vzorků, obrábění vzorků, zkoumání řezných sil, drsnosti povrchu, opotřebení řezného nástroje, delaminaci a prezentaci získaných výsledků.

Klíčová slova: kompozitní materiál, skelná vlákna, měření drsnosti, řezné síly, jakost povrchu, frézování, drsnost, analýza povrchu, delaminace

ANNOTATION

The presented diploma thesis provides information on the milling of a composite material consisting of polypropylene filled with glass fibers.

The main goal of the thesis is to find suitable tools for milling composite boards containing dyes and additives, reinforced with glass fibers. The necessary basic concepts associated with the issue of milling these materials are presented in the theoretical part. Information on composite materials and milling technology was also included in this part of the work.

The experimental part is devoted to the practical part – sample preparation, sample machining, examination of cutting forces, surface roughness, degree of damage to the cutting tool, delamination and presentation of the obtained results.

Keywords: composite material, glass fibers, roughness measurement, cutting forces, surface quality, milling, roughness, surface analysis, delamination

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucí mé diplomové práce paní doc. Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. za velkou ochotu, poskytnutí cenných rad a připomínek, vstřícnost, trpělivost a odborné vedení. Dále bych ráda poděkovala konzultantům panu Ing. Miloslavu Ledvinovi, Ph.D a Bc. Martinovi Váňovi za poskytnutí cenných rad a připomínek v oblasti praktické části mé diplomové práce. Firmě Dormet Pramet s.r.o. za poskytnutí výměnných břitových destiček. V neposlední řadě bych ráda poděkovala mé rodině za podporu po celou dobu studia.

OBSAH	
Seznam použitých symbolů a zkratk	5
1 ÚVOD	10
2 TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1 Kompozity	12
2.1.1 Vlákenná výztuž	13
2.2 Frézování kompozitních materiálů	15
2.2.1 Sousedné a nesousedné frézování	15
2.2.2 Sousedné frézování	16
2.2.3 Nesousedné frézování	16
2.3 Nástroje vhodné pro frézování kompozitních materiálů	17
2.3.1 Materiály pro řezné nástroje	18
2.3.1.1 Rychlořezné oceli	18
2.3.1.2 Slinuté karbidy	19
2.3.2 Řezné podmínky	19
2.3.3 Delaminace	19
2.3.4 Vznik třísky	21
2.3.5 Geometrie bříty	21
2.3.6 Opotřebení řezného nástroje	21
3 METODICKÁ ČÁST	24
3.1 Zkušební vzorky	24
3.2 Strojní zařízení použité v rámci experimentu	25
3.2.1 Hydraulický lis Diffenbacher 2500	25
3.2.2 Vrtačka horizontální HELTOS VS 40	25
3.2.3 Pásová pila ARG 300 Plus H.F.	26
3.2.4 Frézka FNG 32	27
3.3 Nástroje použité v rámci experimentu	28
3.3.1 Výměnné břitové destičky	28
3.3.2 Čelní válcová stopková fréza 25A4R034A25-STM10-C	29
3.4 Měřicí zařízení použité v rámci experimentu	30
3.4.1 Piezoelektrický dynamometr KISTLER	30
3.4.2 Mitutoyo SV-2000 N2	31
3.4.3 Keyence VK-X1100	32
3.4.4 Dílenský mikroskop Carl Zeiss	34
3.4.5 FE SEM Zeiss Ultra Plus	36
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
4.1 Hodnocení opotřebení nástroje	38

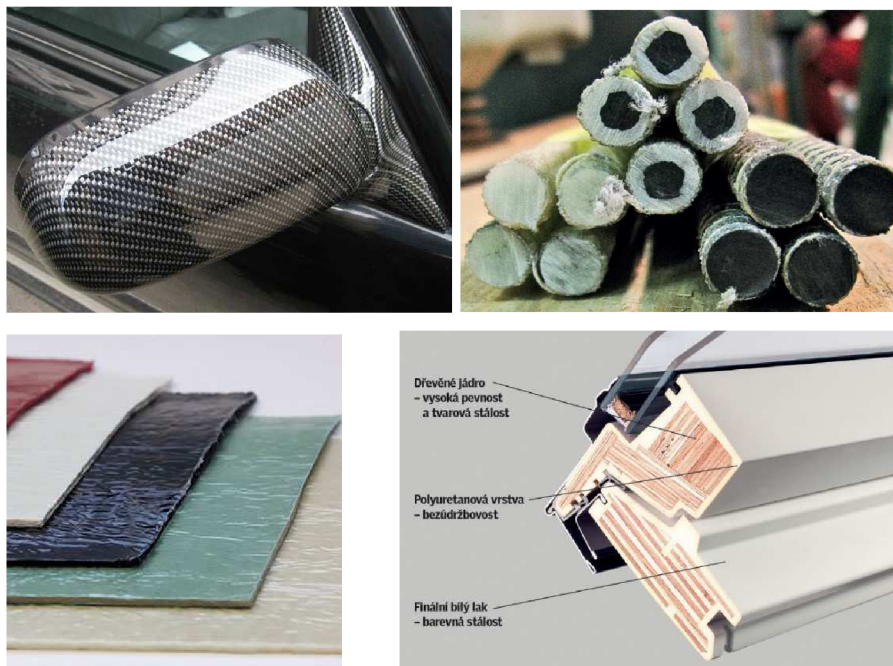
4.2	Hodnocení drsnosti obrobené plochy	41
4.3	Hodnocení řezné síly	44
4.4	Hodnocení delaminace	50
4.5	Hodnocení tvorby třísky	61
5	DISKUZE VÝSLEDŮ	64
5.1	Hodnocení opotřebení nástroje	64
5.2	Hodnocení drsnosti obrobené plochy	65
5.3	Hodnocení řezné síly	65
5.4	Hodnocení delaminace	66
6	ZÁVĚR	70
	Seznam použité literatury	72

Seznam použitých symbolů a zkratek

ZKRATKA/SYMBOL	JEDNOTKY	NÁZEV
F_{posuv}	[N]	řezná posuvová síla
L	[m]	celková ujetá vzdálenost nástroje
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
f	[mm·ot ⁻¹]	posuv
f_z	[mm]	posuv na zub
l	[m]	dráha
n	[ot·min ⁻¹]	otáčky
o	[m]	obvod kruhové výseče
R	[m]	průměr
R_a	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
s	[m]	ujetá dráha nástroje
v_c	[m·min ⁻¹]	rychlost hlavního řezného pohybu
v_f	[m·min ⁻¹]	posuvná rychlost
x, y, z	[]	osy souřadného systému
z	[]	zub

1 ÚVOD

Kompozitní materiály neboli také kompozity jsou nedílnou součástí našeho života, jsou využívány ve všech odvětvích okolo nás – v automobilovém, v leteckém, či jiném typu průmyslu, ve zdravotnictví, v ozbrojených složkách atd.. Kompozitní materiály se neustále vyvíjejí a zdokonalují.



Obrázek 1: Příklady využití kompozitních materiálů [14], [16], [33], [34]

S neustále se zvyšujícími požadavky vznikají nové materiály, které jsou převážně tvořeny kompozitními materiály různého složení. S vývojem nových kompozitních materiálů vzniká také potřeba jejich následného zpracování – dokončovací práce na finálním výrobku.

Zadání diplomové práce ze strany firmy Autoneum CZ, s.r.o. bylo provést analýzu problematiky frézování kompozitních materiálů s ohledem na ekonomickou oblast výroby a navrhnout vhodný řezný nástroj.

Diplomová práce se zabývá volbou vhodných výměnných břitových destiček k frézování kompozitního materiálu s matricí plněnou skelnými vlákny. Hlavním cílem předkládané práce byl výběr z běžně dostupných výměnných břitových destiček a simulace výrobního procesu bočního frézování, aby bylo možné pomocí experimentu ověřit, jaké vlastnosti daná výměnná břitová destička má a zda je vhodným nástrojem pro frézování kompozitních materiálů s obsahem skelných vláken ve firmě Autoneum CZ, s.r.o..

K dosažení vytyčeného cíle bylo nutné vytvořit kompletní metodiku pro měření opotřebení řezného nástroje, sil při obrábění, drsnosti povrchu, včetně vyhodnocení naměřených výsledků.

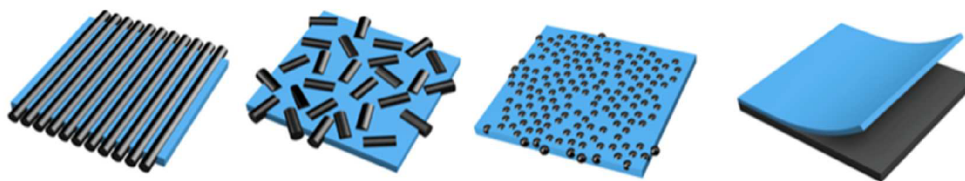
2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Kompozity

Kompozitní materiály disponují vlastnostmi jako je např. vyšší pevnost, houževnatost, odolnost proti namáhání či opotřebení, nižší hmotnost, atd.. Kompozitní materiály se výrazně nedeformují (mez kluzu odpovídá mezi pevnosti), rovněž vykazují vysokou mez únavy. Kompozitní materiály mají výbornou ohnivzdornost v porovnání se slitinami lehkých kovů. K nevýhodám kompozitních materiálů patří vyšší cena, obtížnější zpracovatelnost, odlišná technologie výroby konstrukčních součástí.

Kompozitní materiály jsou materiály skládající se ze dvou či více složek s odlišnými chemickými a fyzikálními vlastnostmi, z nichž alespoň jedna složka je v tuhém skupenství.

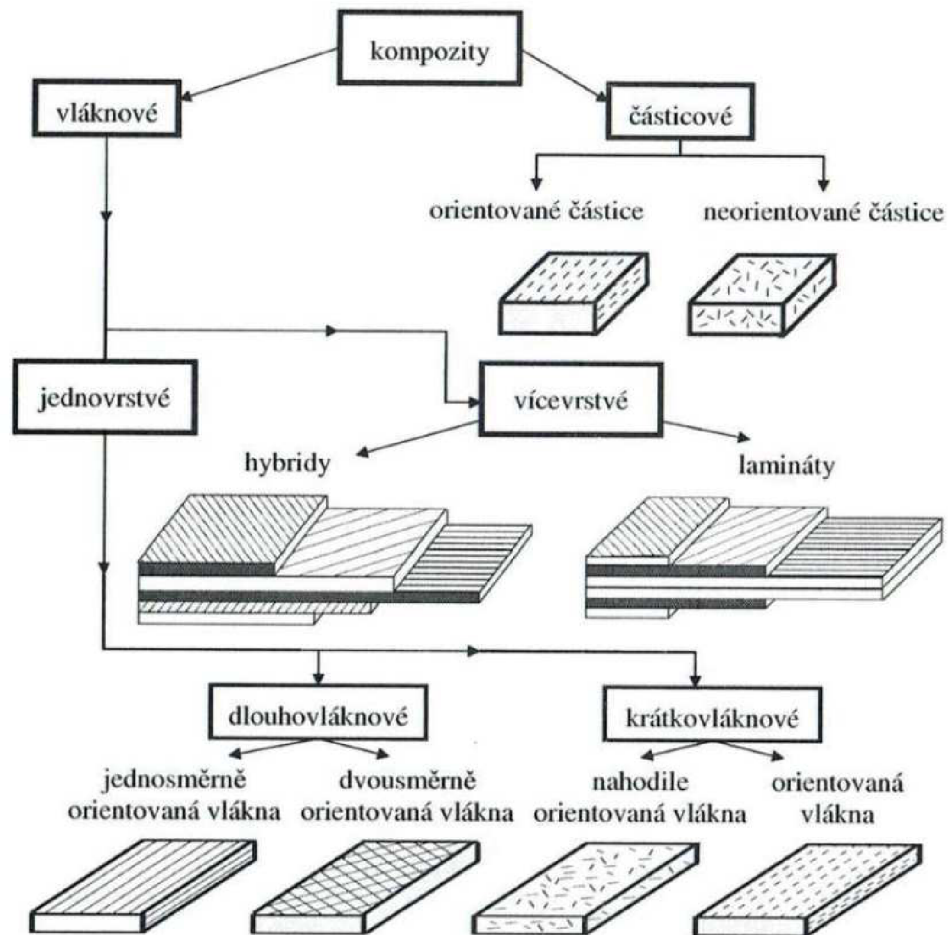
Kompozit musí obsahovat nejméně jednu spojitou fázi, která ho drží pohromadě a která je označována jako matrice. Další fáze, které jsou nespojité a které by měly být v kompozitu rovnoměrně rozptýlené, jsou označovány jako disperze.



Obrázek 2: Různé možnosti zpevňovacích materiálů v kompozitech – nepřerušovaná vlákna, kratší vlákna, malé částice, listy materiálu [21]

Kompozitní materiály s matricí na bázi pryskyřice nebo polymeru patří do skupiny materiálů, které disponují specifickými vlastnostmi. Jejich použití společně s požadavky na nástroje k jejich zpracování neustále vzrůstá. Obrábění kompozitních materiálů je obtížné. Z tohoto důvodu vyžaduje volba vhodných řezných nástrojů selektivní postup a velkou pečlivost. K nejrozšířenějším obráběcím operacím při zpracování těchto materiálů patří řezání, soustružení, frézování a vrtání. [4], [7], [11], [14], [21]

Další součástí kompozitu je výztuž. Výztuž je obvykle tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka kompozitu. Může být částicová nebo vláknenná.



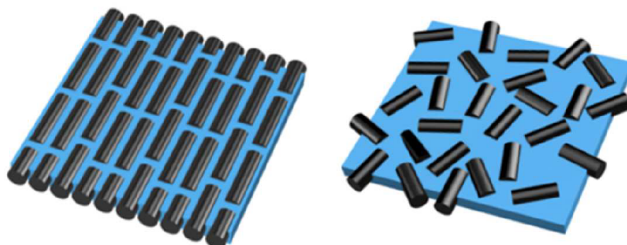
Obrázek 3: Rozdělení kompozitních materiálů [15]

2.1.1 Vláknenná výztuž

Vláknenná výztuž je velmi často využívána u kompozitních materiálů. Pro vlákna je specifické, že jeden rozměr je výrazně větší oproti dvěma ostatním.

Vlákna mohou být krátká nebo dlouhá. Krátká vlákna se vyznačují tím, že délka vlákna je menší než stonásobek průměru. Dlouhá vlákna mají stokrát větší délku, než je jejich průměr. U kompozitních materiálů, které jsou vyztuženy vlákny, mají tato vlákna zhruba až o dva řády vyšší pevnost a tuhost v porovnání s matricí. To má vliv na ohybové a tahové vlastnosti kompozitu. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny materiálem vláken, jejich množstvím

a rovněž i jejich orientací – nejvyšší pevnost je ve směru vláken. Vlákná mohou být usprádaná v jednom či ve dvou směrech. Mohou však být uspořádaná i zcela náhodně.



Obrázek 4: Sjednocená orientace vláken a nahodilá orientace vláken [21]

S rostoucí délkou zatěžovaného vlákna dochází k poklesu jeho pevnosti. Pokud je potřeba pevnost zvýšit, je možné zkrátit vlákno či zmenšit jeho průměr. Lze říci, že kompozitní materiály mají velmi dobré mechanické vlastnosti. Poměr pevnosti a hmotnosti je mnohem lepší než u kovových slitin. Podíl vláken může v některých kompozitech dosáhnout až 80 %. Druhy vláken používaných k výrobě kompozitních materiálů:

- anorganická (skelná, uhlíková, kovová, bórová, SiC),
- organická (aramidy – kevlar, polyamidy, polyethylen s ultra vysokou molekulovou hmotností),
- přírodní (bavlna, sisal, juta, celulóza).

Kompozitní materiál, kterým se experiment popsaný v této diplomové práci zabývá, obsahuje skelná vlákna. Skelná vlákna – jsou jedny z nejvíce používaných vláken. Skládají se z oxidu křemičitého, hlinitého, vápenatého, hořečnatého a boritého. Mají výborné technické vlastnosti – mají vysokou pevnost, vysokou hodnotu Youngova modulu v tahu, odolnost vůči vysokým teplotám, nehořlavost, dobrou chemickou odolnost a dobré elektrické vlastnosti. Mají vynikající tepelné a zvukově izolačních vlastnosti, které jsou velmi ceněné především ve stavebním průmyslu. Sklená vlákna jsou často používána z ekonomických důvodů. V současné době se věnuje větší pozornost výrobě a použití skelných vláken ve formě nekonečného vlákna.

Vlastnosti skelných vláken:

- hustota cca $2,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,
- tuhost zhruba jako hliník – 1/3 tuhosti oceli $E = 80 - 100 \text{ GPa}$,
- běžné lahvé – A sklo,
- rozpor mezi vysokou pevností a vysokou smáčivostí. [4], [7], [11], [14], [21]

2.2 Frézování kompozitních materiálů

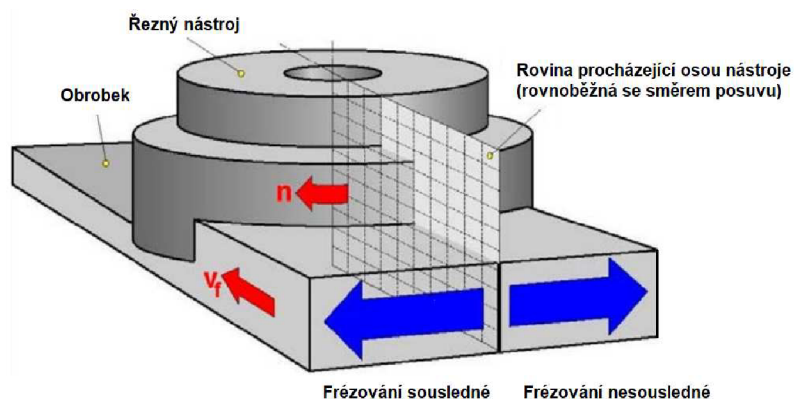
Cílem firem je výroba produktů, které již nebude potřeba dále opracovávat. Z důvodů vysokých požadavků zákazníka to však nelze vždy zajistit. Proto se k finálnímu opracování používá technologie třískového obrábění (soustružení, frézování, vrtání, řezání, apod.).

Nejčastěji obráběné kompozitní materiály obsahují vlákna uhlíková, skelná, borová, nebo aramidová, která jsou vázána polyesterovou, epoxidovou, nebo fenolovou pryskyřicí. Vzájemnou kombinací matrice a vyztužujících vláken lze dosáhnout rozdílných mechanických vlastností, které je nutno zohlednit při volbě vhodného rezného nástroje. Frézování kompozitních materiálů je zcela odlišné od frézování „jednoduchých“ materiálů. Při frézování kompozitních materiálů dochází k rychlejšímu opotřebení nástrojů z důvodů vyšší abrazivnosti vyztužujících vláken, které tvoří matici kompozitu.

V současné době je výběr rezných nástrojů opravdu rozsáhlý. Výběr nástrojů probíhá na základě nejen materiálových vlastností obráběného dílu, ale i na zkušenostech s obráběním. Lze volit různé typy nástrojů dle materiálu, povlaků a geometrií. [2], [6], [9]

2.2.1 Sousedné a nesousedné frézování

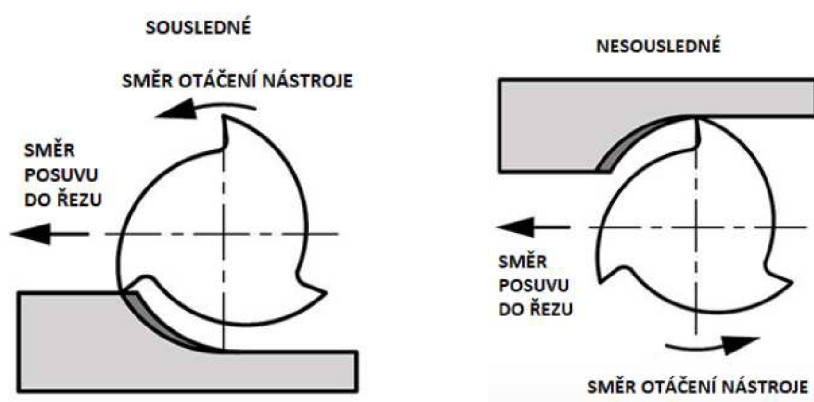
Požadavkem firmy bylo, aby vzorky byly frézovány sousledně i nesousledně z důvodů rozdílných požadavků zákazníků. Aby bylo možno dostát tomuto požadavku, byla na vzorku vyfrézována tzv. drážka, kde na jedné straně lze hodnotit delaminaci sousledného frézování a na straně druhé delaminaci nesousledného frézování. [19]



Obrázek 5: Dva druhy frézování – sousledné a nesousledné frézování [35]

2.2.2 Sousedné frézování

- fréza se otáčí ve směru posuvu. Zuby se postupně zařezávají do maximální tloušťky. Dochází k postupnému zmenšování třísky a tím klesá namáhání břitu,
- výhodou sousledného frézování je hladší obrobená plocha, příznivé působení řezné síly a vyšší trvanlivost nástroje,
- třísky jsou odváděny směrem dozadu za nástroj,
- při vodorovném frézování působí výslednice řezné síly směrem dolů, díky tomu je obrobek během obrábění neustále přitlačován směrem k pracovnímu stolu a má tak menší tendenci se rozvíbrovat. [1], [2], [19]



Obrázek 6: Znárodnění směru otáčení řezného nástroje [19]

2.2.3 Nesousledné frézování

- fréza se otáčí proti směru posuvu, průřez třísky se postupně zvětšuje od 0 do maximální tloušťky,
- tření nástroje o materiál je větší na začátku řezu. To má za následek rychlejší opotřebení nástroje a zkrácení jeho životnosti,
- třísky jsou nástrojem vyklíženy směrem před nástroj. Dochází k jejich opětovnému frézování. V případě tvrdších materiálů může docházet k přetěžování nástroje,
- síly vzhůru vytvářené při vodorovném frézování mají tendenci zvedat obrobek, pro zmenšení vytvořeného zdvihu je zapotřebí pevného upnutí obráběného materiálu a zamezení možnosti jeho průhybu, příp. použití vakuového upínacího stolu.

Sousledné frézování je dnes obecně výhodnějším způsobem obrábění, protože snižuje zatížení nástroje a umožňuje dosáhnout kvalitnějšího povrchu. Síly působící během frézování však mají tendenci odtlačovat nástroj směrem ven od obráběné hrany a kladou

tak vyšší nároky na tuhost celého stroje. Během nesousledného frézování má fréza sklon více zajiždět směrem do obrobku a může tak způsobit vyštípnutí materiálu. Přestože je sousledné frézování upřednostňovaným způsobem obrábění, nesousledné frézování je nepostradatelné a to obzvláště u menších CNC systémů. Nástroj je totiž během obrábění namísto odtlačování vtahován směrem do materiálu, což může mít sice při chybně nastavených řezných podmínkách vliv na kvalitu obrobené hrany (vyštípnutí). Zároveň však umožňuje dosažení vyšší rychlosti posuvu do řezu a tudíž i zkrácení potřebného výrobního času. Dnes se na moderních CNC strojích používá téměř výhradně sousledné frézování, protože přináší delší trvanlivost nástroje. Naopak u starších strojů, u kterých se nepoužívají kuličkové šrouby k ovládání posuvů, se musí vždy použít posuv nesousledný. [1], [2], [19]

2.3 Nástroje vhodné pro frézování kompozitních materiálů

Největší komplikace při obrábění kompozitních materiálů tvoří vlákna. Velká část obráběných kompozitních dílů je vyztužena skelnými vlákny. V Mohsově stupnici tvrdosti je sklo na stejném stupni jako slinuté karbidy, karbidy křemíku a boru. Vyšší tvrdost mají pouze nástroje z polykrystalického diamantu. Ostatní materiály, které jsou používány na výrobu řezných nástrojů, podléhají intenzivnímu opotřebení. S rostoucím opotřebením břitu nástroje dochází ke zhoršení odřezávání materiálu a v důsledku toho k delaminaci obráběného materiálu, nebo k lámání vláken. Dalším problémem bývá orientace vláken. Vlákna bývají různě orientována – obráběný materiál je silně anizotropní.

Problémem při obrábění nemusí být jen plnivo, ale také pojivo (matrice). Může docházet ke špatnému odvádění tepla z místa řezu. Při obrábění kovových materiálů odchází většina tepla v tříse, u obrábění kompozitních materiálů však vstupuje do řezného nástroje. S teplotou souvisejí i další problémy při obrábění – kompozitní materiály mají nízkou tepelnou odolnost. To způsobuje, že při vyšších teplotách (100 – 300 °C) nejsou stálé. Pokud je překročena tzv. kritická teplota, mohou se na povrchu začít objevovat spálené oblasti. Teplota tání pojiva tedy často určuje řezné rychlosti a posuvy při obrábění.

Teplotu lze snížit použitím chladicí kapaliny, která zároveň snižuje vliv abraze skelných vláken na nástroji. Chladicí kapalinu však nelze použít u všech materiálů. Důvodem je nasákavost obráběného materiálu. Z tohoto důvodu nebude chladicí kapalina v experimentu použita.

Při obrábění kompozitních materiálů vyztužených skelnými vlákny se tvoří drobné částičky třísky, které se z místa řezu šíří do prostoru. Ty jsou pro člověka velice škodlivé. Pokud se při obrábění kompozitních materiálů použije chladicí kapalina, jsou tyto drobné třísky odplavovány. Vzniká tu problém se zanášením filtrů a jejich usazování na dně nádrže. V případě, že nelze chladicí kapalinu použít, drobné mikročástice vzniklé při obrábění víří vzduchem a hrozí riziko vdechnutí. Při vdechnutí se tyto mikročástice mohou v těle držet i několik desítek let. Z tohoto důvodu se při třískovém obrábění aplikují výkonné odsávací systémy do pracovního prostoru stroje. [6], [10], [12], [20], [24], [36]

2.3.1 Materiály pro řezné nástroje

V současné době je možné pro obrábění kompozitních materiálů použít širokou škálu řezných nástrojů. Při obrábění kompozitních materiálů je největším problémem vznikající teplo, které z důvodu špatné vodivosti obráběného materiálu odchází třiskou a obráběným materiálem pouze ve velmi malém množství. Je tedy nutné volit takové materiály, které dobře odolávají vysokým teplotám a také abrazivním účinkům vláken obsažených v kompozitních materiálech. Z tohoto důvodu jsou nejčastěji využívány nástroje z rychlořezné oceli, slinutých karbidů, polykrystalického diamantu atd.. Každý materiál má svá specifika.

Požadavky kladené na nástrojový materiál:

- tvrdost nástroje musí být vyšší než pevnost obráběného materiálu,
- nástroj musí být odolný proti otěru, houževnatý, musí mít značnou pevnost v ohybu a tepelnou vodivost,
- nástroj musí být stálý za vysokých teplot,
- nástroj musí mít odolnost proti vzniku trhlin,
- nástroj musí mít vysokou řezivost, tj. schopnost oddělovat třísku. [3], [20], [36]

2.3.1.1 Rychlořezné oceli

Nástroje z rychlořezné oceli jsou pro obrábění kompozitních materiálů použitelné pouze v omezené míře. Jejich tvrdost je ve srovnání s jinými nástrojovými materiály nižší, a tedy i odolnost proti abrazivnímu opotřebení – jejich životnost je tedy velmi krátká. Mají také nižší tepelnou vodivost ve srovnání s nástroji ze slinutých karbidů. Aplikací otěruvzdorných povlaků lze rychlost opotřebení redukovat jen částečně. [3], [20], [36]

2.3.1.2 Slinuté karbidy

Nástroje ze slinutých karbidů mají v porovnání s nástroji z rychlořezných ocelí delší trvanlivost i lepší tepelnou vodivost. Mechanické vlastnosti slinutých karbidů jsou závislé především na obsahu pojiva a velikosti zrna karbidické fáze. Výrobci řezných nástrojů doporučují pro účely obrábění kompozitních materiálů s obsahem skelných a uhlíkových vláken jemnozrné slinuté karbidy, které mají vyšší hodnoty tvrdosti.

Nejvhodnějším materiálem řezných nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů jsou označovány nástroje z polykrystalického diamantu, případně nástroje s diamantovými povlaky. Vysoká tvrdost diamantu umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu opotřebení vyztužujících vláken. Tento materiál má vynikající tepelnou vodivost, která zaručuje rychlý odvod tepla z oblasti řezu. Tím lze docílit vysoké kvality obrobeného povrchu a dlouhé trvanlivosti nástroje. Trvanlivost je mnohonásobně vyšší než u nástrojů ze slinutých karbidů. Zvýšení trvanlivosti také snižuje tvorbu delaminace – při nadměrném opotřebení břitů dochází k odlamování vláken, ne k jejich řezání. [3], [20], [36]

2.3.2 Řezné podmínky

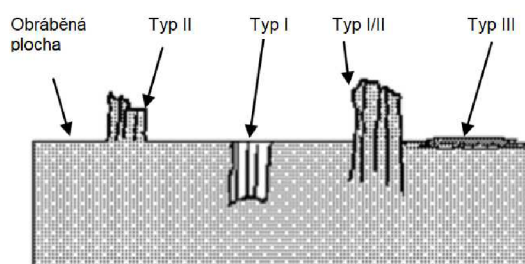
Stanovení řezných podmínek je náročnější než pro obrábění ocelí. Je nutné zajistit, aby při řezu nevznikaly vysoké teploty a tím nebyla ovlivněna matrice. Je však potřeba zajistit vysoké řezné rychlosti, aby nedocházelo k vytrhávání vláken. V současné době se mnoho výrobců řezných nástrojů zabývá výrobou nástrojů speciálně pro obrábění kompozitních materiálů.

2.3.3 Delaminace

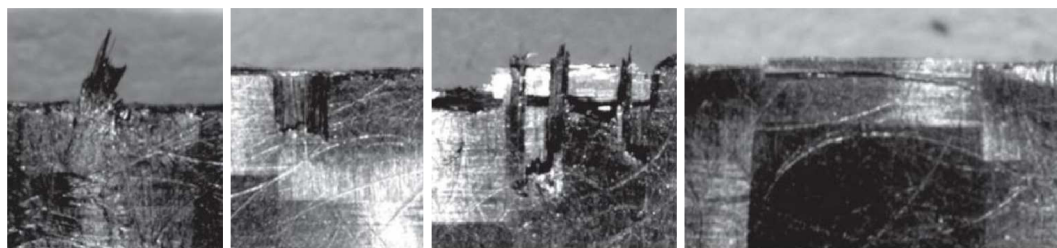
Delaminace je mechanické poškození materiálu, kdy dochází k postupnému porušování vazeb u jednotlivých vrstev materiálu – při obrábění kompozitních materiálů dochází v jejich povrchové vrstvě k různým poškozením materiálu. Poškození jsou svým vzhledem, mechanismy vzniku a porušováním odlišné než u kovových materiálů. Jedním z nejčastějších problémů při obrábění kompozitních materiálů je delaminace. Běžně se s ní lze setkat u vrtání nebo frézování vrstvených kompozitů. Delaminace se objevuje jak na vstupu nástroje do materiálu, tak i u jeho výstupu. Delaminace vzniká ve dvou fázích. První fází je doba, kdy síla od příčného ostří působí na neobrobenou plochu materiálu, dosáhne kritické hodnoty a končí poté, co ostří pronikne skrz materiál. Následuje druhá fáze, kdy se následkem tlaku nástroje delaminace rozvíjí. Delaminace skončí, jakmile příčné ostří prostoupí na povrch obrobeného dílu.

Delaminaci povrchových vrstev lze snadno rozpoznat a kvantifikovat pomocí optického mikroskopu. Existují 3 typy delaminací. Typ delaminace souvisí s orientací vláken uvnitř kompozitu. Typy jednotlivých delaminací jsou schematicky znázorněny na obrázcích 5 a 6:

- k delaminaci I. typu dochází v tzv. delaminační zóně. Dojde k odlomení vláken a jejich odstranění z obrobené hrany do určité hloubky,
- typ II je charakteristický neodříznutými vlákny vyčnívající ven z obrobené hrany. K tomuto typu delaminace dochází tím, že se vlákna mohou ohnout, a tím se vyhnou postupujícímu nástroji. Následně odpruží zpět do své původní polohy (dle jejich původní orientace),
- typ I/II je kombinací delaminace typu I a II,
- typ III je charakteristický částečně odtrženými vlákny od povrchu. Povrch je pak roztřepený.



Obrázek 7: Znázornění jednotlivých typů delaminací [23]



Obrázek 8: Mikroskopické zobrazení jednotlivých typů delaminací [23]

Delaminace souvisí s množstvím a orientací plniva. Typ a velikost delaminace závisí také na orientaci vláken v krajních vrstvách. Delaminace bývá často způsobena nedostatečnou kvalitou ostří, případně chybně zvolenými reznými podmínkami. Delaminace se vyznačuje odlupováním jednotlivých vrstev kompozitu. Rozsah delaminace vyskytující se během obrábění se často používá jako indikátor kontroly kvality. [1], [13], [23]

2.3.4 Vznik třísky

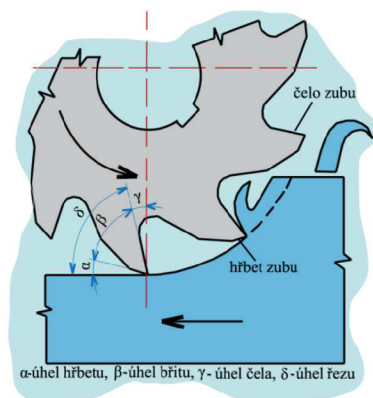
Proces tvoření třísky je při obrábění velice důležitý – ovlivňuje integritu obrobené plochy. Pokud by byly chybně nastaveny řezné podmínky, může dojít k popraskání obrobené plochy nebo k jiným vadám materiálů. V důsledku mechanického namáhání může v oblasti řezu docházet ke vzniku trhlin a delaminaci obráběného materiálu.

2.3.5 Geometrie bříty

Geometrie je jedním z významných faktorů při navrhování vhodného nástroje pro obrábění kompozitních materiálů. Správná volba geometrie řezného nástroje mnohonásobně snižuje množství vzniklého tepla z důvodu nižší adheze, čímž prodlužuje trvanlivost nástroje. Lze tedy říci, že je výhodnější používat nástroje s výrazně pozitivní geometrií bříty [24].

Břit je tvořen dvěma plochami, plochou čela a plochou hřbetu (u břitů jednostranných) nebo dvěma čelními plochami (u břitů symetrických). U každého ostří rozeznáváme úhel hřbetu, který svírá rovina hřbetu s obráběnou plochou, úhel bříty (svírá ho čelo s plochou hřbetu) a úhel čela, který svírá plocha čela s rovinou kolmou k obráběné ploše.

Nesprávně zvolené řezné úhly mají vliv na otupení nástroje a zvýšení řezného odporu. To vede k větší námaze při práci s nástrojem. Pravidlem je, že pro řezání do měkčích materiálů jsou voleny malé úhly bříty, pro tvrdé a houževnaté materiály jsou voleny úhly bříty větší. [3], [20], [35]



Obrázek 9: Zobrazení působících řezných sil [35]

2.3.6 Opotřebení řezného nástroje

Jedná se o postupně probíhající proces, při kterém dochází ke zvětšení poloměru zaoblení ostří, zhoršení drsnosti plochy čela a hřbetu v místech styku s třískou a plochou řezu a mění se postupně geometrie bříty. Jednotlivé druhy opotřebení jsou znázorněny na obrázku 11.

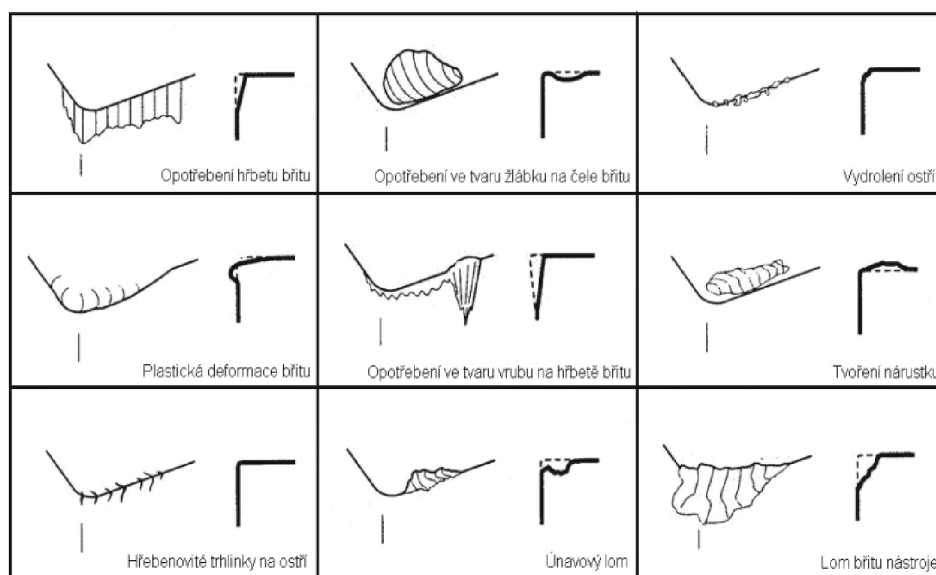
Během obráběcího procesu dochází ke kombinovanému zatěžování břitu. Hlavními faktory opotřebení jsou fyzikální a mechanické vlastnosti nástrojového a obráběného materiálu (řezná rychlost, posuv, šířka záběru ostří, řezné prostředí), řezné podmínky, druh operace (hrubování, dokončování), geometrie nástroje atd..

Opotřebení řezného nástroje je spojeno například s horší kvalitou obrobené plochy, růstem řezných sil, nadměrným hlukem atd..

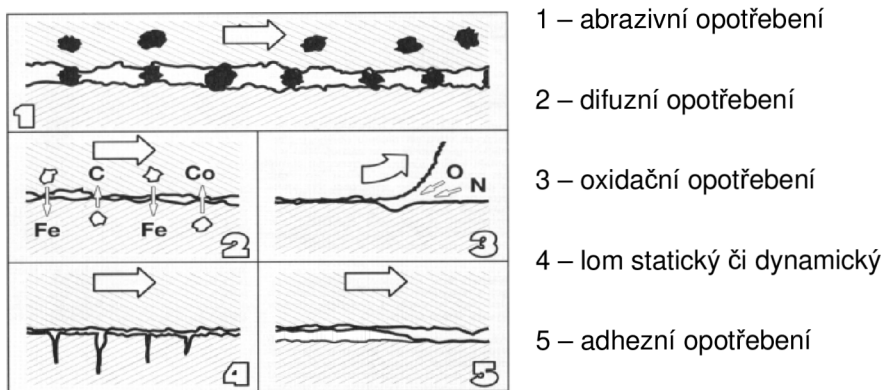
Podle toho, který druh namáhání převládá, rozlišujeme:

- opotřebení čela, hřbetu nebo špičky nástroje otěrem,
- mechanické rozrušování břitu,
- otupení ostří ztrátou tvrdosti. [24]

Jednotlivé typy opotřebení lze vidět na obrázku 10.



Obrázek 10: Různé typy opotřebení nástroje [24]



Obrázek 11: Jednotlivé typy opotřebení nástrojů [24]

3 METODICKÁ ČÁST

Metodika experimentu je část diplomové práce, kde jsou detailně popsány jednotlivé kroky experimentu. Tato část obsahuje přípravu vzorků, popis obráběných materiálů, postupy obrábění a měření zkoumaných veličin. Pozornost je zaměřena především na praktickou využitelnost – na opotřebení řezného nástroje, síly působící při frézování na obráběný povrch, na drsnosti povrchu obráběné plochy, na delaminaci a na opotřebení řezného nástroje – výměnné břitové destičky (dále jen VBD). Experiment probíhal v laboratořích Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci. Poskytnuté vzorky jsou ze standardní výroby firmy Autoneum CZ, s.r.o..

3.1 Zkušební vzorky

Pro plánovaný experiment byl zvolen Polypropylen od firmy Borealis AG, skelné vlákno, barvivo a aditivum. Přidávané aditivum zlepšuje odolnost proti chemikáliím a slouží ke zpomalení stárnutí daného materiálu. Matricí je Polypropylen, výztuží je skelné vlákno. Vzorky byly odebrány ze standardní výroby. Jedná se o proces lisování plastů, kdy vzorky jsou v podstatě vyseknutý odpad z vylisovaného dílu.



Obrázek 12: Vstupní materiál – skelné vlákno + ukázka technologie jeho zpracování

Uspořádání vláken ve vzorcích je nahodilé (viz obrázek 13) díky způsobu výroby. Díky tlaku, kterým působí lis na materiál během výroby, nelze zajistit pravidelné uspořádání skelných vláken. Orientace vláken má vliv na delaminaci.



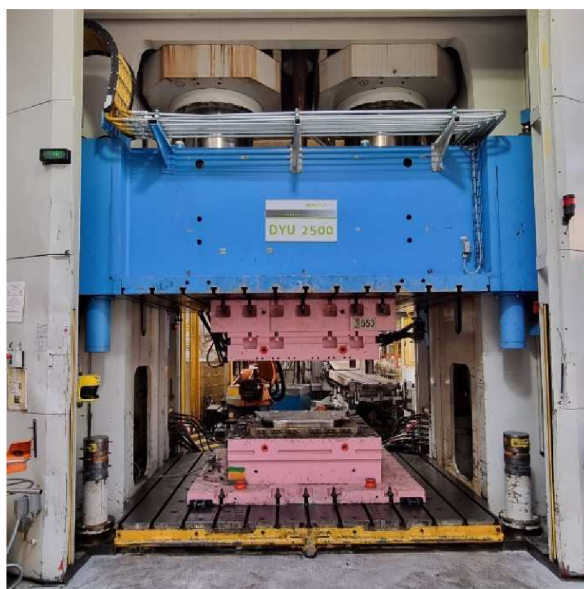
Obrázek 13: Zobrazení uspořádání vláken ve vzorku [15]

3.2 Strojní zařízení použité v rámci experimentu

Tato podkapitola obsahuje informace o všech strojích, měřidlech a měřicích zařízeních, které byly v průběhu experimentu použity.

3.2.1 Hydraulický lis Diffenbacher 2500

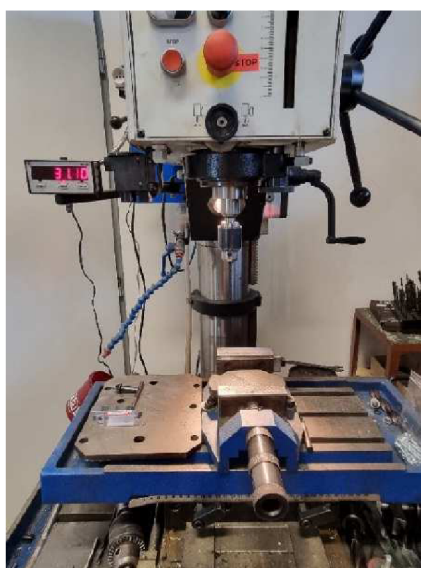
Hydraulický lis zajistí lisování a následné vyseknutí dílu. Lis byl použit k výrobě vzorků. Použitý lis je zobrazen na obrázku 14.



Obrázek 14: LiS DYU – součást strojového parku firmy Autoneum CZ, s.r.o.

3.2.2 Vrtačka horizontální HELTOS VS 40

Do 8 kusů vyseknutých dílů bylo nejdříve pomocí horizontální vrtačky HELTOS VS 40 (viz obrázek 15) vyvrtáno osm otvorů o průměru 5 mm, které byly následně spojeny šroubem o délce 25 mm a dotaženy momentovým klíčem, aby bylo zajištěno stejné spojení vzorků na všech místech. Tím vznikl požadovaný vzorek. Důvodem spojování vzorků byla simulace budoucího frézování dílů.



Obrázek 15: Vrtačka HELTOS VS 40

3.2.3 Pásová pila ARG 300 Plus H.F.

Vzorek byl následně ořezán na pile Pásové pile ARG 300 Plus H.F. (viz obrázek 16) tak, aby vznikla hrana pro upnutí do frézky FNG 32.



Obrázek 16: Pásová pila ARG 300 Plus H.F.

3.2.4 Frézka FNG 32

Frézka FNG 32 od výrobce TOS Čelákovice (obrázek 17).



Obrázek 17: Frézka FNG 32 výrobce TOS Čelákovice

Frézka byla použita nejdříve k úpravě vzorků, kdy bylo provedeno ofrézování bočních částí vzorku pro zarovnání nerovností (viz obrázek 18), aby bylo možné vzorek upnout. Dále byla frézka použita k samotnému experimentu – k frézování vzorků kompozitu s obsahem skelných vláken.



Obrázek 18: Obrábění boční hrany vzorku – zarovnání nerovností





3.3 Nástroje použité v rámci experimentu

3.3.1 Výměnné břitové destičky

Pro daný experiment byly firmou Dormet Pramet, s.r.o. poskytnuty tyto výměnné břitové destičky, dále jen VBD:

1. TNGX 100404FR-FA:HF7 – VBD bude dále v textu označována jako VBD A,
2. TNGX 100404FR-FA:M0315 – VBD bude dále v textu označována jako VBD B,
3. TNGX 100404SR-M:M9340 – VBD bude dále v textu označována jako VBD C,
4. TN4SR-F:M9340 – VBD bude dále v textu označována jako VBD D.

Tabulka 1: Přehled jednotlivých VBD použitých při experimentu

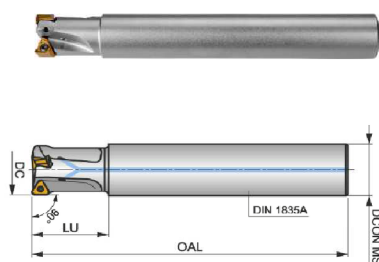
Parametry jednotlivých VBD dle výrobce firmy PRAMET, s.r.o.					
Foto	Označení výrobce	Geometrie	Povlak	Doporučené použití dle výrobce	Cena [Kč/ks]
	TNGX 100404FR-FA:HF7	geometrie s ostrou řeznou hranou	nepovlakovaný jemnozrný WC-Co sli nutý karbid	vhodný pro obrábění neželezných materiálů (kovy včetně slitin bez znatelného množství železa)	468,-
	TNGX 100404FR-FA:M0315	geometrie s ostrou řeznou hranou	jemnozrný WC-Co sli nutý karbid s PVD povlakem	vhodný pro obrábění neželezných materiálů (kovy včetně slitin bez znatelného množství železa)	477,-
	TNGX 100404SR-M:M9340	geometrie se zaoblenou řeznou hranou a fazetkou	WC-Co sli nutý karbid s MT-CVVD povlakem	vhodný pro ocel a ocelolitinu, pro korozivzdornou ocel	438,-
	TN4SR-F:M9340	geometrie se zaoblenou řeznou hranou a fazetkou	WC-Co sli nutý karbid s MT-CVVD povlakem	vhodný pro ocel a ocelolitinu, pro korozivzdornou ocel	438,-

Výběr VBD byl proveden s ohledem na potřeby experimentu. Byly vybrány 2 VBD vhodné pro obrábění ocelí a 2 VBD vhodné pro obrábění kompozitních materiálů. Výběr destiček je kombinací geometrií, který daný výrobce, společně s různými druhy materiálů a povlaků nabízí. VBD byly voleny i s ohledem na ekonomickou stránku tak, aby byla výroba

co neekonomičtější – byly vybrány VBD, které disponují 6-ti břity. VBD jsou výrobcem doporučovány pro frézování na ekonomické fréze s označením 25A4R034A25-STM10-C.

3.3.2 Čelní válcová stopková fréza 25A4R034A25-STM10-C

Při experimentu byla použita čelní válcová stopková fréza 25A4R034A25-STM10-C (viz obrázek 19). Jedná se o čelní rohovou frézu s dvojitou negativní geometrií. Fréza disponuje vnitřním chlazením a nerovnoměrnou zubovou roztečí pro čelní frézování, frézování do rohu s malou hloubkou řezu a frézování plitkých drážek s maximální hloubkou řezu 5.0 mm. Lze ji tedy použít i na frézování jiných materiálů. [20]



Obrázek 19: Stopková fréza 25A4R034A25-STM10-C [20]

Řezné podmínky byly stanoveny na základě mnoha doporučení udávaných v zahraničních člancích, zabývajících se problematikou frézování kompozitních materiálů s obsahem skelných vláken a po konzultaci se zástupcem firmy Dormet Pramet, s.r.o.. Z tohoto důvodu byly zvoleny následující řezné parametry uvedené v tabulce 2.

Tabulka 2: Přehled parametrů použitých pro jednotlivé vzorky

Přehled parametrů použitých při experimentu				
VBD	Kombinace parametrů			
A	$v_{c1}f_1 = 60/100$	$V_{c1}f_2 = 60/300$	$V_{c2}f_1 = 120/100$	$v_{c2}f_2 = 120/300$
B	$v_{c1}f_1 = 60/100$	$V_{c1}f_2 = 60/300$	$V_{c2}f_1 = 120/100$	$v_{c2}f_2 = 120/300$
C	$v_{c1}f_1 = 60/100$	$V_{c1}f_2 = 60/300$	$V_{c2}f_1 = 120/100$	$v_{c2}f_2 = 120/300$
D	$v_{c1}f_1 = 60/100$	$V_{c1}f_2 = 60/300$	$V_{c2}f_1 = 120/100$	$v_{c2}f_2 = 120/300$

3.4 Měřicí zařízení použita v rámci experimentu

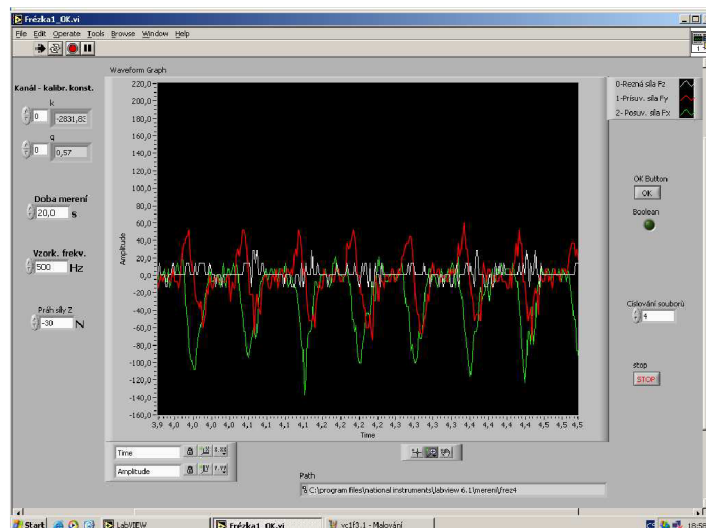
3.4.1 Piezoelektrický dynamometr KISTLER

K měření působících sil byl v průběhu experimentu použit třísloužkový piezoelektrický dynamometr KISTLER s připojeným zesilovačem. Náboj z piezoelektrického snímače musí být zesilován. K tomu sloužil připojený nábojový zesilovač (viz obrázek 20).



Obrázek 20: Piezoelektrický dynamometr KISTLER – nábojový zesilovač

Signál z nábojového zesilovače vstupuje do počítače, kde se data zpracovávají softwarem LabVIEW (obrázek 21), který zobrazuje výsledky do grafu (obrázek 21). V tomto grafu byl následně vybrán detail 5-ti míst, ze kterých bylo odečteno 5 hodnot.



Obrázek 21: Zobrazení výsledků softwarem LabVIEW

Před počátkem měření musel být dynamometr patřičně zkalibrován. Toho se docílilo za pomoci siloměru (obrázek 22). Siloměrem se tlačilo na dynamometr ve směru x, y i z určitou silou a software vypočítal patřičné kalibrační konstanty. Tato kalibrace musela probíhat pro každou osu zvlášť.

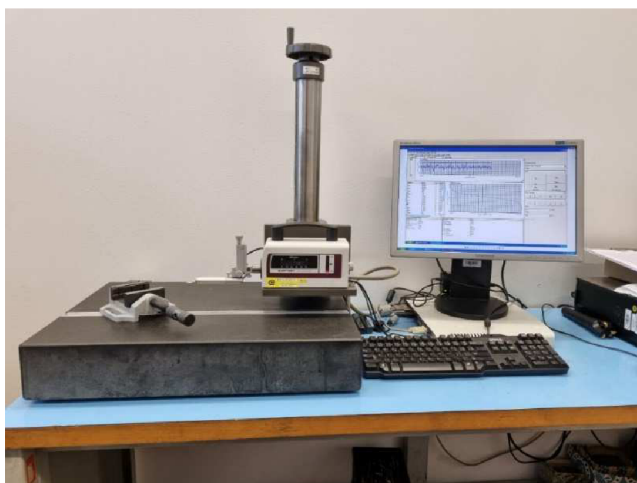


Obrázek 22: Siloměr sloužící ke kalibraci piezoelektrického dynamometru KISTLER

Zpracování naměřených dat z dynamometru Kistler probíhá v programu LabVIEW 6.1, který udává výsledek v Newtonech. Výsledky měření v LabVIEW 6.1 byly zpracovány a použity dále v experimentální části diplomové práce. Program LabVIEW 6.1 je nastaven ukazovat hodnoty naměřené dynamometrem Kistler. Graf z daného měření byl rozdělen pro snadnější odečtení dat na statistickou analýzu na 5 oblastí. Podstatné je, aby v oblasti bylo alespoň 5 píků. Princip odečítání je v tom, že se měří špičky píků řezné síly.

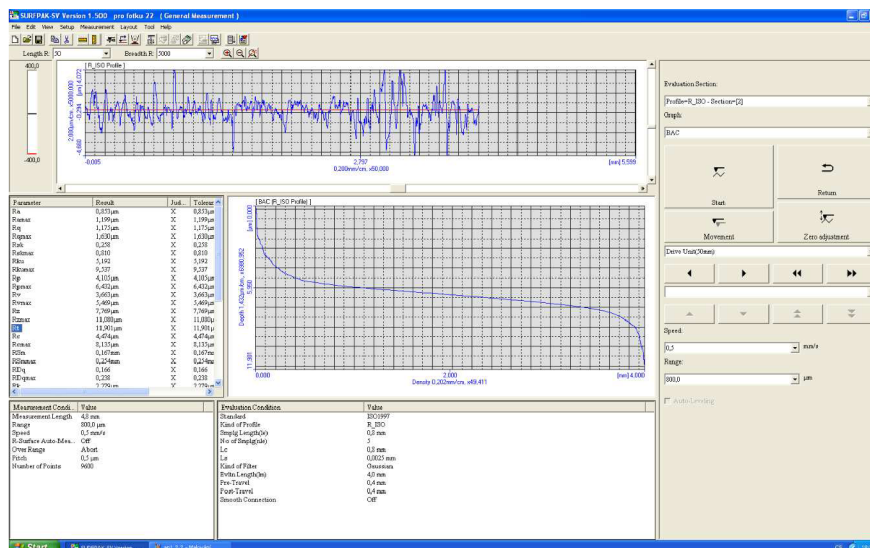
3.4.2 Mitutoyo SV-2000 N2

Vyhodnocení drsnosti povrchu probíhalo s použitím laboratorní profiloměru značky Mitutoyo SV-2000 N2.



Obrázek 23: Laboratorní profiloměr Mitutoyo SV-2000 N2

U měření drsnosti bylo prováděno 5 měření na 5-ti úsecích u každého z předem definovaných parametrů. Grafický výstup měření drsnosti povrchu lze vidět na obrázku 24.

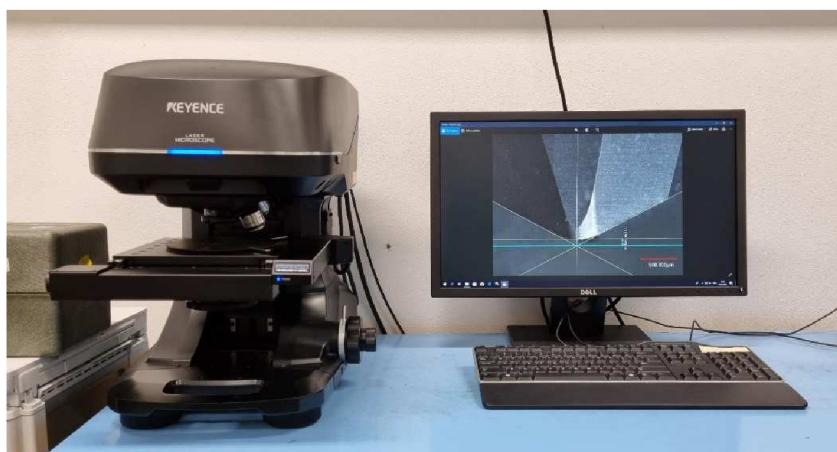


Obrázek 24: Výstup ze softwaru Surfpack

Profilometr byl použit pro získání hodnoty drsnosti R_a . R_a je hodnota průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu.

3.4.3 Keyence VK-X1100

Součástí experimentu bylo i měření opotřebení břitu nástroje. K měření byl použit mikroskop s 3D laserovým skenováním VK-X3000 firmy Keyence, použitým vyhodnocovacím softwarem byl VK Viewer.



Obrázek 25: mikroskop s 3D laserovým skenováním VK-X3000 firmy Keyence

U měření opotřebení řezného nástroje bylo prováděno 6 měření na 2 kusech od každé VBD. Hodnoty byly následně zprůměrovány. Břítová destička byla přeměřena vždy po ujetí celé délky obrobku – 122,5 mm. Celková ujetá dráha břitu destičky se rovnala 66 m.

Výpočet dráhy nástroje:

Obvod kruhové výseče nástroje:

$$o = \pi \cdot R = \pi \cdot 12,5 = 39,27 \text{ mm}$$

Posuv na zub:

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} = \frac{25}{1530 \cdot 1} = 0,016 \text{ mm}$$

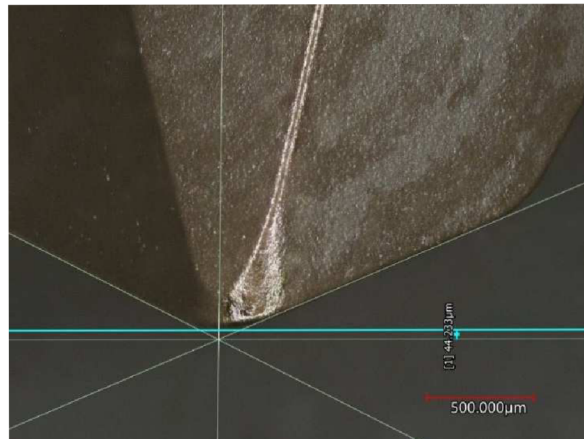
Celková ujetá vzdálenost nástroje:

$$L = 122,5 - 12,5 = 110 \text{ mm}$$

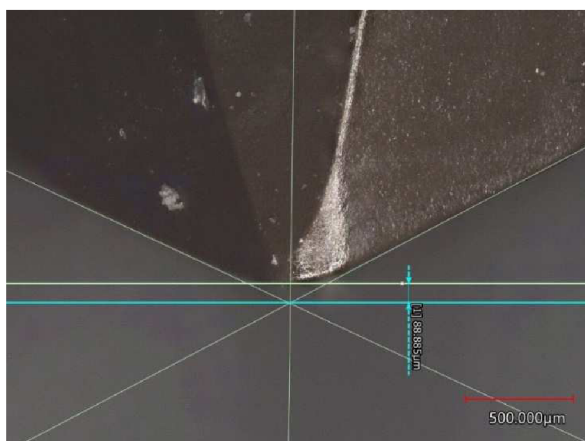
Ujetá dráha nástroje – 1 úsek

$$s = o \cdot L \cdot z = 39,27 \cdot 110 \cdot 0,016 = 65,595 \cong 66 \text{ m}$$

K vyhodnocení opotřebení řezného nástroje byl použit mikroskop značky Keyence.



Obrázek 26: Zobrazení nové VBD na mikroskopu od firmy Keyence



Obrázek 27: Zobrazení opotřebení VBD na mikroskopu od firmy Keyence

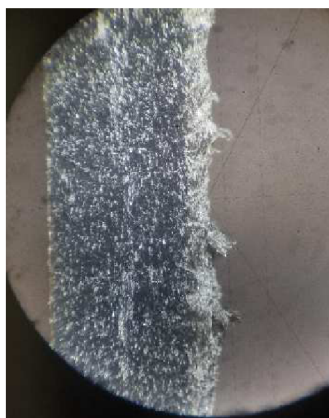
3.4.4 Dílenský mikroskop Carl Zeiss

Mikroskop s 3D laserovým skenováním VK-X3000 firmy Keyence byl společně s dílenským mikroskopem značky Carl Zeiss použit k měření delaminace. Delaminace byla měřena na 5-ti různých místech.

Na základě mnoha doporučení udávaných v zahraničních člancích, zabývajících se problematikou frézování kompozitních materiálů s obsahem skelných vláken, byla stanovena mez delaminace na maximální hodnotu 1500 μm.



Obrázek 28: Dílenský mikroskop značky Carl Zeiss



Obrázek 29: Detail delaminace materiálu na dílenském mikroskopu



Obrázek 30: Delaminace na Keyence

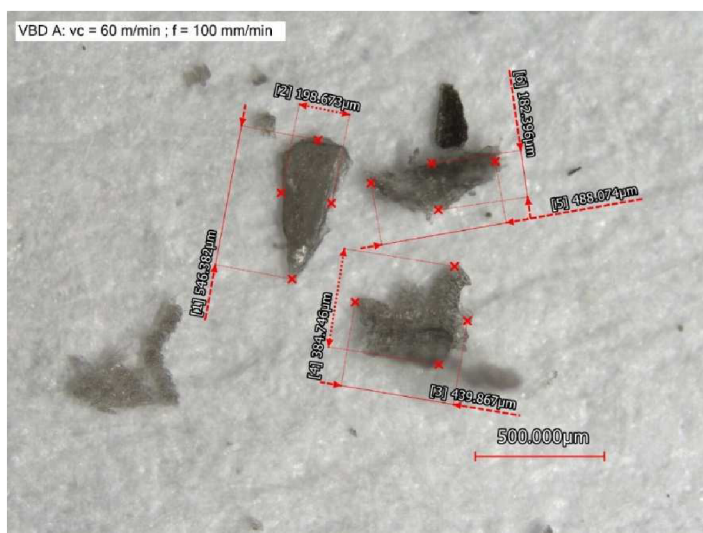


Obrázek 31: Delaminace na Keyence – detail s hodnotami

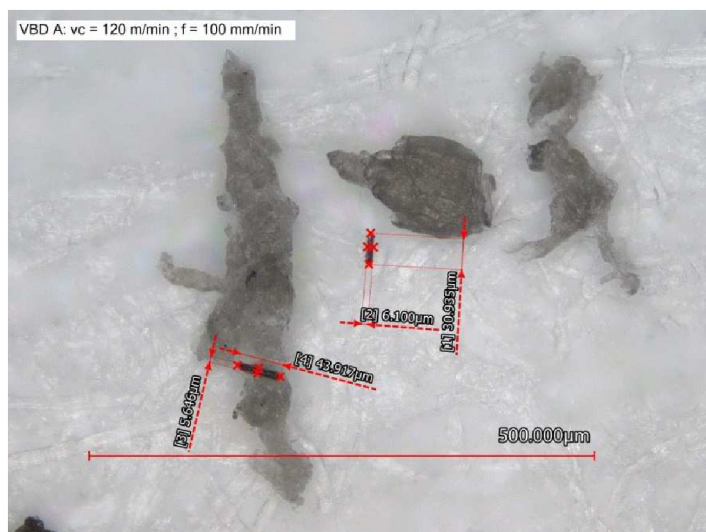
3.4.5 FE SEM Zeiss Ultra Plus

Elektronový mikroskop FE SEM Zeiss Ultra Plus) byl využit ke sledování submikrometrových délek vláken, k hodnocení charakteru lomů vláken a popisu nanometrových a submikrometrových částic vznikajících při procesu obrábění.

Drobné mikročástice z nástroje byly odebrány, aby byly dále analyzovány na mikroskopu SEM. V současné době je kladen velký důraz na bezpečnost práce a mnohé studie ukazují, že obrábění kompozitních materiálů s obsahem skla bývá velký problém, neboť mikročástice se mohou dostat do lidského těla, kde se díky svým ostrým hranám doslova zabodávají do plic a způsobují tím nenávratné poškození lidského organismu. Na obrázku 32 a 33 lze vidět mikročástice, které byly odebrány přímo z nástroje.



Obrázek 32: Detail mikročástic podrobených zkoumání na SEM



Obrázek 33: Detail skelných vláken z odebraných mikročásti podrobených zkoumání na SEM

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola obsahuje informace o naměřených hodnotách týkajících se řezných sil, drsností povrchů, velikosti opotřebení nástroje a velikosti delaminací pro jednotlivé řezné podmínky. Souvislosti mezi jednotlivými faktory, nezbytnými pro správný výběr nástroje, jsou uvedeny v následujících tabulkách a grafech.

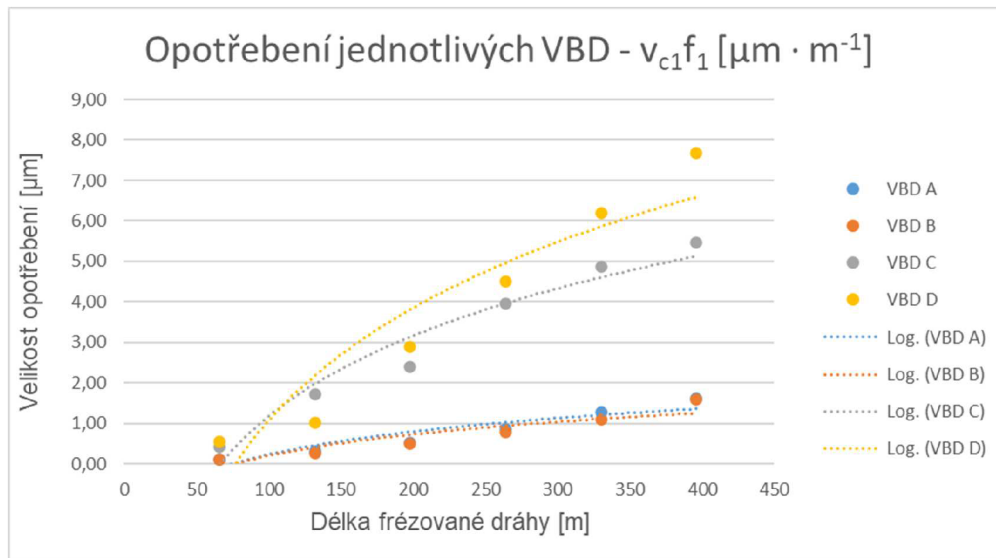
4.1 Hodnocení opotřebení nástroje

V rámci hodnocení opotřebení jednotlivých VBD bylo hodnoceno opotřebení VBD v závislosti na dráze. Byla měřena velikost opotřebení nástroje při frézování. Postup měření je popsán v metodice měření v podkapitole 3.4.

U všech VBD bylo provedeno měření opotřebení VBD s využitím laboratorního mikroskopu značky Keyence. Výsledky byly naměřeny a následně graficky zpracovány do grafů. V tabulkách je u jednotlivých hodnot vždy uváděna i nejistota měření.

Tabulka 3: Opotřebení jednotlivých VBD při řezných podmínkách $v_{c1}f_1$

Opotřebení jednotlivých VBD při řezných podmínkách $v_{c1}f_1 = 60/100$ [μm]				
	Opotřebení jednotlivých VBD [μm]			
Dráha [m]	VBD A	VBD B	VBD C	VBD D
66	0,11 $\pm 0,02$	0,11 $\pm 0,01$	0,41 $\pm 0,02$	0,54 $\pm 0,03$
132	0,32 $\pm 0,03$	0,26 $\pm 0,02$	1,72 $\pm 0,03$	1,03 $\pm 0,03$
198	0,53 $\pm 0,02$	0,51 $\pm 0,03$	2,39 $\pm 0,02$	2,88 $\pm 0,01$
264	0,87 $\pm 0,03$	0,79 $\pm 0,02$	3,95 $\pm 0,02$	4,51 $\pm 0,03$
330	1,29 $\pm 0,02$	1,09 $\pm 0,02$	4,86 $\pm 0,02$	6,19 $\pm 0,01$
396	1,63 $\pm 0,02$	1,59 $\pm 0,02$	5,47 $\pm 0,02$	7,67 $\pm 0,02$



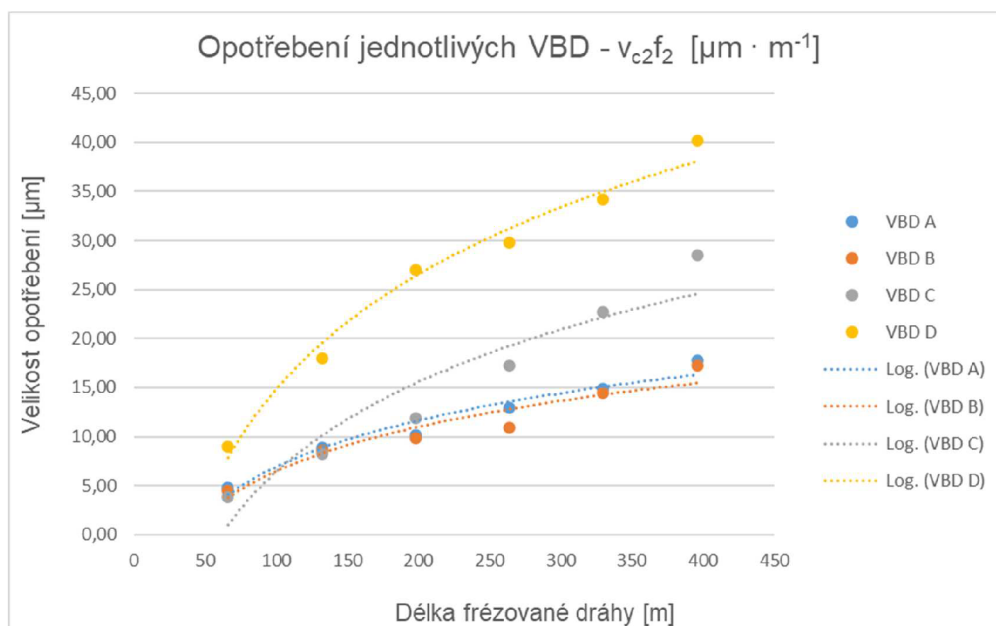
Graf 1: Závislost opotřebení jednotlivých VBD při řezných podmínkách $v_{c1}f_1$

Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 3 a graficky zpřehledněných v grafu 1 lze vidět, že při použití řezných podmínek $v_{c1}f_1 = 60/100$ se opotřebení nástrojů zvyšovalo s rostoucím délkou/dráhou frézování.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že nejvyšší opotřebení nástroje bylo naměřeno u VBD D, kde hodnota opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $VBD = 7,67 \mu\text{m}$. Naopak nejmenší opotřebení bylo naměřeno, pro stejnou frézovanou dráhu 396 m, u VBD B = $1,59 \mu\text{m}$.

Tabulka 4: Opotřebení jednotlivých VBD při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

Opotřebení jednotlivých VBD při řezných podmínkách $v_{c2}f_2 = 120/300 \text{ [}\mu\text{m]}$				
	Opotřebení jednotlivých VBD [μm]			
Dráha [m]	VBD A	VBD B	VBD C	VBD D
66	4,78 $\pm 0,02$	4,44 $\pm 0,02$	3,87 $\pm 0,01$	9,00 $\pm 0,02$
132	8,84 $\pm 0,03$	8,58 $\pm 0,04$	8,27 $\pm 0,02$	17,98 $\pm 0,02$
198	10,21 $\pm 0,02$	9,86 $\pm 0,02$	11,92 $\pm 0,02$	26,99 $\pm 0,02$
264	12,97 $\pm 0,02$	10,95 $\pm 0,03$	17,25 $\pm 0,02$	29,77 $\pm 0,02$
330	14,9 $\pm 0,02$	14,5 $\pm 0,02$	22,74 $\pm 0,02$	34,14 $\pm 0,02$
396	17,8 $\pm 0,02$	17,27 $\pm 0,02$	28,49 $\pm 0,02$	40,19 $\pm 0,02$



Graf 2: Závislost opotřebení jednotlivých VBD při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 4 a graficky zpřehledněných v grafu 2 lze vidět, že při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se opotřebení nástrojů zvyšovalo s rostoucí délkou/dráhou frézování.

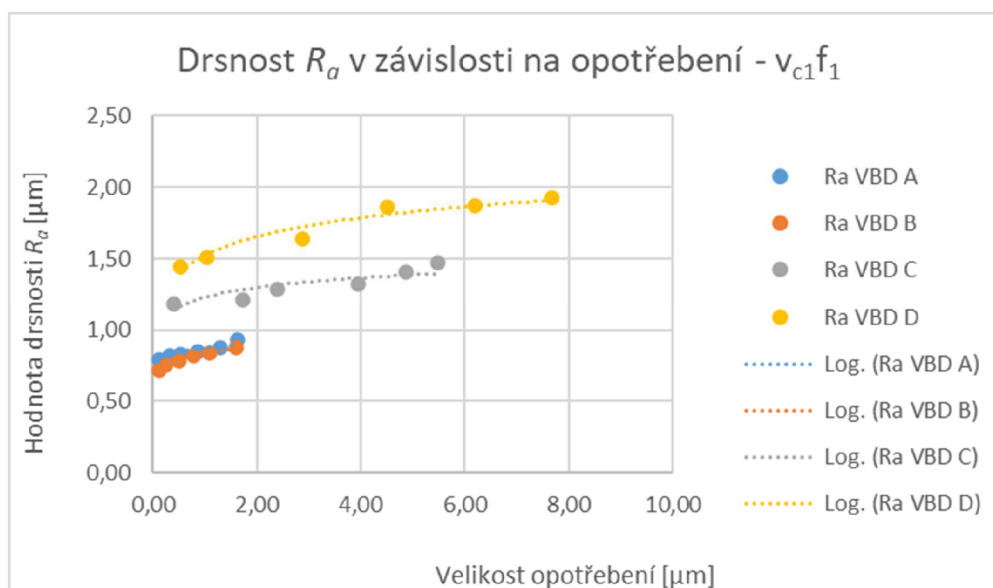
Z výše uvedených výsledků vyplývá, že nejvyšší opotřebení nástroje bylo naměřeno u VBD D, kde hodnota opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $VBD = 40,19 \mu\text{m}$. Naopak nejmenší opotřebení bylo naměřeno, pro stejnou frézovanou dráhu 396 m, u VBD B = $17,27 \mu\text{m}$.

4.2 Hodnocení drsnosti obrobené plochy

V rámci hodnocení opotřebení jednotlivých VBD byla hodnocena drsnost R_a v závislosti na opotřebení VBD. Pro tento experiment byly použity řezné podmínky uvedené v tabulce 2. Byla měřena drsnost obrobené plochy. V tabulkách je u jednotlivých hodnot vždy uváděna i nejistota měření. Postup měření je popsán v metodice měření v podkapitole 3.4.

Tabulka 5: Závislost drsnosti R_a na opotřebení VBD při řezných podmínkách vc_1f_1

Závislost drsnosti R_a na opotřebení $vc_1f_1 = 60/100$							
Opotřebení jednotlivých VBD [μm]				Drsnost R_a u jednotlivých VBD [μm]			
VBD A	VBD B	VBD C	VBD D	R_a VBD A	R_a VBD B	R_a VBD C	R_a VBD D
0,11 $\pm 0,02$	0,11 $\pm 0,01$	0,41 $\pm 0,02$	0,54 $\pm 0,03$	0,80 $\pm 0,11$	0,72 $\pm 0,12$	1,19 $\pm 0,14$	1,44 $\pm 0,10$
0,32 $\pm 0,03$	0,26 $\pm 0,02$	1,72 $\pm 0,03$	1,03 $\pm 0,03$	0,82 $\pm 0,12$	0,76 $\pm 0,01$	1,21 $\pm 0,02$	1,51 $\pm 0,15$
0,53 $\pm 0,02$	0,51 $\pm 0,03$	2,39 $\pm 0,02$	2,88 $\pm 0,01$	0,83 $\pm 0,01$	0,78 $\pm 0,09$	1,29 $\pm 0,07$	1,64 $\pm 0,14$
0,87 $\pm 0,03$	0,79 $\pm 0,02$	3,95 $\pm 0,02$	4,51 $\pm 0,03$	0,85 $\pm 0,09$	0,82 $\pm 0,21$	1,33 $\pm 0,08$	1,86 $\pm 0,07$
1,29 $\pm 0,02$	1,09 $\pm 0,02$	4,86 $\pm 0,02$	6,19 $\pm 0,01$	0,88 $\pm 0,21$	0,84 $\pm 0,13$	1,40 $\pm 0,07$	1,87 $\pm 0,06$
1,63 $\pm 0,02$	1,59 $\pm 0,02$	5,47 $\pm 0,02$	7,67 $\pm 0,02$	0,94 $\pm 0,14$	0,88 $\pm 0,25$	1,47 $\pm 0,11$	1,93 $\pm 0,08$



Graf 3: Závislost drsnosti R_a na opotřebení VBD při řezných podmínkách $v_{c1}f_1$

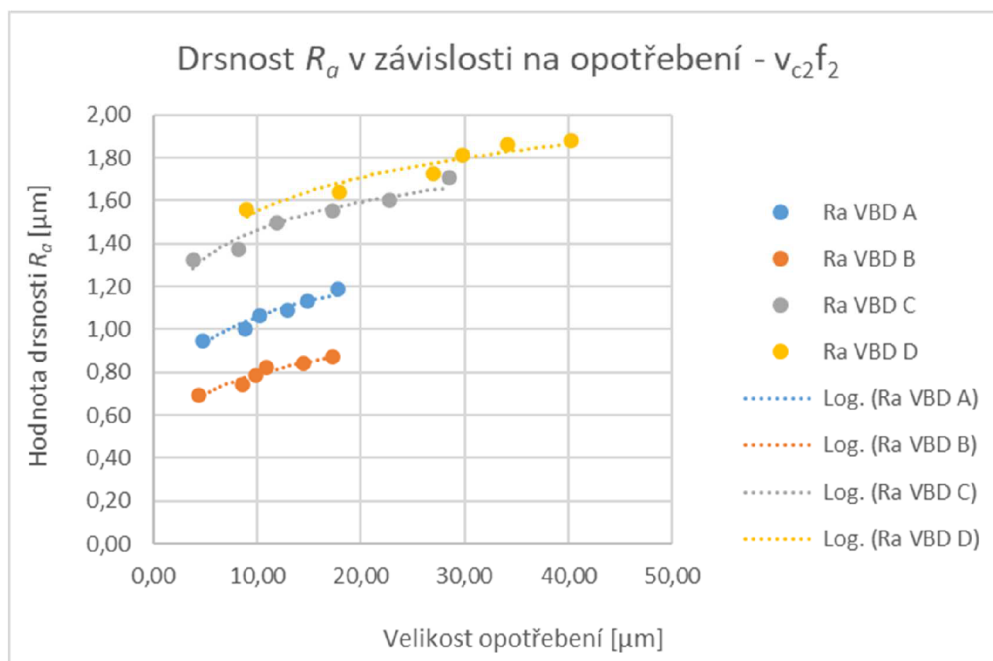
Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 5 a graficky zpřehledněných v grafu 3 lze vidět, že při použití řezných podmínek $v_{c1}f_1 = 60/100$ se drsnost povrchu obrobenej plochy zhoršovala s velikostí opotřebení.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že nejvyšší drsnost obrobenej plochy byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla VBD = 7,67 µm při drsnosti $R_a = 1,93$ µm.

Naopak nejmenší drsnost obrobenej plochy byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla VBD = 1,59 µm při drsnosti $R_a = 0,88$ µm.

Tabulka 6: Závislost drsnosti R_a na opotřebení VBD při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

Závislost drsnosti R_a na opotřebení $v_{c2}f_2 = 120/300$							
Opotřebení jednotlivých VBD [μm]				Drsnost R_a u jednotlivých VBD [μm]			
VBD A	VBD B	VBD C	VBD D	R_a VBD A	R_a VBD B	R_a VBD C	R_a VBD D
4,78 $\pm 0,02$	4,44 $\pm 0,02$	3,87 $\pm 0,01$	9,00 $\pm 0,02$	0,95 $\pm 0,25$	0,69 $\pm 0,02$	1,33 $\pm 0,21$	1,56 $\pm 0,19$
8,84 $\pm 0,03$	8,58 $\pm 0,04$	8,27 $\pm 0,02$	17,98 $\pm 0,02$	1,00 $\pm 0,16$	0,74 $\pm 0,14$	1,37 $\pm 0,04$	1,64 $\pm 0,25$
10,21 $\pm 0,02$	9,86 $\pm 0,02$	11,92 $\pm 0,02$	26,99 $\pm 0,02$	1,07 $\pm 0,08$	0,78 $\pm 0,02$	1,5 $\pm 0,16$	1,73 $\pm 0,24$
12,97 $\pm 0,02$	10,95 $\pm 0,03$	17,25 $\pm 0,02$	29,77 $\pm 0,02$	1,09 $\pm 0,40$	0,83 $\pm 0,13$	1,55 $\pm 0,04$	1,81 $\pm 0,25$
14,9 $\pm 0,02$	14,5 $\pm 0,02$	22,74 $\pm 0,02$	34,14 $\pm 0,02$	1,13 $\pm 0,12$	0,84 $\pm 0,20$	1,6 $\pm 0,19$	1,86 $\pm 0,08$
17,8 $\pm 0,02$	17,27 $\pm 0,02$	28,49 $\pm 0,02$	40,19 $\pm 0,02$	1,19 $\pm 0,10$	0,87 $\pm 0,02$	1,71 $\pm 0,02$	1,88 $\pm 0,20$



Graf 4: Závislost drsnosti R_a na opotřebení VBD při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 6 a graficky zpřehledněných v grafu 4 lze vidět, že při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se drsnost povrchu obrobenej plochy zhoršovala s velikostí opotřebení.

Zvýše uvedených výsledků vyplývá, že nejvyšší drsnost obrobenej plochy byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla $VBD = 40,19 \mu\text{m}$ při drsnosti $R_a = 1,88 \mu\text{m}$.

Naopak nejmenší drsnost obrobenej plochy byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla $VBD = 17,27 \mu\text{m}$ při drsnosti $R_a = 0,87 \mu\text{m}$.

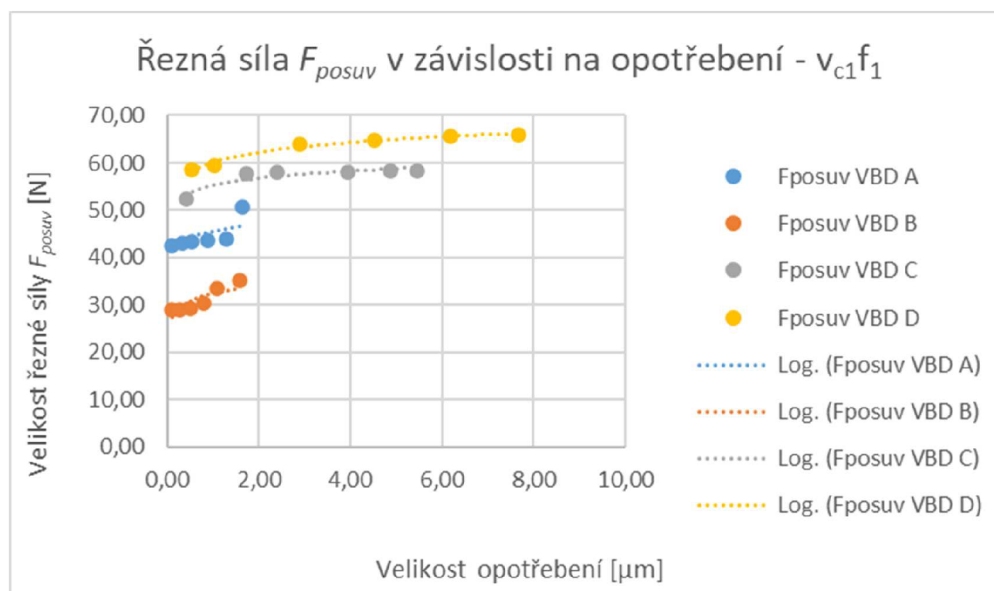
4.3 Hodnocení řezné síly

Byla hodnocena závislost řezné posuvové síly na opotřebení jednotlivých VBD. Pro tento experiment byly zvoleny různé řezné podmínky, které jsou uvedené v tabulce 2.

Postup měření je popsán v metodice měření v podkapitole 3.4. Byla vytvořena tabulka hodnot posuvových řezných sil pro každou VBD včetně nejistot měření. K měření řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr Kister.

Tabulka 7: Řezná posuvová síla F_{posuv} na opotřebení VBD při řezných podmínkách $v_{c1}f_1$

Závislost řezné posuvové síly F_{posuv} na opotřebení $v_{c1}f_1 = 60/100$							
Opotřebení jednotlivých VBD [μm]				Velikost řezné síly F_{posuv} u jednotlivých VBD [N]			
VBD A	VBD B	VBD C	VBD D	F_{posuv} VBD A	F_{posuv} VBD B	F_{posuv} VBD C	F_{posuv} VBD D
0,11 $\pm 0,02$	0,11 $\pm 0,01$	0,41 $\pm 0,02$	0,54 $\pm 0,03$	42,60 $\pm 0,16$	28,90 $\pm 0,05$	52,50 $\pm 0,23$	58,70 $\pm 0,05$
0,32 $\pm 0,03$	0,26 $\pm 0,02$	1,72 $\pm 0,03$	1,03 $\pm 0,03$	43,10 $\pm 0,17$	29,00 $\pm 0,06$	57,70 $\pm 0,18$	59,40 $\pm 0,04$
0,53 $\pm 0,02$	0,51 $\pm 0,03$	2,39 $\pm 0,02$	2,88 $\pm 0,01$	43,50 $\pm 0,09$	29,20 $\pm 0,03$	58,00 $\pm 0,27$	63,90 $\pm 0,11$
0,87 $\pm 0,03$	0,79 $\pm 0,02$	3,95 $\pm 0,02$	4,51 $\pm 0,03$	43,60 $\pm 0,17$	30,40 $\pm 0,06$	58,10 $\pm 0,08$	64,90 $\pm 0,11$
1,29 $\pm 0,02$	1,09 $\pm 0,02$	4,86 $\pm 0,02$	6,19 $\pm 0,01$	43,90 $\pm 0,07$	33,40 $\pm 0,16$	58,20 $\pm 0,04$	65,70 $\pm 0,16$
1,63 $\pm 0,02$	1,59 $\pm 0,02$	5,47 $\pm 0,02$	7,67 $\pm 0,02$	50,60 $\pm 0,16$	35,10 $\pm 0,08$	58,40 $\pm 0,04$	65,90 $\pm 0,18$



Graf 5: Závislost řezné posuvové síly F_{posuv} na opotřebení VBD při řezných podmínkách $v_{c1}f_1$

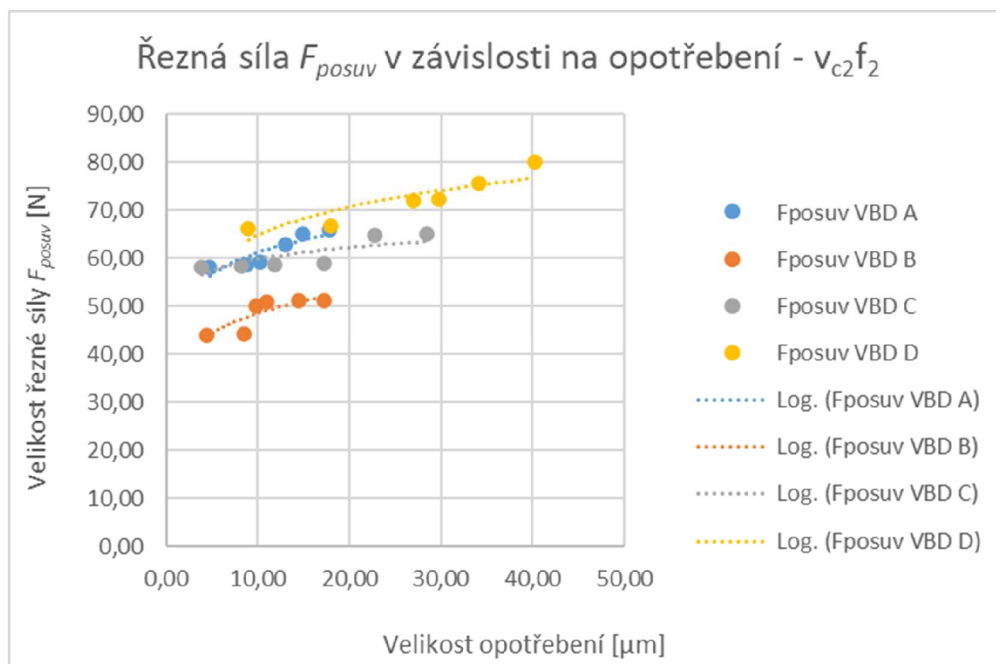
Znaměřených výsledků uvedených v tabulce 7 a graficky zřehledněných v grafu 5 lze vidět, že při použití řezných podmínek $vc_1f_1 = 60/100$ se řezná posuvová síla F_{posuv} zvyšovala s velikostí opotřebení.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že nejvyšší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $VBD = 7,67 \mu m$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 65,9 N$.

Naopak nejmenší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $VBD = 1,59 \mu m$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 35,1 N$.

Tabulka 8: Řezná posuvová síla F_{posuv} na opotřebení VBD při řezných podmínkách vc_2f_2

Závislost řezné posuvové síly F_{posuv} na opotřebení $vc_2f_2 = 120/300$							
Opotřebení jednotlivých VBD [μm]				Velikost řezné síly F_{posuv} u jednotlivých VBD [N]			
VBD A	VBD B	VBD C	VBD D	F_{posuv} VBD A	F_{posuv} VBD B	F_{posuv} VBD C	F_{posuv} VBD D
4,78 $\pm 0,02$	4,44 $\pm 0,02$	3,87 $\pm 0,01$	9,00 $\pm 0,02$	58,00 $\pm 0,03$	43,90 $\pm 0,16$	58,20 $\pm 0,12$	66,20 $\pm 0,14$
8,84 $\pm 0,03$	8,58 $\pm 0,04$	8,27 $\pm 0,02$	17,98 $\pm 0,02$	58,70 $\pm 0,12$	44,30 $\pm 0,02$	58,40 $\pm 0,13$	66,70 $\pm 0,09$
10,21 $\pm 0,02$	9,86 $\pm 0,02$	11,92 $\pm 0,02$	26,99 $\pm 0,02$	59,20 $\pm 0,15$	50,10 $\pm 0,09$	58,70 $\pm 0,10$	71,90 $\pm 0,08$
12,97 $\pm 0,02$	10,95 $\pm 0,03$	17,25 $\pm 0,02$	29,77 $\pm 0,02$	62,70 $\pm 0,19$	50,80 $\pm 0,16$	58,90 $\pm 0,16$	72,30 $\pm 0,06$
14,9 $\pm 0,02$	14,5 $\pm 0,02$	22,74 $\pm 0,02$	34,14 $\pm 0,02$	65,10 $\pm 0,20$	51,10 $\pm 0,15$	64,80 $\pm 0,10$	75,50 $\pm 0,20$
17,8 $\pm 0,02$	17,27 $\pm 0,02$	28,49 $\pm 0,02$	40,19 $\pm 0,02$	65,80 $\pm 0,21$	51,30 $\pm 0,10$	64,90 $\pm 0,23$	80,10 $\pm 0,21$



Graf 6: Závislost řezné posuvové síly F_{posuv} na opotřebení VBD při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

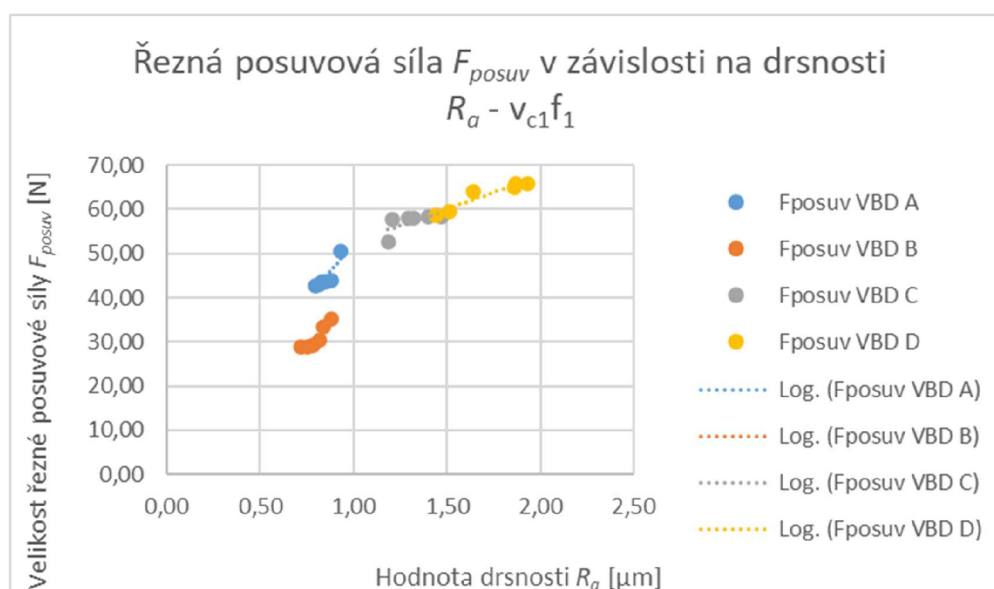
Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 8 a graficky zpřehledněných v grafu 6 lze vidět, že při použití řezných podmínek $v_{c2}f_2 = 120/300$ se řezná posuvová síla F_{posuv} zvyšovala s velikostí opotřebení.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že nejvyšší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla VBD = 40,19 μm při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 80,1$ N.

Naopak nejmenší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla VBD = 17,27 μm při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 51,3$ N.

Tabulka 9: Závislost řezné posuvové síly F_{posuv} na drsnosti povrchu R_a při řezných podmínkách $v_{c1}f_1$

Závislost řezné posuvové síly F_{posuv} na drsnosti R_a - $v_{c1}f_1 = 60/100$							
Drsnost R_a u jednotlivých VBD [μm]				Velikost řezné síly F_{posuv} u jednotlivých VBD [N]			
R_a VBD A	R_a VBD B	R_a VBD C	R_a VBD D	F_{posuv} VBD A	F_{posuv} VBD B	F_{posuv} VBD C	F_{posuv} VBD D
0,80 $\pm 0,11$	0,72 $\pm 0,12$	1,19 $\pm 0,14$	1,44 $\pm 0,10$	42,60 $\pm 0,16$	28,90 $\pm 0,05$	52,50 $\pm 0,23$	58,70 $\pm 0,05$
0,82 $\pm 0,12$	0,76 $\pm 0,01$	1,21 $\pm 0,02$	1,51 $\pm 0,15$	43,10 $\pm 0,17$	29,00 $\pm 0,06$	57,70 $\pm 0,18$	59,40 $\pm 0,04$
0,83 $\pm 0,01$	0,78 $\pm 0,09$	1,29 $\pm 0,07$	1,64 $\pm 0,14$	43,50 $\pm 0,09$	29,20 $\pm 0,03$	58,00 $\pm 0,27$	63,90 $\pm 0,11$
0,85 $\pm 0,09$	0,82 $\pm 0,21$	1,33 $\pm 0,08$	1,86 $\pm 0,07$	43,60 $\pm 0,17$	30,40 $\pm 0,06$	58,10 $\pm 0,08$	64,90 $\pm 0,11$
0,88 $\pm 0,21$	0,84 $\pm 0,13$	1,40 $\pm 0,07$	1,87 $\pm 0,06$	43,90 $\pm 0,07$	33,40 $\pm 0,16$	58,20 $\pm 0,04$	65,70 $\pm 0,16$
0,94 $\pm 0,14$	0,88 $\pm 0,25$	1,47 $\pm 0,11$	1,93 $\pm 0,08$	50,60 $\pm 0,16$	35,10 $\pm 0,08$	58,40 $\pm 0,04$	65,90 $\pm 0,18$



Graf 7: Závislost řezné posuvové síly F_{posuv} na drsnosti povrchu R_a při řezných podmínkách $v_{c1}f_1$

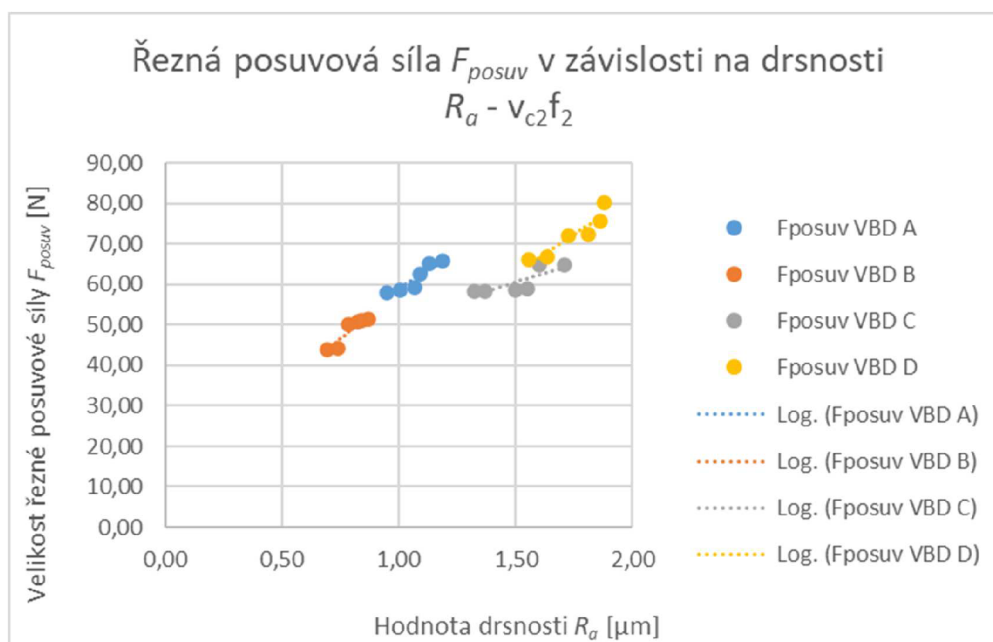
Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 9 a graficky zpřehledněných v grafu 7 lze vidět, že při použití řezných podmínek $vc_1f_1 = 60/100$ se řezná posuvová síla F_{posuv} zvyšovala s drsností obrobené plochy R_a .

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že nejvyšší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 1,93 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 65,9 \text{ N}$.

Naopak nejmenší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 0,88 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 35,1 \text{ N}$.

Tabulka 10: Závislost řezné posuvové síly F_{posuv} na drsnosti povrchu R_a při řezných podmínkách vc_2f_2

Závislost řezné síly F_x na drsnosti R_a - $vc_2f_2 = 120/300$							
Drsnost R_a u jednotlivých VBD [μm]				Velikost řezné síly F_{posuv} u jednotlivých VBD [N]			
R_a VBD A	R_a VBD B	R_a VBD C	R_a VBD D	F_{posuv} VBD A	F_{posuv} VBD B	F_{posuv} VBD C	F_{posuv} VBD D
0,95 $\pm 0,25$	0,69 $\pm 0,02$	1,33 $\pm 0,21$	1,56 $\pm 0,19$	58,00 $\pm 0,03$	43,90 $\pm 0,16$	58,20 $\pm 0,23$	66,20 $\pm 0,14$
1,00 $\pm 0,16$	0,74 $\pm 0,14$	1,37 $\pm 0,04$	1,64 $\pm 0,25$	58,70 $\pm 0,12$	44,30 $\pm 0,26$	58,40 $\pm 0,13$	66,70 $\pm 0,09$
1,07 $\pm 0,08$	0,78 $\pm 0,04$	1,50 $\pm 0,16$	1,73 $\pm 0,24$	59,20 $\pm 0,15$	50,10 $\pm 0,09$	58,70 $\pm 0,10$	71,90 $\pm 0,08$
1,09 $\pm 0,40$	0,83 $\pm 0,13$	1,55 $\pm 0,04$	1,81 $\pm 0,05$	62,70 $\pm 0,19$	50,80 $\pm 0,16$	58,90 $\pm 0,16$	72,30 $\pm 0,06$
1,13 $\pm 0,12$	0,84 $\pm 0,20$	1,60 $\pm 0,19$	1,86 $\pm 0,08$	65,10 $\pm 0,20$	51,10 $\pm 0,15$	64,80 $\pm 0,10$	75,50 $\pm 0,20$
1,19 $\pm 0,10$	0,87 $\pm 0,02$	1,71 $\pm 0,02$	1,88 $\pm 0,20$	65,80 $\pm 0,21$	51,30 $\pm 0,10$	64,90 $\pm 0,23$	80,10 $\pm 0,21$



Graf 8: Závislost řezné posuvové síly F_{posuv} na drsnosti povrchu R_a při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 10 a graficky zpřehledněných v grafu 8 lze vidět, že při použití řezných podmínek $v_{c2}f_2 = 120/300$ se řezná posuvová síla F_{posuv} zvyšovala s drsností obrobené plochy R_a .

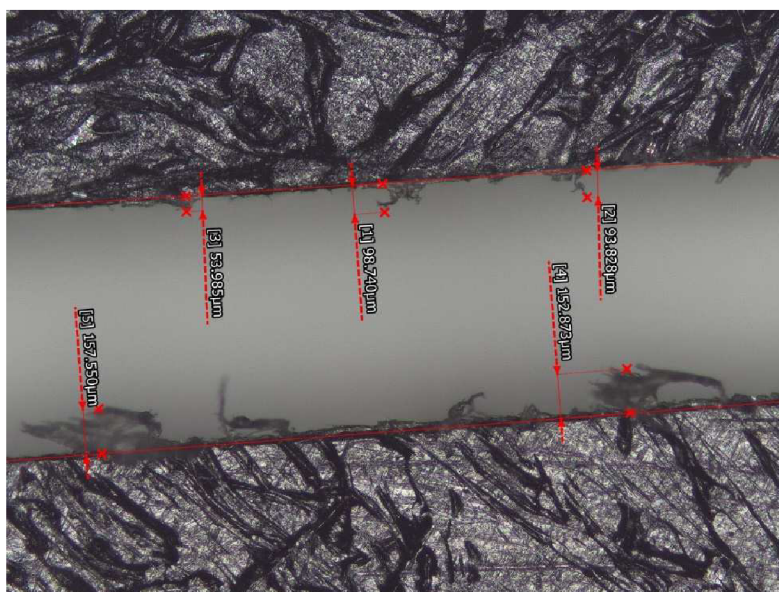
Z výše uvedených výsledků vyplývá, že nejvyšší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 1,88 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 80,1 \text{ N}$.

Naopak nejmenší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 0,87 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 51,3 \text{ N}$.

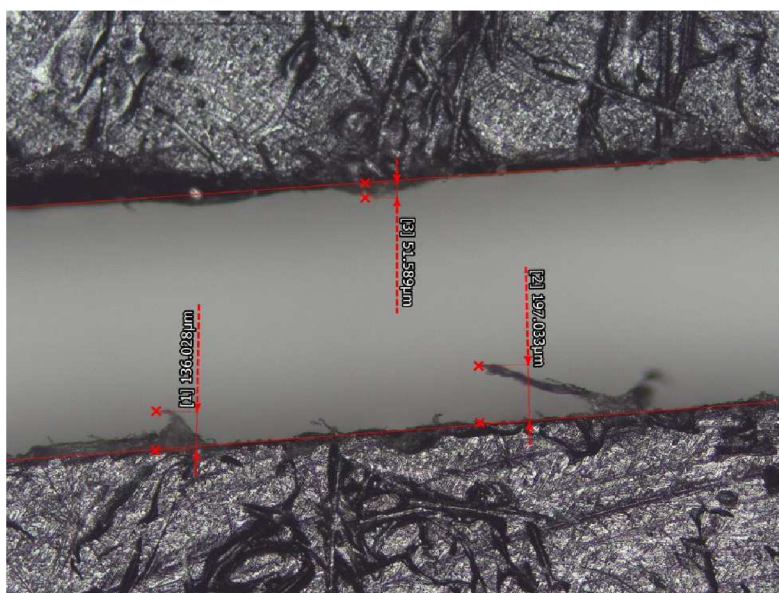
4.4 Hodnocení delaminace

Při měření delaminace na jednotlivých vzorcích byla měřena jak delaminace na části, kde probíhalo sousledné frézování, tak i na části, kde probíhalo nesousledné frézování.

Na obrázcích 32 a 33 je zobrazení obou typů frézování – měřeno mikroskopem s 3D laserovým skenováním VK-X3000 firmy Keyence. Rozdíly mezi sousledným a nesousledným frézováním jsou patrné nejen z měření, ale u některých vzorků byly patrné i pouhým okem.



Obrázek 34: Zobrazení delaminace pomocí Keyence – měření A



Obrázek 35: Zobrazení delaminace pomocí Keyence – měření B

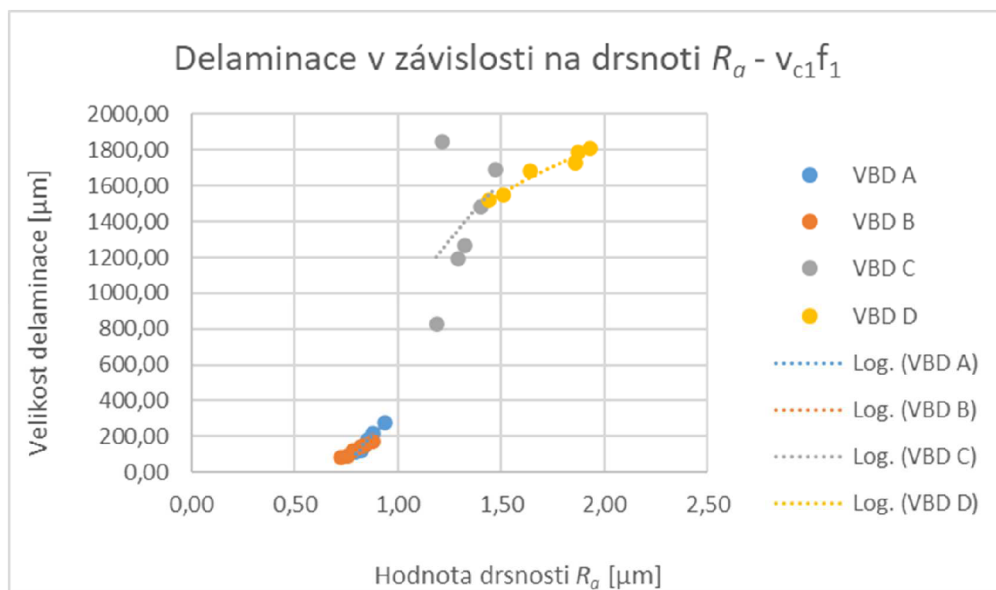


Obrázek 36: Delaminace vzniklé v průběhu experimentu – nebylo možné využití měření na Keyence z důvodu velkých otřepů

Vzhledem k situaci, že firma disponuje stejnou frézou, která byla použita v rámci experimentu a s ohledem na výsledky vyhodnocené z naměřených hodnot bylo stanoveno, že k dalšímu porovnání budou využity pouze výsledky naměřené u nesousledného frézování.

Tabulka 11: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na drsnosti povrchu R_a při řezných podmínkách vc_1f_1

Závislost delaminace na drsnosti R_a - $vc_1f_1 = 60/100$							
Drsnost R_a u jednotlivých VBD [μm]				Delaminace u jednotlivých VBD [μm]			
R_a VBD A	R_a VBD B	R_a VBD C	R_a VBD D	VBD A	VBD B	VBD C	VBD D
0,80 $\pm 0,11$	0,72 $\pm 0,12$	1,19 $\pm 0,14$	1,44 $\pm 0,10$	110,00 $\pm 0,36$	80,00 $\pm 0,25$	830,00 $\pm 0,20$	1520,00 $\pm 0,08$
0,82 $\pm 0,12$	0,76 $\pm 0,01$	1,21 $\pm 0,02$	1,51 $\pm 0,15$	120,00 $\pm 0,42$	90,00 $\pm 0,14$	1850,00 $\pm 0,19$	1550,00 $\pm 0,14$
0,83 $\pm 0,01$	0,78 $\pm 0,09$	1,29 $\pm 0,07$	1,64 $\pm 0,14$	140,00 $\pm 0,21$	120,00 $\pm 0,05$	1190,00 $\pm 0,42$	1680,00 $\pm 0,34$
0,85 $\pm 0,09$	0,82 $\pm 0,21$	1,33 $\pm 0,08$	1,86 $\pm 0,07$	180,00 $\pm 0,25$	140,00 $\pm 0,41$	1270,00 $\pm 0,36$	1730,00 $\pm 0,31$
0,88 $\pm 0,21$	0,84 $\pm 0,13$	1,40 $\pm 0,07$	1,87 $\pm 0,06$	220,00 $\pm 0,15$	150,00 $\pm 0,40$	1480,00 $\pm 0,14$	1790,00 $\pm 0,25$
0,94 $\pm 0,14$	0,88 $\pm 0,25$	1,47 $\pm 0,11$	1,93 $\pm 0,08$	280,00 $\pm 0,16$	170,00 $\pm 0,14$	1690,00 $\pm 0,20$	1810,00 $\pm 0,11$



Graf 9: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním na drsnosti povrchu R_a při řezných podmínkách $v_{c1}f_1$

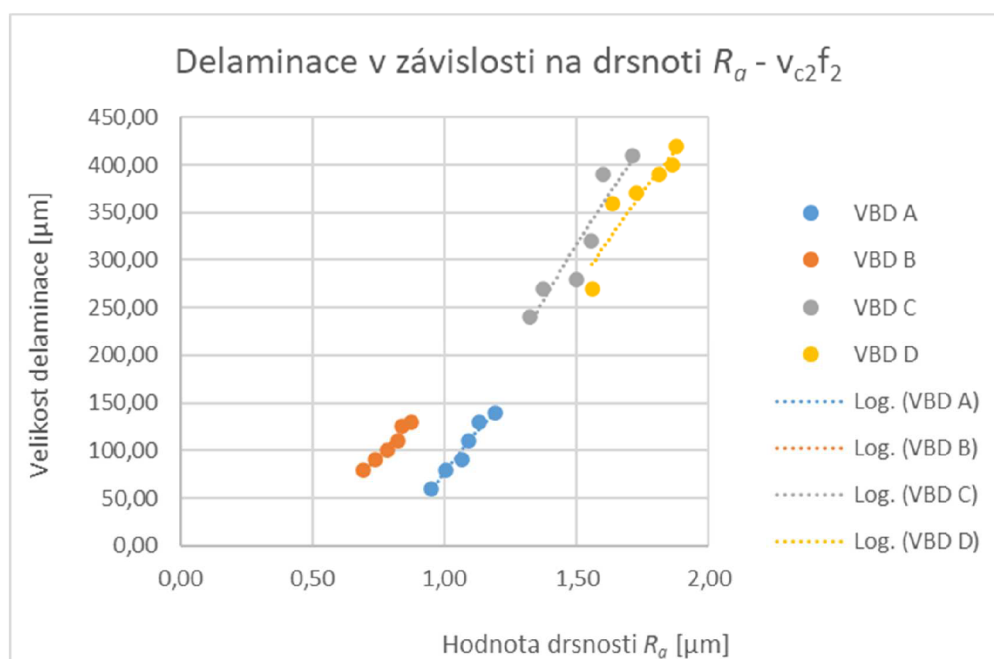
Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 11 graficky zpřehledněných v grafu 9 lze vidět, že při použití řezných podmínek $v_{c1}f_1 = 60/100$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním zvyšovala s drsností obrobene plochy R_a .

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobene plochy R_a pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla $R_a = 1,93 \mu\text{m}$ při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním = 1810 μm .

Naopak nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobene plochy R_a pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla $R_a = 0,88 \mu\text{m}$ při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním = 170 μm .

Tabulka 12: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na drsnosti povrchu R_a při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

Závislost delaminace na drsnosti $R_a - v_{c2}f_2 = 120/300$							
Drsnost R_a u jednotlivých VBD [μm]				Delaminace u jednotlivých VBD [μm]			
R_a VBD A	R_a VBD B	R_a VBD C	R_a VBD D	VBD A	VBD B	VBD C	VBD D
0,95 $\pm 0,25$	0,69 $\pm 0,02$	1,33 $\pm 0,21$	1,56 $\pm 0,19$	60,00 $\pm 0,25$	80,00 $\pm 0,06$	240,00 $\pm 0,25$	270,00 $\pm 0,25$
1,00 $\pm 0,16$	0,74 $\pm 0,14$	1,37 $\pm 0,04$	1,64 $\pm 0,25$	80,00 $\pm 0,14$	90,00 $\pm 0,19$	270,00 $\pm 0,36$	360,00 $\pm 0,27$
1,07 $\pm 0,08$	0,78 $\pm 0,02$	1,5 $\pm 0,16$	1,73 $\pm 0,24$	90,00 $\pm 0,08$	100,00 $\pm 0,10$	280,00 $\pm 0,18$	370,00 $\pm 0,17$
1,09 $\pm 0,40$	0,83 $\pm 0,13$	1,55 $\pm 0,04$	1,81 $\pm 0,25$	110,00 $\pm 0,07$	110,00 $\pm 0,11$	320,00 $\pm 0,15$	390,00 $\pm 0,23$
1,13 $\pm 0,12$	0,84 $\pm 0,20$	1,6 $\pm 0,19$	1,86 $\pm 0,08$	130,00 $\pm 0,25$	125,00 $\pm 0,18$	390,00 $\pm 0,09$	400,00 $\pm 0,12$
1,19 $\pm 0,10$	0,87 $\pm 0,02$	1,71 $\pm 0,02$	1,88 $\pm 0,20$	140,00 $\pm 0,15$	130,00 $\pm 0,19$	410,00 $\pm 0,18$	420,00 $\pm 0,17$



Graf: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na drsnosti povrchu R_a při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

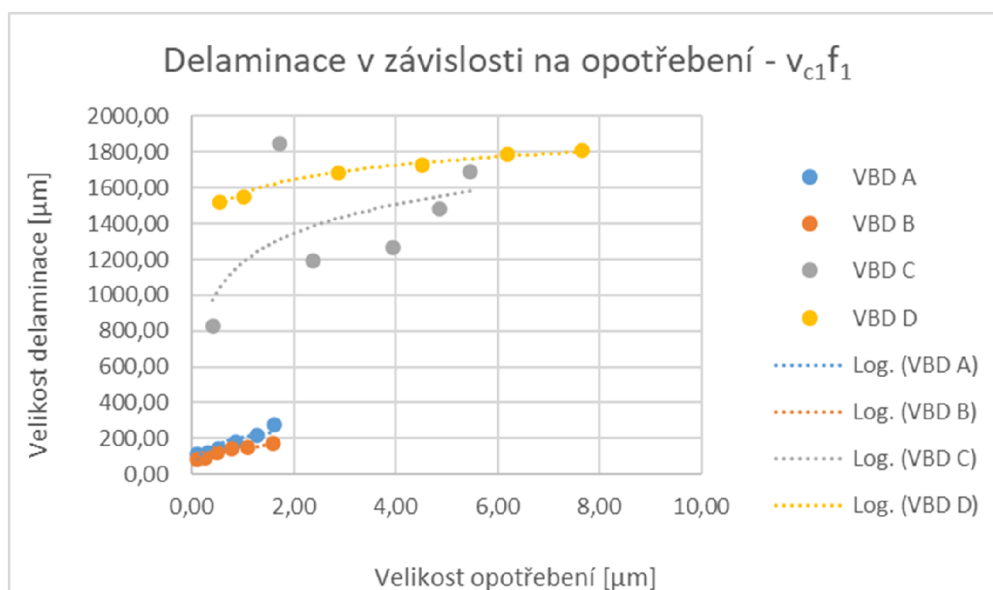
Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 12 a graficky zpřehledněných grafu 10 lze vidět, že při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním zvyšovala s drsností obrobeneho plochy R_a .

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeneho drsnosti obrobeneho plochy R_a pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla $R_a = 1,88 \mu\text{m}$ při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním = $420 \mu\text{m}$.

Naopak nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeneho drsnosti obrobeneho plochy R_a pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla $R_a = 0,87 \mu\text{m}$ při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním = $130 \mu\text{m}$.

Tabulka 13: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním na opotřebení VBD při řezných podmínkách vc_1f_1

Závislost delaminace na drsnosti R_a - $vc_1f_1 = 60/100$							
Opotřebení jednotlivých VBD [μm]				Delaminace u jednotlivých VBD [μm]			
VBD A	VBD B	VBD C	VBD D	VBD A	VBD B	VBD C	VBD D
0,11 $\pm 0,02$	0,11 $\pm 0,01$	0,41 $\pm 0,02$	0,54 $\pm 0,03$	110,00 $\pm 0,36$	80,00 $\pm 0,25$	830,00 $\pm 0,20$	1520,00 $\pm 0,08$
0,32 $\pm 0,03$	0,26 $\pm 0,02$	1,72 $\pm 0,03$	1,03 $\pm 0,03$	120,00 $\pm 0,42$	90,00 $\pm 0,14$	1850,00 $\pm 0,19$	1550,00 $\pm 0,14$
0,53 $\pm 0,02$	0,51 $\pm 0,03$	2,39 $\pm 0,02$	2,88 $\pm 0,01$	140,00 $\pm 0,21$	120,00 $\pm 0,05$	1190,00 $\pm 0,42$	1680,00 $\pm 0,34$
0,87 $\pm 0,03$	0,79 $\pm 0,02$	3,95 $\pm 0,02$	4,51 $\pm 0,03$	180,00 $\pm 0,25$	140,00 $\pm 0,41$	1270,00 $\pm 0,36$	1730,00 $\pm 0,31$
1,29 $\pm 0,02$	1,09 $\pm 0,02$	4,86 $\pm 0,02$	6,19 $\pm 0,01$	220,00 $\pm 0,15$	150,00 $\pm 0,40$	1480,00 $\pm 0,14$	1790,00 $\pm 0,25$
1,63 $\pm 0,02$	1,59 $\pm 0,02$	5,47 $\pm 0,02$	7,67 $\pm 0,02$	280,00 $\pm 0,16$	170,00 $\pm 0,14$	1690,00 $\pm 0,20$	1810,00 $\pm 0,11$



Graf 11: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním na opotřebení VBD při řezných podmínkách $v_{c1}f_1$

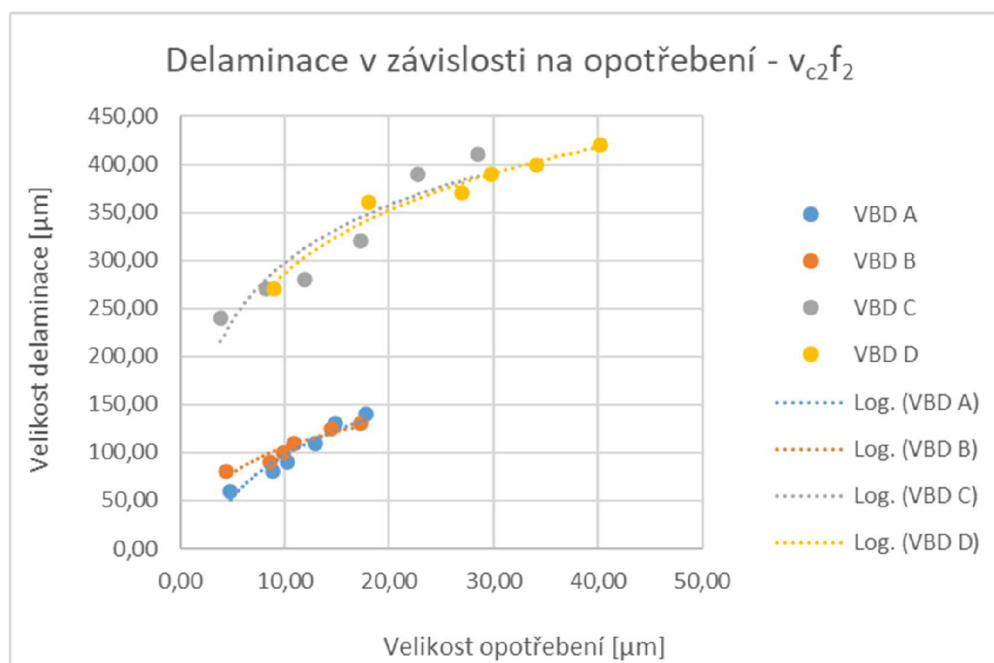
Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 13 a graficky zpřehledněných v grafu 11 lze vidět, že při použití řezných podmínek $v_{c1}f_1 = 60/100$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním zvyšovala s velikostí opotřebení.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla 7,67 μm při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním = 1810 μm .

Naopak nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla 1,59 μm při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním = 170 μm .

Tabulka 14: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na opotřebení VBD při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

Závislost delaminace na drsnosti $R_a - v_{c2}f_2 = 120/300$							
Opotřebení jednotlivých VBD [μm]				Delaminace u jednotlivých VBD [μm]			
VBD A	VBD B	VBD C	VBD D	VBD A	VBD B	VBD C	VBD D
4,78 $\pm 0,02$	4,44 $\pm 0,02$	3,87 $\pm 0,01$	9,00 $\pm 0,02$	60,00 $\pm 0,25$	80,00 $\pm 0,06$	240,00 $\pm 0,25$	270,00 $\pm 0,25$
8,84 $\pm 0,03$	8,58 $\pm 0,04$	8,27 $\pm 0,02$	17,98 $\pm 0,02$	80,00 $\pm 0,14$	90,00 $\pm 0,19$	270,00 $\pm 0,36$	360,00 $\pm 0,27$
10,21 $\pm 0,02$	9,86 $\pm 0,02$	11,92 $\pm 0,02$	26,99 $\pm 0,02$	90,00 $\pm 0,08$	100,00 $\pm 0,10$	280,00 $\pm 0,18$	370,00 $\pm 0,17$
12,97 $\pm 0,02$	10,95 $\pm 0,03$	17,25 $\pm 0,02$	29,77 $\pm 0,02$	110,00 $\pm 0,07$	110,00 $\pm 0,11$	320,00 $\pm 0,15$	390,00 $\pm 0,23$
14,9 $\pm 0,02$	14,5 $\pm 0,02$	22,74 $\pm 0,02$	34,14 $\pm 0,02$	130,00 $\pm 0,25$	125,00 $\pm 0,18$	390,00 $\pm 0,09$	400,00 $\pm 0,12$
17,8 $\pm 0,02$	17,27 $\pm 0,02$	28,49 $\pm 0,02$	40,19 $\pm 0,02$	140,00 $\pm 0,15$	130,00 $\pm 0,19$	410,00 $\pm 0,18$	420,00 $\pm 0,17$



Graf: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na opotřebení VBD při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

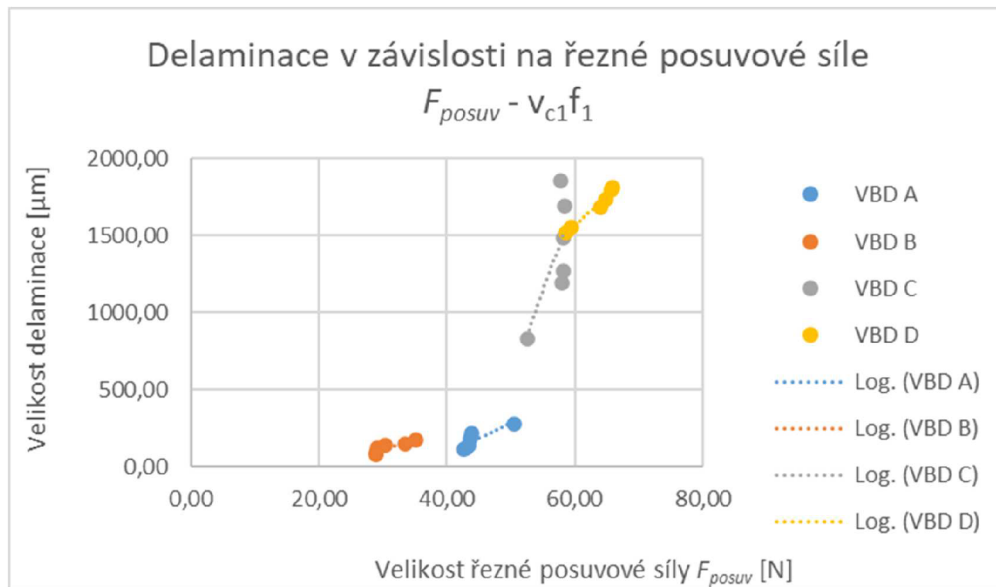
Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 14 a graficky zpřehledněných v grafu 12 lze vidět, že při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním zvyšovala s velikostí opotřebení.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 40,19 μm při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 420 μm .

Naopak nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 17,27 μm při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 130 μm .

Tabulka 15: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na řezné posuvové síle F_{posuv} při řezných podmínkách vc_1f_1

Závislost nesousledné delaminace na řezné posuvové síle $F_{posuv} - vc_1f_1 = 60/100$							
Velikost řezné síly F_{posuv} u jednotlivých VBD [N]				Delaminace u jednotlivých VBD [μm]			
F_{posuv} VBD A	F_{posuv} VBD B	F_{posuv} VBD C	F_{posuv} VBD D	VBD A	VBD B	VBD C	VBD D
42,60 $\pm 0,16$	28,90 $\pm 0,05$	52,50 $\pm 0,23$	58,70 $\pm 0,05$	110,00 $\pm 0,36$	80,00 $\pm 0,25$	830,00 $\pm 0,20$	1520,00 $\pm 0,08$
43,10 $\pm 0,17$	29,00 $\pm 0,06$	57,70 $\pm 0,18$	59,40 $\pm 0,04$	120,00 $\pm 0,42$	90,00 $\pm 0,14$	1850,00 $\pm 0,19$	1550,00 $\pm 0,14$
43,50 $\pm 0,09$	29,20 $\pm 0,03$	58,00 $\pm 0,27$	63,90 $\pm 0,11$	140,00 $\pm 0,21$	120,00 $\pm 0,05$	1190,00 $\pm 0,42$	1680,00 $\pm 0,34$
43,60 $\pm 0,17$	30,40 $\pm 0,06$	58,10 $\pm 0,08$	64,90 $\pm 0,11$	180,00 $\pm 0,25$	140,00 $\pm 0,41$	1270,00 $\pm 0,36$	1730,00 $\pm 0,31$
43,90 $\pm 0,07$	33,40 $\pm 0,16$	58,20 $\pm 0,04$	65,70 $\pm 0,16$	220,00 $\pm 0,15$	150,00 $\pm 0,40$	1480,00 $\pm 0,14$	1790,00 $\pm 0,25$
50,60 $\pm 0,16$	35,10 $\pm 0,08$	58,40 $\pm 0,04$	65,90 $\pm 0,18$	280,00 $\pm 0,16$	170,00 $\pm 0,14$	1690,00 $\pm 0,20$	1810,00 $\pm 0,11$



Graf 13: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním na řezné posuvové síle F_{posuv} při řezných podmínkách $v_{c1}f_1$

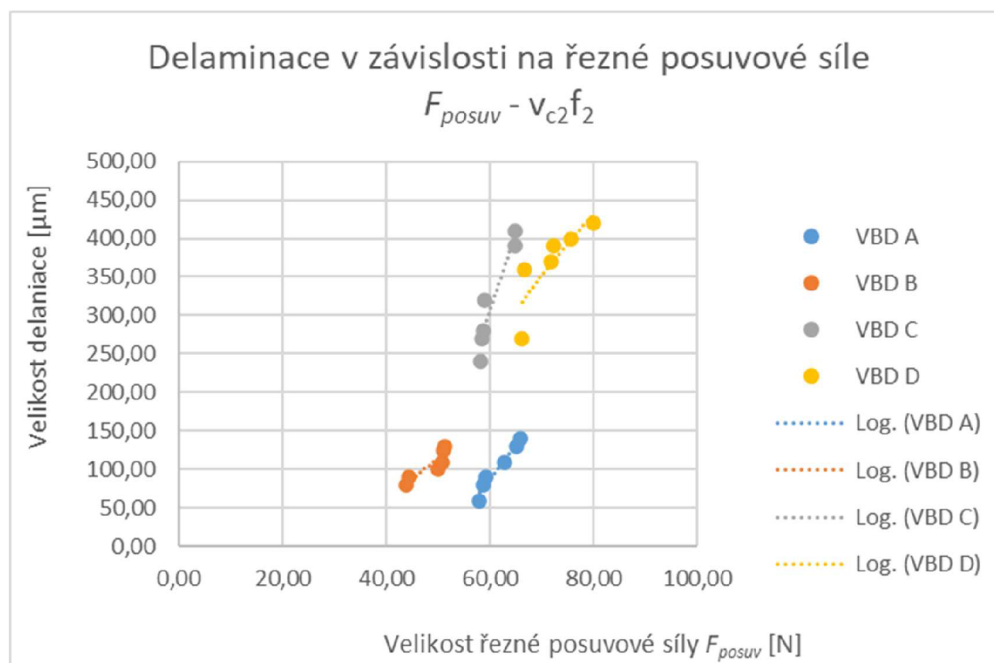
Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 15 a graficky zpřehledněných v grafu 13 lze vidět, že při použití řezných podmínek $v_{c1}f_1 = 60/100$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním zvyšovala s velikostí řezné posuvové síly F_{posuv} .

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené velikosti řezné posuvové síly F_{posuv} pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla 65,9 N při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním = 1810 μm .

Naopak nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené velikosti řezné posuvové síly F_{posuv} pro sledovanou obrobenu dráhu 396 m byla 35,1 N při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeneho nesousledným frézováním = 170 μm .

Tabulka 16: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na řezné posuvové síle F_{posuv} při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

Závislost nesousledné delaminace na řezné posuvové síle $F_{posuv} - v_{c2}f_2 = 120/300$							
Velikost řezné síly F_{posuv} u jednotlivých VBD [N]				Delaminace u jednotlivých VBD [μm]			
F_{posuv} VBD A	F_{posuv} VBD B	F_{posuv} VBD C	F_{posuv} VBD D	VBD A	VBD B	VBD C	VBD D
58,00 $\pm 0,03$	43,90 $\pm 0,16$	58,20 $\pm 0,12$	66,20 $\pm 0,14$	60,00 $\pm 0,25$	80,00 $\pm 0,06$	240,00 $\pm 0,25$	270,00 $\pm 0,25$
58,70 $\pm 0,12$	44,30 $\pm 0,02$	58,40 $\pm 0,13$	66,70 $\pm 0,09$	80,00 $\pm 0,14$	90,00 $\pm 0,19$	270,00 $\pm 0,36$	360,00 $\pm 0,27$
59,20 $\pm 0,15$	50,10 $\pm 0,09$	58,70 $\pm 0,10$	71,90 $\pm 0,08$	90,00 $\pm 0,08$	100,00 $\pm 0,10$	280,00 $\pm 0,18$	370,00 $\pm 0,17$
62,70 $\pm 0,19$	50,80 $\pm 0,16$	58,90 $\pm 0,16$	72,30 $\pm 0,06$	110,00 $\pm 0,07$	110,00 $\pm 0,11$	320,00 $\pm 0,15$	390,00 $\pm 0,23$
65,10 $\pm 0,20$	51,10 $\pm 0,15$	64,80 $\pm 0,10$	75,50 $\pm 0,20$	130,00 $\pm 0,25$	125,00 $\pm 0,18$	390,00 $\pm 0,09$	400,00 $\pm 0,12$
65,80 $\pm 0,21$	51,30 $\pm 0,10$	64,90 $\pm 0,23$	80,10 $\pm 0,21$	140,00 $\pm 0,15$	130,00 $\pm 0,19$	410,00 $\pm 0,18$	420,00 $\pm 0,17$



Graf: Závislost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na řezné posuvové síle F_{posuv} při řezných podmínkách $v_{c2}f_2$

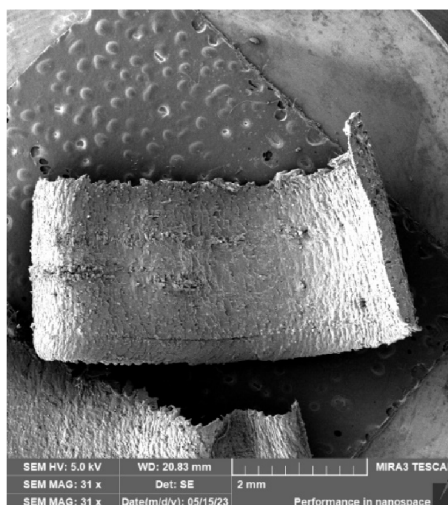
Z naměřených výsledků uvedených v tabulce 16 a graficky zřehledněných v grafu 14 je vidět, že při použití řezných podmínek $vc_{f2} = 120/300$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním zvyšovala s velikostí řezné posuvové síly F_{posuv} .

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené velikosti řezné posuvové síly F_{posuv} pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 80,1 N při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 420 μm .

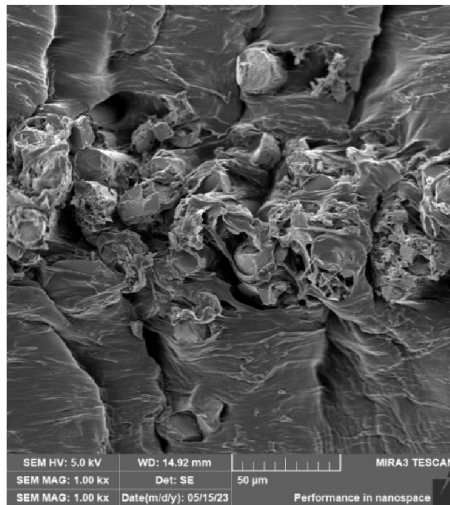
Naopak nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené velikosti řezné posuvové síly F_{posuv} pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 51,3 N při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 130 μm .

4.5 Hodnocení tvorby třísky

Na obrázku 37 lze vidět detaily třísky z frézování s použitím VBD B.

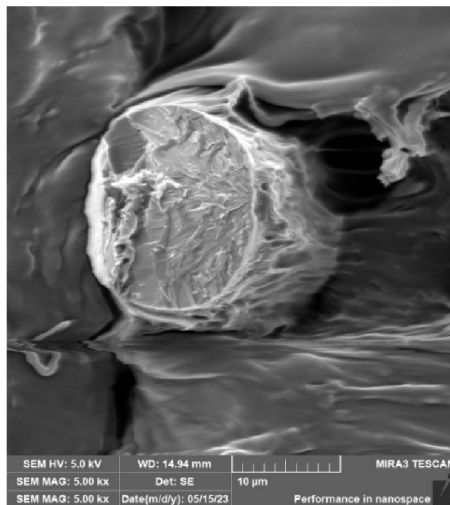


Obrázek 37: Detailní pohled na mikročástice – použit mikroskop SEM



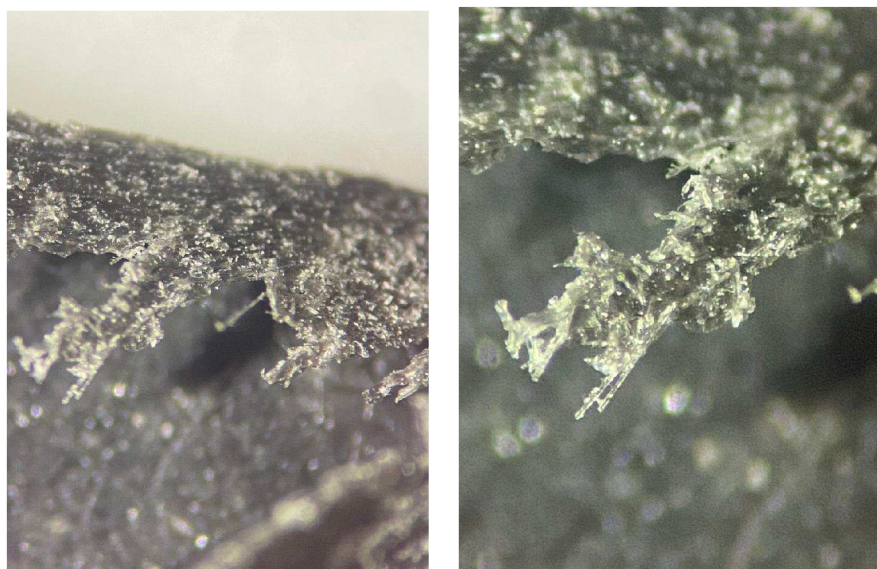
Obrázek 38: Detailní pohled na mikročástice – použit mikroskop SEM

Na obrázku 38 a 39 lze vidět detaily třísky z frézování s použitím VBD B. Je zde možné vidět, že skelná vlákna jsou tzv. obalena okolním materiálem a nedochází k jejich uvolňování a delaminaci jako je tomu např. u kompozitních materiálů tvořených pryskyřicí a uhlíkovými vlákny.



Obrázek 39: Detailní pohled na mikročástice – použit mikroskop SEM

Drobná mikrovlákna, jak je lze vidět na obrázcích 37 a 38, nejsou při obrábění životu nebezpečná, jak je to např. v případě kompozitních materiálů tvořených pryskyřicí a skelným vláknem.



Obrázek 40: Zobrazení detailu delaminované části vzorku

5 DISKUZE VÝSLEDŮ

Cílem diplomové práce bylo prostudování a sumarizace dosavadních poznatků o problematice frézování kompozitních materiálů vyztužených skelnými vlákny se zaměřením na materiál nástroje a geometrii, orientaci vláken a analýzu vlivu opotřebení nástroje. Dále s ohledem k vybranému obráběnému materiálu zvolit vhodné řezné nástroje a řezné podmínky. S tím souvisel návrh metodiky experimentu pro frézování kompozitních desek vyztužených skelnými vlákny, realizace experimentu a provedení zhodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje v závislosti na použitém nástroji, jeho geometrii a na orientaci vláken obráběného materiálu a vzniklé delaminaci.

Základní informace týkající se dané problematiky obrábění kompozitních materiálů jsou uvedeny v kapitole 2. Kapitola obsahuje informace o získaných poznatcích souvisejících s frézováním kompozitních materiálů. Součástí předkládané práce jsou také informace o řezných nástrojích a technologii frézování. Kapitola 3 obsahuje metodickou část diplomové práce. Kapitola obsahuje veškeré potřebné informace s popisem podmínek a použitých strojních zařízení, které byly využity pro výrobu vzorků a měření výsledků experimentu. Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků lze poukázat na následující hodnocení.

5.1 Hodnocení opotřebení nástroje

V rámci hodnocení opotřebení jednotlivých VBD bylo hodnoceno opotřebení VBD v závislosti na dráze.

Při použití řezných podmínek $vc_1f_1 = 60/100$ se opotřebení nástrojů zvyšovalo s rostoucí délkou/dráhou frézování.

- nejvyšší opotřebení nástroje bylo naměřeno u VBD D, kde hodnota opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $VBD = 7,67 \mu\text{m}$,
- nejmenší opotřebení bylo naměřeno, pro stejnou frézovanou dráhu 396 m, u VBD B = 1, $59 \mu\text{m}$.

Při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se opotřebení nástrojů zvyšovalo s rostoucí délkou/dráhou frézování.

- nejvyšší opotřebení nástroje bylo naměřeno u VBD D, kde hodnota opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $VBD = 40,19 \mu\text{m}$,

- nejmenší opotřebení bylo naměřeno, pro stejnou frézovanou dráhu 396 m, u VBD B = 17,27 μm .

5.2 Hodnocení drsnosti obrobené plochy

V rámci hodnocení opotřebení jednotlivých VBD byla hodnocena drsnost R_a v závislosti na opotřebení VBD.

Při použití řezných podmínek $vc_1f_1 = 60/100$ se drsnost povrchu obrobené plochy zhoršovala s velikostí opotřebení.

- nejvyšší drsnost obrobené plochy R_a byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla VBD = 7,67 μm při drsnosti $R_a = 1,93 \mu\text{m}$,
- nejmenší drsnost obrobené plochy R_a byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla VBD = 1,59 μm při drsnosti $R_a = 0,88 \mu\text{m}$.

Při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se drsnost povrchu obrobené plochy zhoršovala s velikostí opotřebení.

- nejvyšší drsnost obrobené plochy byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla VBD = 40,19 μm při drsnosti $R_a = 1,88 \mu\text{m}$.
- nejmenší drsnost obrobené plochy byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla VBD = 17,27 μm při drsnosti $R_a = 0,87 \mu\text{m}$.

5.3 Hodnocení řezné síly

Byla hodnocena závislost řezné posuvové síly F_{posuv} na opotřebení jednotlivých VBD.

Při použití řezných podmínek $vc_1f_1 = 60/100$ se řezná posuvová síla F_{posuv} zvyšovala s velikostí opotřebení.

- nejvyšší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla VBD = 7,67 μm při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 65,9 \text{ N}$,

- nejmenší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $VBD = 1,59 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 35,1 \text{ N}$.

Při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se řezná posuvová síla F_{posuv} zvyšovala s velikostí opotřebení.

- nejvyšší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $VBD = 40,19 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 80,1 \text{ N}$,
- nejmenší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $VBD = 17,27 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 51,3 \text{ N}$.

Při použití řezných podmínek $vc_1f_1 = 60/100$ se řezná posuvová síla F_{posuv} zvyšovala s drsností obrobené plochy R_a .

- nejvyšší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 1,93 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 65,9 \text{ N}$,
- nejmenší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 0,88 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 35,1 \text{ N}$.

Při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se řezná posuvová síla F_{posuv} zvyšovala s drsností obrobené plochy R_a .

- nejvyšší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 1,88 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 80,1 \text{ N}$.
- nejmenší řezná posuvová síla F_{posuv} byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 0,87 \mu\text{m}$ při použití řezné posuvové síly $F_{posuv} = 51,3 \text{ N}$.

5.4 Hodnocení delaminace

Při použití řezných podmínek $vc_1f_1 = 60/100$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním zvyšovala s drsností obrobené plochy R_a .

- největší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 1,93 \mu\text{m}$ při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 1810 μm ,
- nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 0,88 \mu\text{m}$ při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 170 μm .

Při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním zvyšovala s drsností obrobené plochy R_a .

- největší delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 1,88 \mu\text{m}$ při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 420 μm .
- nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené drsnosti obrobené plochy R_a pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla $R_a = 0,87 \mu\text{m}$ při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 130 μm .

Při použití řezných podmínek $vc_1f_1 = 60/100$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním zvyšovala s velikostí opotřebení.

- velikost největší delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 7,67 μm při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 1810 μm .
- nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 1,59 μm při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 170 μm .

Při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním zvyšovala s velikostí opotřebení.

- největší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřeného opotřebení

pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 40,19 μm při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 420 μm .

- nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřeného opotřebení pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 17,27 μm při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 130 μm .

Při použití řezných podmínek $vc_1f_1 = 60/100$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním zvyšovala s velikostí řezné posuvové síly F_{posuv} .

- největší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené velikosti řezné posuvové síly F_{posuv} pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 65,9 N při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 1810 μm .
- nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené velikosti řezné posuvové síly F_{posuv} pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 35,1 N při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 170 μm .

Při použití řezných podmínek $vc_2f_2 = 120/300$ se velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním zvyšovala s velikostí řezné posuvové síly F_{posuv} .





- největší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD D. Hodnota celkově naměřené velikosti řezné posuvové síly F_{posuv} pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 80,1 N při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 420 μm ,
- nejmenší velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla naměřena u VBD B. Hodnota celkově naměřené velikosti řezné posuvové síly F_{posuv} pro sledovanou obrobenou dráhu 396 m byla 51,3 N při velikosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním = 130 μm .

Po shrnutí výše uvedených výsledků lze konstatovat, že pro obrábění kompozitu s obsahem skelných vláken se jako nejvhodnější jeví VBD B s následujícími parametry $vc_1f_1 = 60/100$.

Důvodů je hned několik:

- řezná síla potřebná pro frézování povrchu je nejmenší,
- při použití této VBD B dochází k minimální delaminaci,
- tato VBD B vykazuje nejmenší opotřebení.

Tabulka 17: Souhrnný přehled jednotlivých parametrů

Přehled parametrů pro jednotlivé VBD					
VBD	Řezné podmínky	Opotřebení [μm]	Delaminace [μm]	Drsnost R_a	Cena [Kč/ks]
VBD A 	$v_{c1}f_1 = 60/100$	1,63 ± 0,02	280 ± 0,16	0,94 ± 0,14	468,-
	$v_{c2}f_2 = 120/300$	17,8 ± 0,2	140 ± 0,15	1,19 ± 0,10	
VBD B 	$v_{c1}f_1 = 60/100$	1,59 ± 0,20	170 ± 0,14	0,88 ± 0,25	477,-
	$v_{c2}f_2 = 120/300$	17,27 ± 0,02	130 ± 0,19	0,87 ± 0,02	
VBD C 	$v_{c1}f_1 = 60/100$	5,47 ± 0,02	1690 ± 0,20	1,47 ± 0,11	438,-
	$v_{c2}f_2 = 120/300$	28,49 ± 0,02	410 ± 0,18	1,71 ± 0,02	
VBD D 	$v_{c1}f_1 = 60/100$	7,67 ± 0,02	1810 ± 0,11	1,93 ± 0,08	438,-
	$v_{c2}f_2 = 120/300$	40,19 ± 0,02	420 ± 0,17	1,88 ± 0,20	

6 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo zjistit, za jakých podmínek – s jakým použitím výměnných břitových destiček – je vhodné frézovat kompozitní materiál na bázi termoplastu zpevněný skelnými vlákny.

Základní informace ohledně problematiky obrábění kompozitních materiálů zpevněných skelnými vlákny jsou uvedeny v kapitole 2. Kapitola rovněž obsahuje shrnutí dosavadních poznatků týkajících se charakteristiky, zpracování, obrábění a volby řezných nástrojů kompozitních materiálů. Tato kapitola dále také pojednává o technologii frézování (podkapitola 2.2).

Přípravě a popisu metodiky potřebné pro dosažení plánovaného cíle práce je věnována celá kapitola 3. Kapitola obsahuje celkový popis výroby vzorků (podkapitola 3.1), volby strojů, nástrojů (podkapitola 3.2 a 3.3). Daná kapitola dále popisuje postup experimentu a použitých zařízení s tím souvisejících (podkapitola 3.4).

Z naměřených hodnot a výsledků lze shrnout následující poznatky:

- při hodnocení opotřebení v závislosti na dráze dosáhla nejlepších výsledků VBD B při použitých řezných podmínkách $v_{c1}f_1 = 60/100$. **Hodnota opotřebení po obrobené dráze 396 m byla 1,59 μm .**
- při hodnocení drsnosti obrobené plochy R_a v závislosti na opotřebení dosáhla nejlepších výsledků VBD B při použitých řezných podmínkách $v_{c1}f_1 = 60/100$. **Drsnost R_a byla 0,94 μm při opotřebení 1,59 μm .**
- při hodnocení řezné síly F_{posuv} v závislosti na opotřebení dosáhla nejlepších výsledků VBD B při použitých řezných podmínkách $v_{c1}f_1 = 60/100$. **Velikost řezné síly F_{posuv} byla 35,10 N při opotřebení 1,59 μm .**
- při hodnocení závislosti řezné posuvové síly F_{posuv} na drsnosti R_a nejlepších výsledků VBD B při použitých řezných podmínkách $v_{c1}f_1 = 60/100$. **Hodnota řezné síly F_{posuv} byla 65,90 N při drsnosti $R_a = 1,93 \mu\text{m}$.**
- Při hodnocení závislosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na drsnosti povrchu R_a dosáhla nejlepších výsledků VBD B při použitých řezných podmínkách $v_{c2}f_2 = 120/300$. **Velikost delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla 130 μm při drsnosti $R_a = 0,87 \mu\text{m}$.**
- při hodnocení závislosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na opotřebení VBD dosáhla nejlepších výsledků VBD B při použitých řezných podmínkách $v_{c1}f_1 = 60/100$. Naměřená velikost **delaminace na straně**

vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla 170 μm při drsnosti při celkovém opotřebení 1,59 μm .

- při hodnocení závislosti delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním na řezné posuvové síly F_{posuv} dosáhla nejlepších výsledků VBD B při použitých řezných podmínkách $v_{c1}f_1 = 60/100$. Naměřená velikost **delaminace na straně vzorků obrobeného nesousledným frézováním byla 170 μm . Hodnota řezné síly F_{posuv} po obrobené dráze 396 m byla 35,10 N.**

K obrábění kompozitního materiálu s obsahem skelných vláken byl jako nejvhodnější vybrán nástroj pod označením VBD B. Jedná se o nástroj určený pro obrábění kompozitních materiálů. Nástroj vykazoval nejmenší opotřebení, nejmenší delaminaci a nejlepší drsnost povrchu obrobeného materiálu.

Co se ekonomického hlediska týká, VBD mají tu výhodu, že každá VBD obsahuje 6 břitů. To znamená, že ve srovnání s klasickými stopkovými frézami jsou VBD ekonomicky mnohem výhodnější. Při ceně 477,- Kč/1 VBD vychází cena na 79,50 Kč/1 břit.

Z výsledků obsažených v diplomové práci lze z hlediska řezných sil, drsnosti povrchu, opotřebení nástroje a delaminace doporučit řezné podmínky pro frézování termoplastů s obsahem skelných vláken $v_{c1}f_1 = 60/100$ bez přítomnosti procesní kapaliny.

Seznam použité literatury

- [1] KOČMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
- [2] BILÍK, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská – TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
- [3] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] Firemní podklady k nástrojům a obráběnému materiálu.
- [6] HUMÁR, A. *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů: Machining fibre reinforced composites: teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru strojírenská technologie*. Brno: VUTIUM, 2004. 26 s. ISBN 80-214-2740-x.
- [7] MÍŠEK, B. *Kompozity*. 1. vyd. BRNO: Technický dozorčí spolek Brno – Sekce materiálů a svařování, 2003. 81 s. ISBN 80-903386-0-7.
- [8] JANČÁR, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů* 1. vyd. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5
- [9] HUMÁR, A. a M. PÍŠKA. *Cutting forces analysis when drilling glass fibre reinforced plastics*. In *Proceedings of the 31st International SAMPE Technical Conference*, vyd. 31. *Advanced Materials & Processes Preparing for the New Millenium*. McCormick Place, CHICAGO, Illinois, USA: SAMPE, 1999. s. 276-285. ISBN: 0-938994-85-9.
- [10] HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANSKÝ, M., PODRÁBSKÝ, T., ČECH, V. *Technologie zpracování nových kompozitních materiálů tuzemské výroby. Závěrečná zpráva grantového projektu GAČR č.101/98/0855*. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Ústav strojírenské technologie, 2000. 154 s.
- [11] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340

- [12] SEDLÁČEK, Jan. Problémy při obrábění kompozitních materiálů. MM Spektrum [online]. Brno, 2007, 2007(4) [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: Problémy při obrábění kompozitních materiálů | MM Průmyslové spektrum (mmspektrum.com)
- [13] AHMAD, Jamal Sheikh. Machining of Polymer Composites. The Petroleum Institute, Department of Mechanical Engineering Abu Dhabi, United Arab Emirates : Springer Science + Business Media, LLC, 2009. ISBN: 0387355391, 9780387355399
- [14] REJL, Oldřich. Kompozitní materiály ve stavebnictví. *Stavba.tzb-info.cz* [online]. 16.5.2013 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909-kompozitni-materialy-ve-stavebnictvi>
- [15] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály definice a rozdělení* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2023-04-27]. Technická univerzita v Liberci.
- [16] SEDLÁČEK, Ondřej a Jan PROKEŠ. Inovovaná kompozitní výztuž firmy PREFA KOMPOZITY, a. s. *Stavební investorské noviny* [online]. 23.11.2017 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://tvstav.cz/clanek/4779-inovovana-kompozitni-vyztuz-firmy-prefa-kompozity-a-s>
- [17] GRÉGR, Jan. Skleněná vlákna – historie a současnost. In: *Czech Design* [online]. 24.4.2003 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.czechdesign.cz/temata-a-rubriky/sklenena-vlakna-historie-a-soucasnost>
- [18] *Řezné podmínky při frézování* [online]. In: . [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1238>
- [19] Sousedné a nesousedné frézování. In: *Profitek,s.r.o.* [online]. 10.3.2021 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://eshop.profittek.cz/texty/sousledne-a-nesousledne-frezovani/>
- [20] Pramet – Katalog [online]. [cit. 2017-06-26]. Dostupné z: http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/_spolecne/katalog_nastroju_frezovani.pdf
- [21] Kompozity na konci svého života. *Material Times* [online]. 22.8.2021 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.materialtimes.com/tema/kompozity-na-konci-sveho-zivota.html>
- [22] VNOUČEK, Milan. *Kompozitní materiály* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf

- [23] AHMAD, Jamal Sheikh a A.H. SHAHID. *Effect of edge trimming on failure stress of carbon fibre polymer composites* [online]. 2013 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/264837134_Effect_of_edge_trimming_on_failure_stress_of_carbon_fibre_polymer_composites
- [24] *Opotřebení nástroje* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1203>
- [25] HUMÁR, Anton, *Technologie obrábění – 1. část, studijní opory pro magisterské studium, UST FSI VUT v Brně, 2003, [Online], dostupné z:* http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [26] HUMÁR, A. *Technologie obrábění – 2. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia. [online]. 2003. 94 s. Dostupné z:* http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-2cast.pdf
- [27] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. První. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [28] DULEBOVÁ, Ľudmila. *Progresivně vyvíjeny polymerní kompozity v automotive. PlasticPortal.eu* [online]. 13.11.2013 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/progresivne-vyvijeny-polymerni-kompozity-v-automotive/c/1945/>
- [29] COLLIGAN, K.; RAMULU, M. *Delamination in surface plies of graphite/epoxy caused by the edge trimming process*. In: *Processing and Manufacturing of composite materials*. 1991. p. 113-125.
- [30] *10. Frézování* [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/STT2-10_Frezovani_RAJ.pdf
- [31] *5. Měření opotřebení nástrojů* [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf
- [32] *8. Měření složek síly řezání* [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf
- [33] *Technologie výroby: co je to kompozit?. Prefa kompozity* [online]. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/co-je-to-kompozit/>

- [34] Vše o kompozitu. *I Builder* [online]. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://ibuilder-cs.techinfus.com/materialy/kompozit/>
- [35] ŠVRČINA, Josef. *Podstata frézování* [online]. 2011/2012 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/Praxe_II_a_III/VY_52_INOVACE_H-02-20.pdf
- [36] *Vysoce kvalitní karbidové frézy na kompozity a plasty* [online]. 23.11.2021 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.stopkovefrezy.cz/blog/frezynakompozity>
- [37] AHMAD, Jamal Sheikh a A.H. SHAHID. *Effect of edge trimming on failure stress of carbon fibre polymer composites* [online]. 2013 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/264837134_Effect_of_edge_trimming_on_failure_stress_of_carbon_fibre_polymer_composites
- [38] *Opotřebení nástroje* [online]. [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1203>