



Bakalářská práce

Studie změny úhlu čela řezného nástroje a vlivu druhu řezného povlaku na průvodní jevy při frézování kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny.

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Jiří Kutík

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Knápek

Katedra obrábění a montáže

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Studie změny úhlu čela řezného nástroje a vlivu druhu řezného povlaku na průvodní jevy při frézování kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny.

Jméno a příjmení:

Jiří Kutík

Osobní číslo:

S22000317

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Zadávající katedra:

Katedra obrábění a montáže

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o kompozitních materiálech na bázi reaktoplastů a jejich obrábění, shrnutí poznatků o měřicích metodách opotřebení nástrojů, řezných sil a delaminace, shrnutí poznatků o metodách nanášení tenkých povlaků na řezné nástroje.
2. Volba vhodného řezného nástroje, geometrie, řezných podmínek a vhodného povlaku pro obrábění uhlíkových kompozitů s reaktoplastickou maticí.
3. Návrh metodiky prováděných experimentů
4. Realizace experimentů.
5. Vyhodnocení získaných výsledků z experimentů, vyobrazení závislostí změny geometrie na opotřebení, řezné síly a delaminaci. Vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce:

tištěná/elektronická

Jazyk práce:

čeština

Seznam odborné literatury:

1. EHRENSTEIN, G. W. Polymerní kompozitní materiály, v ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
2. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
3. AHMAD, J. Machining of polymer composites. Boston, MA: Springer US, 2009. ISBN 978-0-387-68619-6.
4. BACH, F.-W., LAARMANN, A. & WENZ, T. eds., 2006. Modern surface technology, Weinheim: Wiley-VCH.
5. LIDAŘÍK, M. a kol. Epoxidové pryskyřice. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983. 732 s

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Knápek

Katedra obrábění a montáže

Datum zadání práce:

2. října 2023

Předpokládaný termín odevzdání:

24. května 2024

L.S.

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

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
garant studijního programu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom 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 bakalářská 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 vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá změnou úhlu čela řezného nástroje a vlivem ochranného povlaku na průvodní jevy při plošném frézování kompozitu s uhlíkovým vláknem vázaným vazbou kepr 24K.

Cílem této práce je určit vliv ochranného povlaku a úhlu hřbetu frézovacího nože na opotřebení nástroje, řezné síly vytvořené frézováním a delaminaci vzorku.

Tato problematika je velice aktuální v moderním průmyslu, jelikož je za potřebí vyrábět přesné díly z kompozitních materiálů, což problémy spojené s opotřebením vlivem abraze na ochranný povlak nástroje nedovolují.

Klíčová slova: frézování, kompozitní materiály s uhlíkovým vláknem, opotřebení, řezné síly, delaminace

Annotation

This bachelor's thesis deals with the change of the angle of the face of the cutting tool and the effect of the protective coating on the accompanying phenomena during surface milling of a composite with carbon fiber bonded with a 24K twill weave.

The aim of this work is to determine the effect of the protective coating and the angle of the milling cutter back on the tool wear, the cutting force generated by milling and the delamination of the sample.

This issue is very topical in modern industry, as it is necessary to produce precise parts from composite materials, which problems associated with wear due to the effect of abrasion on the protective coating of the tool do not allow.

Key words: milling, carbon fiber composite materials, wear, cutting forces, delamination

Poděkování

Tímto chci poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Knápkovi za cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod	5
2. Teorie.....	6
2.1. Frézování	6
2.2. Kompozit.....	8
2.2.2. Uhlíkové vlákno	10
2.3. Způsoby obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem	13
2.3.1. Obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem vodním paprskem	13
2.3.2. Obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem frézováním	14
2.4. Problémy při obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem	14
2.5. Úpravy nástroje pro obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem	18
2.5.1. Typy nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů.....	18
2.6. Typy opotřebení nástroje a jejich příčiny	21
2.7. Metody zjištění opotřebení nástroje při obrábění kompozitních materiálů.....	26
2.8. Měření sil při frézování kompozitu s uhlíkovým vláknem	26
2.8.1. Dynamometr	27
2.8.2. Laserový konfokální mikroskop	27
3. Metodika	29
3.1. Frézka	29
3.2. Odsávací a upevňovací zařízení	30
3.3. Nástroje	31
3.4. Povlaky.....	32
3.5. Vzorek.....	33
3.6. Měření sil.....	34
3.7. Konfokální mikroskop.....	36
4. Experimentální část	37
4.1. Opotřebení nástroje	37
4.1.1. Závislost opotřebení povlaku nože na čase frézování.....	37
4.1.2. Změna geometrie nástroje	42
4.2. Delaminace vzorku	47
4.3. Síly při frézování	54
5. Vyhodnocení a diskuze výsledků	59
6. Závěr	62
Seznam zdrojů	64

Seznam zkratek

CNC		počítačové numerické zařízení
MMC		kompozit s kovovou maticí
PMC		kompozit s polymerovou maticí
CMC		kompozit s keramickou maticí
NFC		kompozit s přírodní maticí
CFRP		polymery vyztužené aramidovými vlákny
FGC		funkční kompozit
PAN		polyakrylonitril
PCD		polykrystalický diamant
PVD		fyzická depozice plynu
t	[min]	čas
D1	[mm]	průměr řezné části
D2	[mm]	průměr stopky
L1	[mm]	celková délka nástroje
L2	[mm]	délka řezné části nástroje

1. Úvod

Kompozitní materiály jsou moderní materiály, které mají rozsáhlé použití v mnoha odvětvích. Jsou tvořeny dvěma či více složkami s rozdílnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které se navzájem doplňují a zlepšují výsledné vlastnosti. Složky, ze kterých je takovýto materiál tvořen, se nazývají výztuž a matrice. Tyto materiály se vyznačují velkou pevností, tuhostí a odolností proti korozi. Tyto vlastnosti je činí ideální volbou pro širokou škálu aplikací v různých odvětvích jako například letectví, automobilový průmysl, stavebnictví či sportovní vybavení.

Z kompozitních materiálů se dají vytvářet díly finálních podob, ale i přesto jsme občas nuceni tyto díly podrobit obrábění pro dosažení námi požadovaného rozměru. Jedním z nejčastějších druhů obrábění, který se používá na kompozitní materiály je frézování. Používá se pro dosažení přesných rozměrů či pro tvorbu tvarových drážek. Bohužel díky vlastnostem, které mají kompozitní materiály není vůbec lehké takový materiál obrábět. Nástroje používané k obrábění kompozitních materiálů trpí rychlým opotřebením. Toto opotřebenění pak vede ke vzniku povrchových poruch jako například delaminace.

Tato bakalářská práce má za cíl zjistit vliv ochranných povlaků a úhlu čela nástroje na opotřebenění, delaminaci a síly při konturovém frézování hrany kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem vázaným keprovou vazbou.

K dosažení cíle této bakalářské práce je nutné nejdříve navrhnout vhodné nástroje s různými úhly čela vyrobenými ze stejného materiálu, které budou opatřeny různými ochrannými povlaky. Poté připravit veškeré stroje a měřicí zařízení potřebné k zrealizování experimentu, vytvořit metody postupu pro takový experiment, realizovat experiment a nakonec vyhodnotit výsledky.

2. Teorie

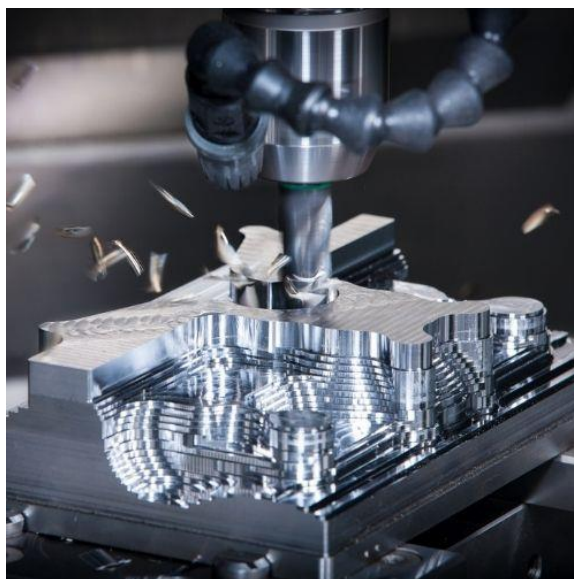
Tato část se zabývá podstatnými informacemi potřebnými k obrábění kompozitních materiálů a vlivu obrábění na nástroje. Kompozitní materiály jsou moderní materiály tvořené z minimálně dvou složek. Tyto složky svým spojením vytvoří pevnější materiály, než jaký by vytvořili tyto složky samy o sobě. Kompozity se vyznačují velkou pevností a nízkou hmotností. To z nich dělá vynikající volbu pro moderní součástky. Tato jejich pevnost však brání i v jejich obrobiteľnosti. Z tohoto důvodu je tato práce zaměřena na vliv kompozitního materiálu na nástroj a jeho ochranný povlak. V podkapitole 2.1 je stručná definice frézování a jeho druhy. Podkapitoly 2.2 až 2.4 se zabývají kompozitními materiály (zejména kompozitní materiály s uhlíkovým vláknem) a jejich výrobou, metodou obrábění a problémy spojenými s tím. Podkapitola 2.5 pojednává o nástrojích používaných na obrábění kompozitních materiálů a na konec podkapitoly 2.6 a 2.7 řeší metody měření opotřebení nástrojů.

2.1. Frézování

Frézování je druh obrábění, který využívá rotační frézku k řízenému odstraňování materiálu z obrobku viz. obr 1. Tato subtraktivní výrobní technika má za cíl dostat obrobek do požadovaného tvaru. Moderní frézky jsou často spárována s CNC (počítačovým numerickým řízením) pro automatizované řízení celého procesu.

Hlavní pracovní částí frézky je rotační řezný nástroj (fréza). Tento řezný nástroj je zodpovědný za proces odstraňování materiálu. Frézky mohou využívat jednobodové i vícebodové řezné nástroje.

Řezný nástroj se při frézování pohybuje kolmo k ose otáčení. Obrobek se setkává s frézou v rotační tečně, což vede k procesu úběru materiálu. [1]



Obr. 1- Proces frézování[2]

Typy frézovacích operací

Čelní frézování: Čelní fréza má podobný tvar jako vrták. Konce frézy jsou však schopny řezat radiálně i axiálně viz obr. 2. pravý.

Plošné frézování: Plošná fréza se používá při opracování povrchu obrobku viz obr. 2. levý. Dokáží změnit nerovný povrch na povrch rovný a také dokáže vytvořit velmi hladké finální povrchové úpravy.

Frézování zkosení: Fréza na zkosení se používá k výrobě úkosů, odstraňování otřepů, zahlubování a bodování.

Frézování drážek: Frézování drážek používá dlouhý rotační řezný nástroj k vytváření drážek v obrobku.

Obvodové frézování: Při obvodovém frézování je řezný nástroj umístěn rovnoběžně s obrobkem. Strany řezného nástroje se proto obrousí o pracovní plochu místo o hrot nástroje. Jedná se o opak procesu čelního frézování. Periferní frézování je vhodnější, když je vyžadováno velké množství úběru materiálu.

Sousledné frézování: Při sousledném frézování se řezný nástroj otáčí ve směru posuvu.

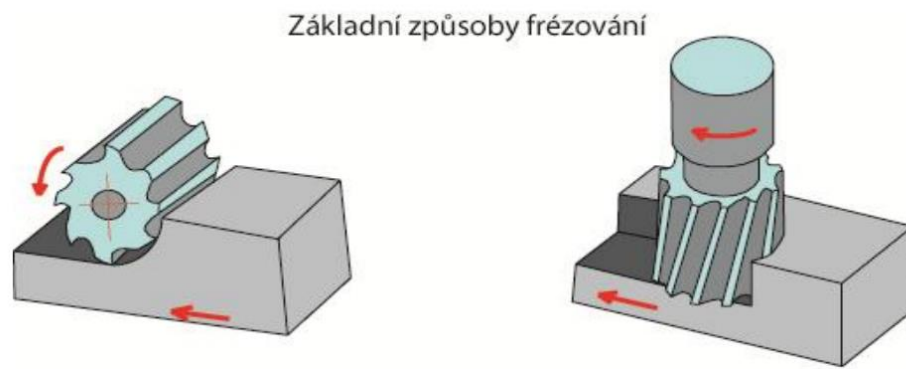
Profilové frézování: Proces profilového frézování se používá při obrábění svislých ploch nebo svisle nakloněných ploch.

Šroubové frézování: Šroubové frézování vytváří spirálové dráhy, kanály a otvory ve válcovém obrobku. Šroubové frézování je běžný typ procesu pro vytváření mazacích otvorů.

Ponorné frézování: Při ponorném frézování je posuv ve stejném směru jako osa nástroje. Tento proces je také známý jako frézování v ose Z. Ponorné frézování se běžně používá ve fázi hrubování. Fréza se zanoří do obrobku a vyřeže v materiálu kapsy.

Frézování závitů: Frézování závitů se používá k výrobě vnitřních i vnějších závitů obrobku.

CNC frézování: CNC frézování využívá počítačové programy k řízení pohybu řezného nástroje. Dokáží vytvářet vysoce složité součásti při vysokých rychlostech.



Obr. 2- Plošné a čelní frézování[3]

2.2. Kompozit

Kompozit je druh materiálu, který je tvořen dvěma či více odlišnými složkami s odlišnými vlastnostmi tak aby vytvořil materiál, s vlastnostmi lepšími, než mají samy složky, které jej tvoří. Složky tvoří obvykle jeden materiál sloužící jako základní struktura (matrice) a druhý materiál sloužící jako výztuž. Výsledný materiál je díky tomu schopen dosahovat vyšší pevnosti a nižší hmotnosti. Kompozitní materiály jsou využívány v mnoha odvětvích například automobilový průmysl, letectví stavebnictví a lékařství.

2.2.1. Druhy kompozitů

Nanokompozity

Nanokompozity jsou vytvářené člověkem, ale i přirozeně se vyskytující v přírodě. Výztuž je obecně nanomateriál, jako jsou uhlíkové nanotrubičky nebo grafen přidané do polymerní matrice, nebo křemíkové nanočástice přidané do oceli pro vyvolání růstu jemných krystalů.

Kompozity s kovovou maticí (MMC)

MMC používají kovovou matici, jako je hliník nebo hořčík, a vysokopevnostní vláknovou výztuž ve formě částic nebo štětín. Výztuhy jsou obecně částice z uhlíkových vláken nebo karbidu křemíku.

Kompozity s polymerovou maticí (PMCs)

PMC jsou nejrozšířenější a snadno pochopitelné formy kompozitních materiálů. Tento termín zahrnuje ruční pokládání tkanin z uhlíkových a skleněných vláken a ruční, vstříkované nebo předem impregnované epoxidy a polyesterové pryskyřice, které tvoří matici.

Polymery vyztužené skelným vláknem

GFRP jsou podskupinou kompozitů s polymerní maticí, které jsou specifické pro materiály ze skleněných vláken spojené epoxidem nebo polyesterem.

Hybridní kompozity

Hybridní kompozity jsou takové, ve kterých jsou do finálního materiálu integrována dvě nebo více různých výztužných vláken.

Kompozity s keramickou maticí (CMCs)

CMC se skládají z keramické matrice a výztužných vláken. Keramická matrice poskytuje extrémní teplotní a korozivzdornou odolnost a vynikající vlastnosti proti opotřebení.

Kompozity s přírodním vláknem (NFCs)

Přírodní vlákna, jako je juta, len, bavlna a dřevo, se používají různými způsoby. Automobilové interiérové panely jsou běžně vyráběny z přírodních vláken spojených pryskyřicí, která jsou lisována do tvaru a poté čalouněna plasty nebo kůží pro finální povrchovou úpravu.

Polymery vyztužené uhlíkovým vláknem (CFRPs)

CFRP jsou další podskupinou kompozitů s polymerní matricí, která je specifická pro epoxidová a polyesterová uhlíková vlákna.

Polymery vyztužené aramidovými vlákny (AFRPs)

AFRP jsou další podskupinou kompozitů s polymerní matricí, které využívají aramid jako výztuž.

Funkční kompozity (Functionally Graded Composites) (FGCs)

FGC jsou v podstatě podmnožinou jakéhokoli typu kompozitu. Jedná se o kompozitní materiály, ve kterých lze jednotlivé součásti modifikovat v aplikaci nebo typu prostřednictvím struktury pro vyladění výkonu. [4]

2.2.2. Uhlíkové vlákno

Uhlíková vlákna lze definovat jako vlákna s obsahem uhlíku 90 % nebo vyšším. Hlavní výhodou uhlíkových vláken oproti jiným vláknům je vysoká pevnost v tahu, vysoká tuhost, nízká hustota a vysoká chemická odolnost. Všechny tyto výhody lze kombinovat s adekvátním materiálem matrice (polymerní pryskyřici) pro poskytnutí vynikajících mechanických vlastností kompozitních dílů. Tyto kompozitní komponenty jsou lehké a mají velmi dobré mechanické vlastnosti ve srovnání s díly vyrobenými z kovů, jako je hliník nebo jiné kompozity vyztužené vlákny. To ospravedlňuje použití uhlíkových vláken ve srovnání s jinými možnými vláknitými materiály, jako jsou skleněná nebo organická vlákna a kov. Hlavní aplikace polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny zahrnují letectví a obranu, automobilový průmysl, větrné turbíny, sport a volný čas a stavební inženýrství. Zejména automobilový sektor silně roste s ohledem na lehké konstrukce, které snižují spotřebu energie. [5]



Obr. 3- Uhlíkové vlákno[6]

Výroba uhlíkových vláken

Surovina použitá k výrobě uhlíkových vláken se nazývá prekurzor. Asi 90 % vyrobených uhlíkových vláken je vyrobeno z polyakrylonitrilu (PAN). Zbývajících 10 % je vyrobeno z umělého hedvábí nebo ropné smoly. [7]

Filace (spinning)

Jedná se o krok, u kterého jsou vytvářena dlouhá vlákna. Polymer je rozpuštěn na monomery a vytlačen skrz trysku což vytvoří tenké vlákno.

Stabilizace

Vlákna jsou zahřata na vzduchu na teplotu 200-300°C po dobu 30-120 minut. Díky tomu vlákna nabudou molekuly kyslíku a přeskupí svůj atomový vzor.

Karbonizace

Po dokončení stabilizace jsou vlákna opět zahřata. Tentokrát na teplotu 1000-1300°C v peci naplněné směsí plynů která neobsahuje kyslík. Díky nedostatku kyslíku nedojde ke spálení vláken. „Jak se vlákna zahřívají začnou ztrácet své neuhlíkové atomy plus několik atomů uhlíku ve formě různých plynů včetně vodní páry, čpavku, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého, vodíku, dusíku a dalších.“ [7] Po vypuzení neuhlíkových atomů zbydou pouze atomy uhlíku které nyní tvoří pevné uhlíkové krystaly uspořádané víceméně rovnoběžně s osou vlákna.

Ošetřování povrchu

Výsledný povrch po karbonizaci je špatně spojitelný s epoxidy a dalšími materiály. Proto je povrch vláken přidáním kyslíku mírně oxidován. Toto přidání povrch také leptá a zdrsňuje pro lepší mechanické vazebné vlastnosti. Oxidace může být provedena ponořením vláken do plynů jako je vzduch, oxid uhličitý ozón nebo kapalin jako chloran sodný nebo kyselina dusičná. Proces musí být důkladně pozorován, aby bylo zabráněno vzniku drobných povrchových defektů jako jsou důlky.

Dimenzování

Po povrchové úpravě jsou vlákna potažena, aby byla chráněna před poškozením při navíjení nebo tkání. Tento proces se nazývá dimenzování. Potahové materiály se volí tak, aby byly kompatibilní s lepidlem používaným k vytvoření kompozitních materiálů. Mezi typické nátěrové materiály patří epoxid, polyester, nylon, uretan a další. Potažená vlákna jsou navinuta na válce zvané cívky. Cívky se vloží do spřádacího stroje a vlákna se stočí do přízí různých velikostí. [7]



Obr.4- Výroba uhlíkového vlákna ve firmě BMW[8]

2.3. Způsoby obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem

Kompozity s uhlíkovým vláknem jsou nejčastěji obráběny dvěma způsoby. Jedná se o obrábění vodním paprskem a frézování za pomoci CNC. Každý z těchto způsobů má své výhody a nevýhody.

2.3.1. Obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem vodním paprskem

Při obrábění vodním paprskem se zrnitý křemičitan nebo podobný materiál smísí s vodou a poté se vypustí při extrémně vysokém tlaku (obvykle kolem 60 000 až 100 000 psi) a vysoké rychlosti (přibližně 3090 m/s). Proud je koncentrován do speciálně designované trysky s průměrem 0.254 mm viz. obr. 5. [9]

Tato metoda je výhodná z důvodu toho že nevytváří teplo, prach a nezpůsobuje delaminaci kompozitu.

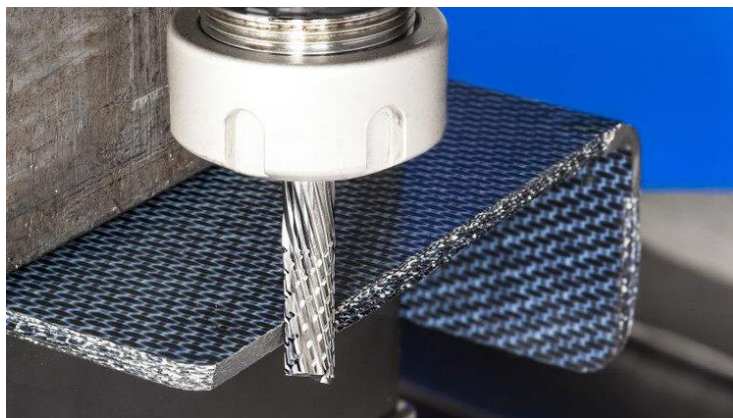
Nevýhodou však je že u tohoto způsobu nelze zahlubovat či obrábět plochy a pokud chceme řezat uvnitř obrobku je zapotřebí předvrtat díru.



Obr. 5- Obrábění loga Lamborghini z kompozitu s uhlíkovým vláknem pomocí vodního paprsku[10]

2.3.2. Obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem frézováním

Obrábění kompozitu z uhlíkových vláken se obecně provádí frézou viz. obr. 6. Obrábění kompozitu z uhlíkových vláken vyžaduje vyšší otáčky vřetena než u kovů, ale nižší posuv. Posuv je třeba upravit, aby se minimalizovalo teplo v obrobku. Uhlíkové vlákno má nízkou tepelnou vodivost, a proto většina tepla zůstává v součásti. Toto teplo z řezání může způsobit poškození pryskyřice. Vzhledem k tomu, že chladicí kapalina nemusí být při obrábění kompozitu z uhlíkových vláken povolena, musí být k regulaci tepla v součásti během obrábění použito drahých nástrojů. [11]



Obr. 6- Obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem pomocí frézy[12]

2.4. Problémy při obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem

Změna rozměrů

Jedním z klíčových problémů při obrábění kompozitů je to, že obrobené otvory a kapsy budou mít tendenci být poddimenzované, protože materiál se při řezání uvolňuje. Účinek je obtížné až nemožné předvídat, protože vlákna v materiálu leží v nepředvídatelných směrech. Řešení tohoto problému vyžaduje rozsáhlou kontrolu a seřízení, což je proces, který je nejučinnější, když je automatizován pomocí sondování. [10]

Náklady na recyklaci

V době, kdy je kompozit připraven k obrábění, se již stal tak cenným, že náklady na jeho likvidaci mohou být obrovské.

Kompozitní díly jsou díly téměř čistého tvaru. Jsou vyrobeny na zakázku do tvarů a tolerancí, které jsou poměrně blízké tomu, co bude hotový díl.

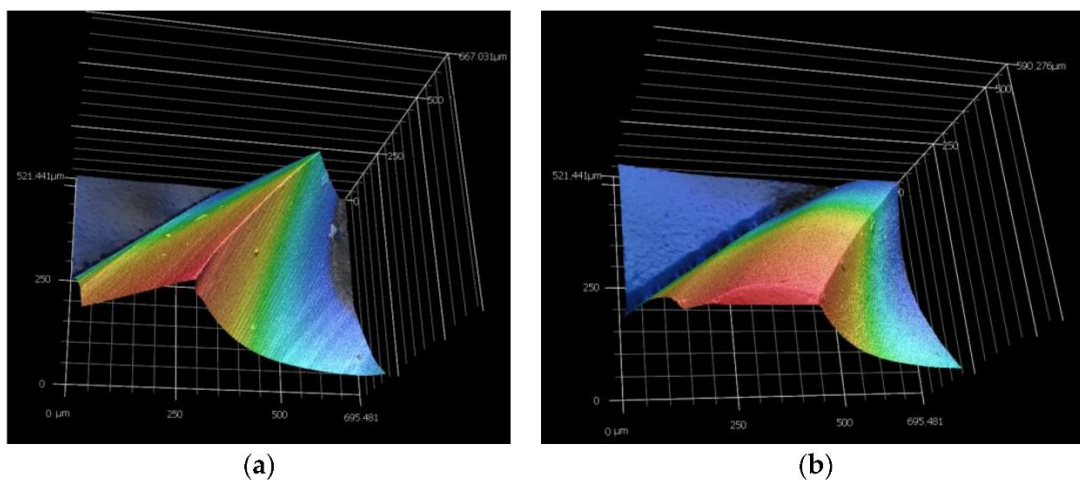
Právě zakázkové tvarování spolu s náklady na materiál vytváří vysoké náklady ještě před zahájením obrábění kompozitů. [10]

Abrazivita

Kompozity reagují na běžné obráběcí nástroje jinak než kovy. Práce s kompozitem spočívá v pohybu přes různé vrstvy kompozitu, což jsou různé materiály.

Například pryskyřice často používané v matricových vrstvách mají tendenci se odlamovat na okraji, zatímco výztužná uhlíková vlákna mohou být řezána nebo pouze lámána. Kromě toho, stejně jako u obrábění vysokoteplotních slitin vyžadují jiné nástroje, jiné řezné rychlosti a jiné rychlosti posuvů než u běžnějších kovů.

Chcete-li používat kompozity při obrábění v první řadě, potřebujete specifické nástroje, protože většina kompozitů je extrémně abrazivní a nástroje se rychle opotřebovávají viz. obr. 7. Kvůli tomu potřebujeme vysoce ostrou hranu, která zabrání delaminaci, což ale přispěje k rychlému opotřebení. Nástroje a materiály mají také tendenci se při obrábění zahřívat, protože teplo není odváděno v třískách jako u většiny čistých kovů. Teplo je dalším nepřítelem životnosti nástroje. [10]



Obr. 7- Detail ostří nástroje: a) nové ostří; b) opotřebované ostří[13]

Prašnost

Obrábění kompozitů obecně vytváří obrovské množství prachu a nepořádku.

Obrábění uhlíkových vláken vytváří uhlíkový prach, který je škodlivý pro plíce a také může poškodit elektroniku, protože uhlík je elektricky vodivý a prach zkratuje elektroniku, na které se usadí.

Při obrábění kompozitů je pro bezpečnost operátora a pro údržbu stroje důrazně vyžadováno odsávání prachu. [10]

Třísky

Tříska je obvykle tvořena uhlíkovým vláknem, která je křehčí než sklo a pro operátora, který kompozity nezná, vytváří mnohem nebezpečnější prostředí. [10]



Obr. 8- Deformační oblasti při obrábění kompozitního materiálu[14]

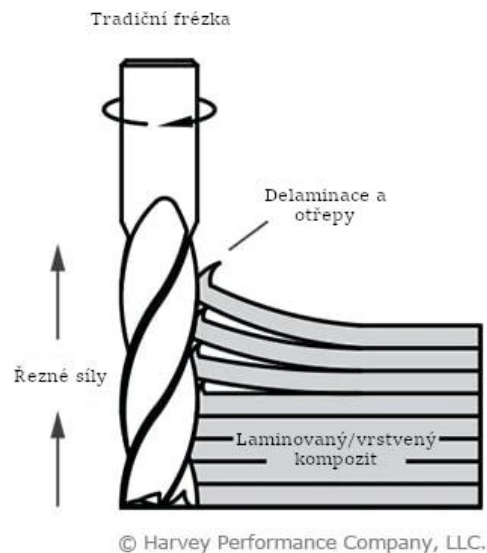
Oblast I: V této oblasti dochází k vlastnímu oddělení třísky od materiálu. Střížná rovina má tvar tzv. cik-cak křivky, protože iniciační trhlinky vznikající při zatížení vláken břitem nástroje se šíří kolmo na osy vyztužujících vláken a naopak následná delaminace vazby matrice – vlákna ve směru os vyztužujících vláken.

Oblast II: V důsledku pozitivního úhlu čela a tím i řezu nevzniká povrch obrobene plochy řezáním, ale především tvářením, čímž jsou jak vlákna, tak matrice zatlačována pod břit nástroje.

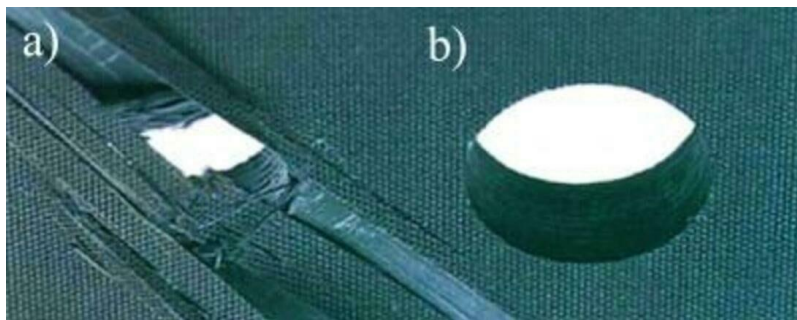
Oblast III: Vlivem pružných deformací se po odlehčení nástroje část povrchové vrstvy vrací nazpět, což zvyšuje tření mezi nástrojem a již obrobenu plochou. [15]

Delaminace

Tento typ porušení je způsoben interlaminárním napětím a smykem, které se vytváří v důsledku různých faktorů, jako jsou: Efekty volných hran, strukturální diskontinuity, oblastní poruchy během výroby a v pracovních podmínkách, jako je náraz padajících předmětů, vrtání během výroby viz. obr. 10, vlhkost a teplotní změny a mechanismy vnitřního selhání, jako je praskání matrice. Delaminace, skrytá před povrchovou vizuální kontrolou, leží často pohřbena mezi vrstvami a může začít růst v reakci na vhodný způsob zatížení, čímž se drasticky sníží tuhost konstrukce a tím i životnost konstrukce. K růstu delaminace často dochází ve spojení s jinými způsoby porušení, zejména s praskáním matrice. [16]



Obr. 9- Delaminace materiálu při frézování[17]



Obr. 10- Vzhled vrtané díry s delaminací a bez delaminace[18]

2.5. Úpravy nástroje pro obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem

Ochranné povlaky

Preferovaným povlakem nástroje pro kompozity a zejména uhlíková vlákna je polykrystalický diamant (PCD). Vzhledem k tomu, jak tvrdý je diamant, mohou tyto nástroje odolat abrazivní povaze procesu obrábění kompozitu mnohem lépe než nástroje z obyčejného karbidu. Dobrý nástroj PCD může běžet 3x rychleji v kompozitech a vydrží až 25x déle než karbid. [10] Další výhodou použití PCD je to, že diamant má největší tepelnou vodivost ze všech rezných materiálů, což z něj pro obrábění kompozitů dělá výbornou volbu.

Geometrie nástroje

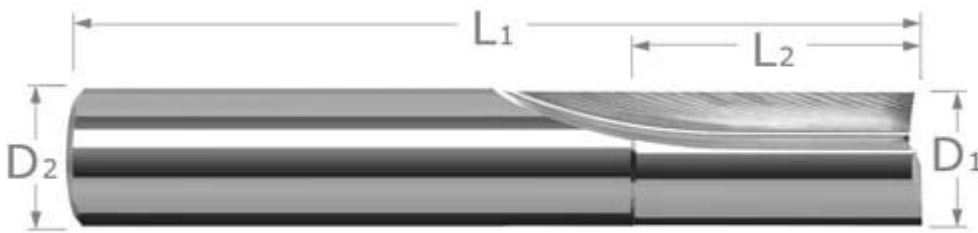
Stejně jako u jakéhokoli jiného materiálu existují u nástrojů určených pro kompozity úvahy o geometrii. Například 90° úhly náběhu jsou preferovány u indexovatelných nástrojů, protože 90° náběhy generují převážně radiální síly. Axiální síly jsou pro kompozity špatné, protože způsobují trhání a třepení vláken. [10]

U nástroje je upřednostňován vysoký kladný sklon břitu, protože napomáhá rychlému a ostrému odlomu materiálu. Dalším důležitým aspektem je dostatečný úhel hřbetu, díky kterému nedochází k otěru a hromadění tepla.

2.5.1. Typy nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů

Fréza s přímým ostřím

Kompozitní frézy s přímým ostřím jsou navrženy tak, aby zabraňovaly delaminaci vrstvených materiálů aplikací všech rezných sil radiálně, čímž se eliminují axiální síly z typického šroubovitého ostří. Viz. obr. 11.

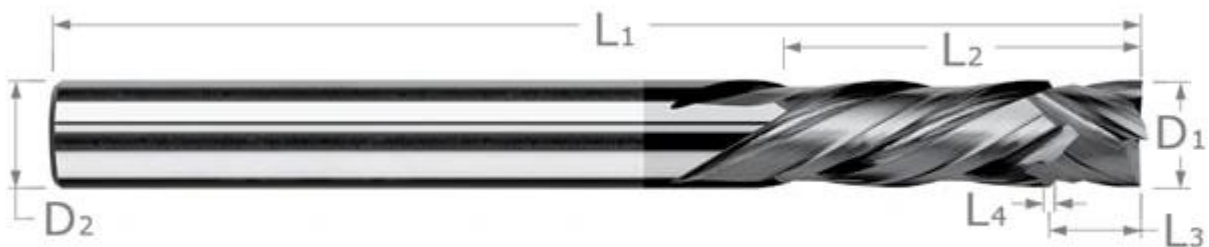


© Harvey Tool Company, LLC.

Obr. 11- Fréza s přímým ostřím [19]

Kompresní frézy

Kompresní fréza se skládá ze šroubovice s břitem nahoru a dolů. Horní část délky břitu má pravé řezné zuby s levou spirálou. Spodní část délky břitu má pravé řezné zuby s pravostrannou spirálou. Viz. Obr. 12. To vytváří opačné řezné síly pro stabilizaci procesu odstraňování materiálu při řezání vrstvených kompozitů, tak aby se zabránilo delaminaci, vytahování vláken a otřepům podél povrchu.



© Harvey Tool Company, LLC.

Obr. 12- Fréza s přímým ostřím [19]

Třískové frézy

Třísková fréza je ideální pro hrubování a profilování kompozitů s vysokým procentem výplně vláken. Třískové frézy stříhají vlákna a zkracují třísky pro lepší odvod materiálu. Tato specializovaná geometrie je skvělá pro udržení malých třísek a zamezení „uhníždění“ vláknitých třísek kolem frézy. Toto je vidět na Obr. 13.



© Harvey Tool Company, LLC.

Obr. 13- Třísková fréza [19]

Koncové frézy s diamantovým ostřím

Kompozitní frézy s diamantovým břitem se dodávají ve dvou různých geometriích: Styl čelní frézy viz. obr. 14 a Styl vrtací frézy viz. obr. 15. Ačkoli je nástroj ve stylu stopkové frézy středový, vrtací fréza má úhel vrcholu 140° , a proto je vhodnější pro ponorné řezání. To je skvělé pro čištění kapes uprostřed kompozitních listů. Stopkové frézy a vrtací frézy sdílejí stejnou geometrii a seříznutí na vnějším průměru. Tyto diamantové řezné nástroje získali svůj název podle kombinace levých a pravých zubů. Tyto nástroje jsou převážně typu downcut – geometrie, která těmto nástrojům umožňuje efektivně hrubovat a profilovat kompozity hustě vyztužené vlákny, rozbít třísky a prořezávat vlákna.



© Harvey Tool Company, LLC.

Obr. 14- Koncová čelní fréza s diamantovým řezem [19]



© Harvey Tool Company, LLC.

Obr. 15- Koncová vrtací fréza s diamantovým řezem [19]

Finišovací fréza

Finišovací fréza má optimalizovanou geometrii pro dokončování v kompozitu. Pomalá šroubovice a vysoký počet drážek s velkým počtem kontaktních bodů v konečném důsledku poskytuje hladký povrch s minimalizací třepení vláken vyztužených a vrstvených materiálů. Viz. Obr. 16.

[19]



© Harvey Tool Company, LLC.

Obr. 16- Finišovací fréza

2.6. Typy opotřebení nástroje a jejich příčiny

Při obrábění kompozitních materiálů převládá zejména abrazivní opotřebení. Toto opotřebení je způsobeno tvrdými vlákny kompozitu, které se otírají o nástroj a tím ho opotřebovávají. Z tohoto důvodu se při obrábění kompozitních materiálů často využívá ochranných povlaků.

Opotřebení hřbetu

Opotřebení hřbetu připomíná relativně rovnoměrné otěry podél řezné hrany nástroje. Občas se kov z obrobku rozmaže přes řeznou hranu a může zvětšit zdánlivou velikost. Viz obr. 17.

Při nižších řezných rychlostech je hlavní příčinou opotřebení hřbetu abraze a eroze. Tvrdé mikroskopické vměstky karbidů nebo deformací zpevněné částice materiálu obrobku řezané do řezného nástroje. Malé kousky povlaku se poté odlomí a zaříznu do čela nástroje. Kobalt se nakonec opotřebuje z matrice. To snižuje přilnavost karbidových zrn, což způsobuje jejich odlamování.

Při vyšších řezných rychlostech je hlavní příčinou opotřebení hřbetu difúzní opotřebení, protože vyšší řezné rychlosti generují vyšší teploty na břit. Tím jsou vytvořeny příznivé podmínky pro difúzi.



Obr. 17- Opotřebení na hřbetu nástroje [20]

Výmolové (žlábkové) opotřebení

Výmolové opotřebení je kombinací difúze a rozkladu (vyšší řezné rychlosti) a abrazivního opotřebení (nižší řezné rychlosti). Teplo z třísek obrobku rozkládá zrna karbidu wolframu v substrátu a uhlíku do třísek (difúze). To má za následek opotřebení „výmolů“ na čelní straně nástroje. výmol nakonec naroste natolik velký, že způsobí odštípnutí boku břitové destičky nebo může způsobit rychlé opotřebení boku.



Obr. 18- Výmolové (žlábkové) opotřebení [20]

Nárůstky

Nárůstky jsou způsobeny adhezí materiálu obrobku, který je tlakově přivařen k řezné hraně. K tomu dochází, když je v zóně řezání chemická afinita, vysoký tlak a dostatečná teplota.

Nakonec se nahromaděný břit odlomí a vezme s sebou kousky břitu, což vede k vylamování a rychlému opotřebení hřbetu. Viz. Obr. 19.



Obr. 19- Nárůstkové opotřebení nástroje [20]

Tepelné trhliny

Tepelné trhliny jsou způsobeny kombinací tepelného zatížení (vysoká teplota v řezné zóně) a teplotní změny nebo gradientce (měnící se teploty v řezné hraně)

Trhliny způsobené napětím se vyvíjejí zhruba kolmo k řezné hraně, což nakonec způsobí vytažení částí karbidu a vyštípnutí hrany. Tepelné trhliny lze pozorovat především při

frézování a soustružení přerušovaného řezu. Přerušovaný proud chladicí kapaliny může také vést k tepelným trhlinám.



Obr. 20- Tepelné trhliny na nástroji [20]

Plastická deformace

Tepelné přetížení je hlavní příčinou plastické deformace. Nadměrné teplo způsobuje měknutí karbidového pojiva (kobaltu). Potom následkem mechanického přetížení tlak na řeznou hranu způsobí její deformaci nebo prověšení na špičce, případně se odlomí nebo vede k rychlému opotřebení hřbetu.

Plastická deformace vypadá jako deformovaná řezná hrana. Je zapotřebí pečlivého pozorování, protože plastická deformace může vypadat velmi podobně jako opotřebení boku na řezné hraně.



Obr. 21- Plastická deformace nástroje [20]

Vrubové opotřebení

Vrubové opotřebení nastává, když je povrch obrobku tvrdší nebo abrazivnější než jeho podkladový materiál. To může být způsobeno povrchovým zpevněním během předchozích řezů (materiály zpevněné deformací, jako jsou nerezové oceli a superslitiny) nebo pocházet z kovaných nebo litých povrchů s povrchovými okujemi. To vše způsobuje rychlejší opotřebení břitů v místě, kde se břit dotýká tvrdé vrstvy. Toto lokalizované koncentrované napětí může také vést k opotřebení vrubem. Tlakové napětí se vyvíjí podél břitů, který je v kontaktu s materiálem obrobku, zatímco k němu nedochází tam, kde břit není v kontaktu. To způsobuje vysoké napětí na řezné hraně v místě, kde jsou obě v přímém kontaktu (hloubka linie řezu).



Obr. 22- Vrubové opotřebení nástroje [20]

Nátlak na třísku

Nátlak třísky je jev způsobený zvlněním třísek a dopadem na nepoužitou část řezné hrany. Výsledkem bude zlomení řezné hrany (nebo části řezné hrany), která není v řezu. Riziko, že k tomu dojde, je větší u operací s vysokými posuvy a kombinací hlubokých řezů.

[21]

2.7. Metody zjištění opotřebení nástroje při obrábění kompozitních materiálů

Vizuální inspekce: Jedná se o vizuální kontrolu nástroje operátorem po dokončení obrábění.

Dotykový Profilometr: Slouží ke kontrole povrchové hrubosti na obrobeném materiálu. Můžeme díky nim zjistit případnou změnu reliéfu na povrchu obrobku což může poukazovat na opotřebení nástroje.

Laserové konfokální mikroskopy: Tyto mikroskopy vytvářejí detailní 3D zobrazení povrchu díky kterému jsme schopni najít mikroskopické defekty, delaminaci a opotřebení na nástroji.

Akustické emise: Tato metoda zkoumá zvuky vytvářené během obrábění. Změny ve zvukových signálech mohou indikovat opotřebení nástroje či jiný problém s řeznými podmínkami.

Termografie: Tato metoda měří teploty nástroje a sleduje tepelné anomálie, které mohou indikovat opotřebení či problém s řeznými podmínkami.

Nástrojové senzory: Jedná se o senzory a čipy integrované do nástroje, které monitorují parametry jako například teplota, vibrace či síly působící na nástroj. Díky změnám v měření těchto parametrů jsme schopni sledovat opotřebení nástroje.

2.8. Měření sil při frézování kompozitu s uhlíkovým vláknem

Řezné síly v obráběcích procesech lze měřit různými technologiemi, z nichž nejúčinnější a nejspolehlivější jsou dynamometry. Některé dynamometry jsou založeny na piezoelektrickém jevu. Nicméně, integrovaná monitorovací řešení lze také přizpůsobit pomocí vhodných snímačů síly nebo snímačů napětí.

Existují tři hlavní druhy piezoelektrických dynamometrů pro měření řezných sil: stacionární 3-složkové dynamometry, stacionární 6-složkové dynamometry a rotační 4-složkové dynamometry.[22]

2.8.1. Dynamometr

Vzhledem k vysoké citlivosti a tuhosti piezoelektrických dynamometrů jsou nejpoužívanějšími zařízeními pro měření sil při obrábění. Komerční dynamometry se skládají ze sady piezoelektrických snímačů, které jsou uspořádány do určitého vzoru pro měření sil při obrábění a někdy i točivého momentu. Stolní dynamometry se používají pro měření sil působících na obrobek v pevném souřadnicovém systému a rotační dynamometry jsou namontovány ve vřetenu pro měření sil působících na nástroj v rotačním souřadnicovém systému. [23]

Dynamometr při obrábění, měří tříosou řeznou sílu (F_x , F_y a F_z), přítlačné síly, posuvové síly a řezné síly. Shromážděná data jsou analyzována na změny sil v průběhu času. Dynamometr snímá síly působící na obrobek prostřednictvím piezoelektrického krystalu, který generuje elektrický náboj. Náboj je transformován na napětí systémem sběru dat, který lze hodnotit v reálném čase na softwaru, aby představoval jedinou grafickou formu tříosých sil. Měření systému je až 1000 iterací za sekundu pro dosažení maximální přesnosti. [24]

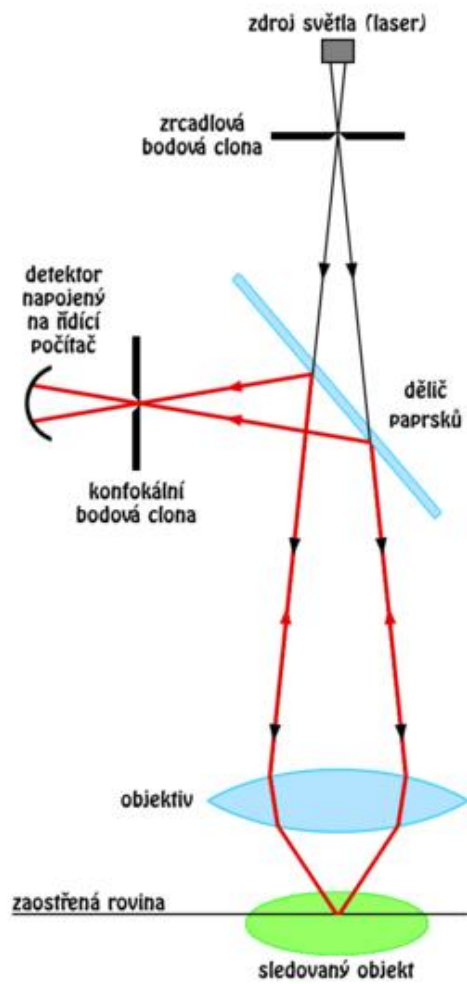
2.8.2. Laserový konfokální mikroskop

Základní princip konfokální mikroskopie spočívá v tom, že osvětlovací a detekční optiky jsou zaostřeny na stejný bod s omezenou difrakcí, který se pohybuje nad vzorkem, tak aby se na detektoru vytvořil úplný obraz. Zatímco celé zorné pole je během konfokálního zobrazování osvětleno, cokoli mimo ohniskovou rovinu přispívá k obrazu jen málo, což snižuje zákal pozorovaný ve standardní světelné mikroskopii s tlustými a vysoce rozptylovými vzorky. [25]

Zdrojem světla u konfokálního mikroskopu je laser (ultrafialové, infračervené nebo viditelné spektrum), který přes bodovou (konfokální) clonu a objektiv osvětluje preparát viz. obr. 23. Stejným objektivem poté prochází světlo odražené (případně emitované fluorescenční záření, pokud se jedná o fluorescenční konfokální mikroskopii). Paprsky prochází dichroickým zrcadlem a pokračují k bodové cloně, kde dochází k odfiltrování světla z jiných rovin. Nakonec paprsky vstupují do fotonásobiče, kde jsou zesíleny a detekovány.

Z uspořádání mikroskopu vyplývá, že v jednom kroku získáme informaci pouze o jednom bodu – pro získání obrazu celé roviny je nutné vytvořit sérii snímků.[26]

PRINCIP KONFOKÁLNÍHO MIKROSKOPU



Obr. 23- Princip konfokálního mikroskopu [26]

3. Metodika

Tato kapitola se zabývá podáním informací o průběhu a přípravě experimentu. V této části je možné najít důležité technické informace o použitých zařízeních v kapitolách 3.1 a 3.2, nástrojích a ochranných povlacích v kapitolách 3.3 a 3.4, informace o zkušebním vzorku v kapitole 3.5 a nakonec metody měření v kapitolách 3.6 a 3.7.

3.1. Frézka

Obrobky budou frézovány na Vertikálním obráběcím centru DMG MORI CMX 600 V viz. obr. 24. S parametry viz. TAB. 1. Nástroj bude do stroje upnut za pomoci tepelného upínače. Při experimentu bude čelo desky obráběno cyklicky frézou po dobu jedné minuty nástroje v záběru. Během tohoto procesu bude nástroj periodicky frézovat hranu vzorku.

Procesní kapalina nebude při tomto experimentu použita z důvodu nasákavosti frézované desky a možné adheze na delaminovaných vláknech, která by poté nebylo možné změřit.



Obr. 24- Vertikálním obráběcím centru DMG MORI CMX 600 V[27]

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Maximální posuv v ose X	600	[mm]
Maximální posuv v ose Y	560	[mm]
Maximální posuv v ose Z	510	[mm]
Maximální výška obrobku	630	[mm]
Maximální délka obrobku	900	[mm]
Maximální šířka obrobku	560	[mm]
Maximální váha obrobku	600	[kg]
Software:	SIEMENS	[-]
Otáčky:	12 000	[ot/min]
Posuv:	30 000	[mm/min]
Přesnost polohování	0,006	[mm]
Maximální výkon	13	[kW]
Upínací kužel	40	ISO

TAB. 1. Parametry frézky

3.2. Odsávací a upevňovací zařízení

Třísky a prach vytvořený frézováním budou odsávány odsávacím zařízením POC9 M1 obr. 28, které má vlastnosti viz. TAB. 2.

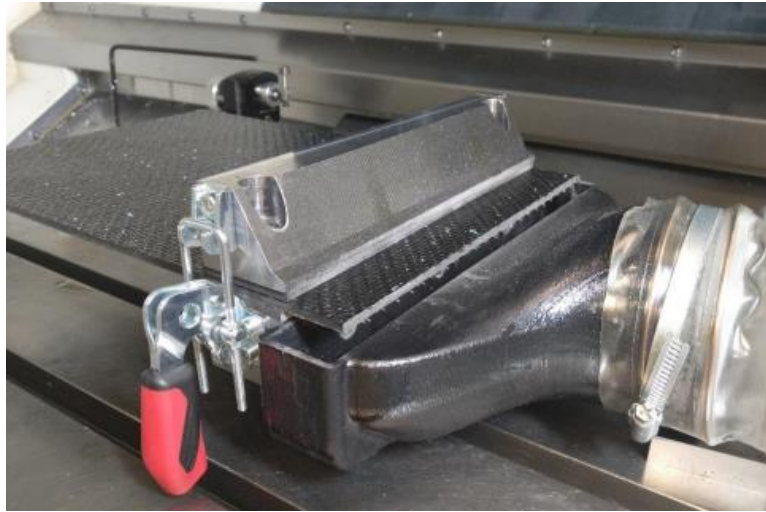
Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Tlak odsávání	1200	[Pa]
Množství vzduchu, které je odsáno	900	[m ³ /h]
Výkon	0,7	[kW]
Hlučnost	65	[dB]
Min. velikost zachycené částice	0,3	[μm]

TAB. 2. Parametry odsávacího zařízení POC9 M1



Obr. 28- Odsávací zařízení POC9 M1 [27]

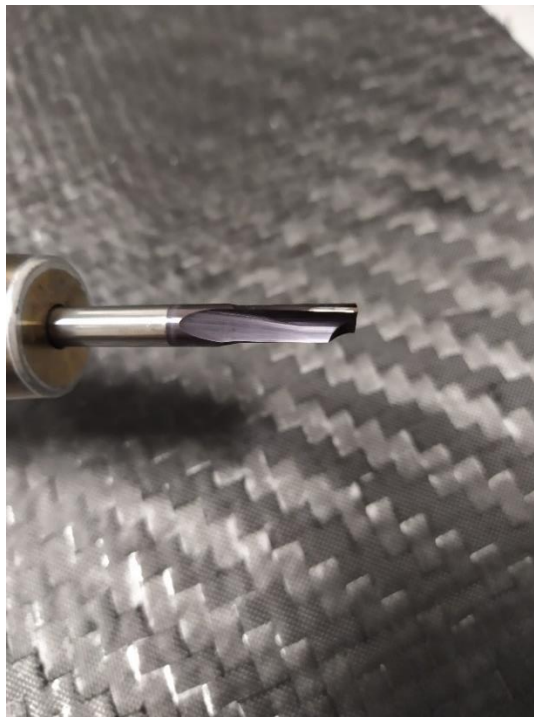
Vzorek bude upnut do frézky pomocí upínacího přípravku s rychloupínací pákou a hubicí pro odvod třísek a prachu, způsobených obráběním. Obr. 29.



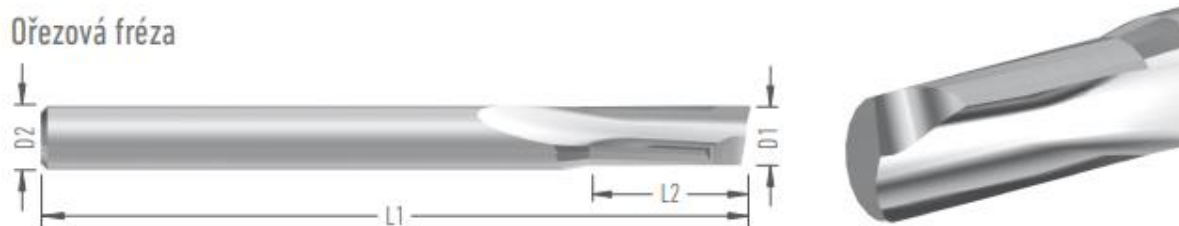
Obr. 29- Upínací přípravek [28]

3.3. Nástroje

Pro obrábění bude použito šest fréz Aramis 1 F6140 s třemi různými úhly gama. Tyto úhly budou 20°, 30° a 40°. Frézy budou opatřeny ochrannými povlaky. Jde o frézovací nože jednobřité od firmy UniCut vyrobené ze slinutého karbidu.

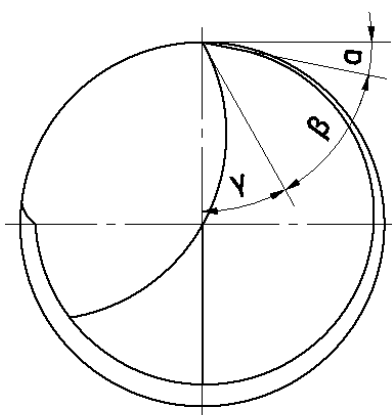


Obr. 30- Fréza Aramis 1 F6140



Jméno	D1	D2	L1	L2
F6140.6.V6.81.16.Z1	6 mm	6 mm	81 mm	16 mm

Obr. 31. Tabulka rozměrů ořezové frézy Aramis 1 F6140 [29]



α- úhel hřbetu, β- úhel břitu, γ- úhel čela

Obr. 32. Geometrie frézy Aramis 1 F6140

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotka
Řezná rychlost	150	[m/min]
Posuv na zub	0.05	[mm]
Otáčky vřetena	7955	[ot/min]
Posuv	398	[mm/min]
Axiální hloubka záběru	5,5	[mm]
Radiální hloubka záběru	1	[mm]

TAB. 3. Řezné podmínky ořezové frézy Aramis 1 F6140

3.4. Povlaky

Budou použity běžně dostupné povlaky. Tyto povlaky budou nanášeny metodou fyzické depozice plynu (PVD). Jedná se o metodu, ve kterém je nanášený materiál vypařen ve vakuové komoře a poté je z kondenzován na povrchu nástroje. Tato metoda vytváří tenké vrstvy ochranných povlaků.

Povlak ALOX SN²

Jedná se o supernitridový povlak od firmy CemeCon vhodný převážně na obrábění oceli a litiny, avšak lze s ním obrábět i nerezové oceli. Povlak se používá u vrtání, frézování a soustružení.

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Materiál	Ti Al N	[-]
Tvrdost	3500	[HV _{0,05}]
Maximální teplota použití	1000	[°C]
Tloušťka povlaku	4 ^{±1,3}	[μm]

TAB. 4. Vlastnosti ochranného povlaku povlak ALOX SN²

Povlak AluCon

Jedná se o powernitridový povlak od firmy CemeCon. Povlak je vhodný převážně pro obrábění hliníku, nezelezných kovů a Titanu. Povlak se používá převážně u vrtání a frézování.

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Materiál	Ti B2	[-]
Tvrdost	4900	[HV _{0,05}]
Maximální teplota použití	1000	[°C]
Tloušťka povlaku	2 ^{±0,7}	[μm]

TAB. 5. Vlastnosti ochranného povlaku AluCon

3.5. Vzorek

Měřený vzorek bude deska o rozměrech 250x600x5,5 viz. obr. 33. vyrobená z kompozitu s uhlíkovým vláknem od společnosti Kordcarbon. Vyráběná vakuovou infuzí. Vazba vzorku je kepr 24K spojená epoxidovou pryskyřicí. Vzorek bude nařezán z větší desky za pomoci oscilační brusky.



Obr. 33. Deska vyrobená z kompozitu s uhlíkovým vláknem

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Hustota tkaniny	600	[g/m ²]
Způsob vazby	Kepr 24K	[-]
Lineární hustota	Carbon 800 tex	[-]
Tloušťka vrstvy	0,6	[mm]

TAB. 6. Vlastnosti měřeného obrobku [30]

3.6. Měření sil

Složky síly působící na nástroj budou měřeny na tří složkovém piezoelektrický dynamometru Kistler viz. obr. 25. Elektrický náboj změřený dynamometrem pak bude poté zesílen pomocí zesilovače obr. 26. Měření bude prováděno během operace frézování. Budou

měřeny tři náhodné deseti sekundové úseky, které budou po sléze vyhodnoceny za pomoci aplikace LAB View.



Obr.25- Dynamometr Kistler [28]



Obr. 26- Zesilovač [28]

3.7. Konfokální mikroskop

Opotřebení nástroje a delaminace desky bude změřena na laserovém konfokálním mikroskopu Keyence VK-X 1000 viz. obr. 27, který je schopen skenovat povrch měřené součásti až na rozlišení 0,01 μm .

Měření opotřebení bude uskutečněno po každém cyklu. Vyhodnocovat se bude do té doby, dokud opotřebení ochranného povlaku nástroje nebude prokazatelně zničeno.

Měření delaminace bude probíhat na vzorku, kde budeme zkoumat tři náhodná místa hrany řezu z horní a tři místa ze spodní strany.



Obr. 27- Laserový konfokální mikroskop Keyence VK-X 1000

4. Experimentální část

Tato kapitola se zabývá výsledky experimentu. Podkapitola 4.1. se zabývá opotřebením nástrojů a změnou jejich geometrie. V kapitole 4.2. je delaminace a její vztah s opotřebením a v kapitole 4.3. jsou síly působící na nástroj a jejich závislost na čase a opotřebením nástroje.

4.1. Opotřebením nástroje

Opotřebením ochranného povlaku nástroje bylo měřeno vždy po dojetí cyklu $t=1$ min frézování na konfokálním mikroskopu, jak již bylo zmíněno v metodice. Změřena byla 3 místa na hřbetu nože. Měření se provádělo do té doby, dokud nebyl ochranný povlak prokazatelně opotřeben. Frézování probíhalo za řezných podmínek Viz TAB. 7.

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Řezná rychlost	150	[m/min]
Posuv na zub	0,1	[mm]

TAB. 7. řezné podmínky

4.1.1. Závislost opotřebením povlaku nože na čase frézování

Opotřebením bylo zkoumáno u dvou různých povlaků na frézách se třemi různými úhly γ .

První byly zkoumány nože s ochranným povlakem **AluCon**

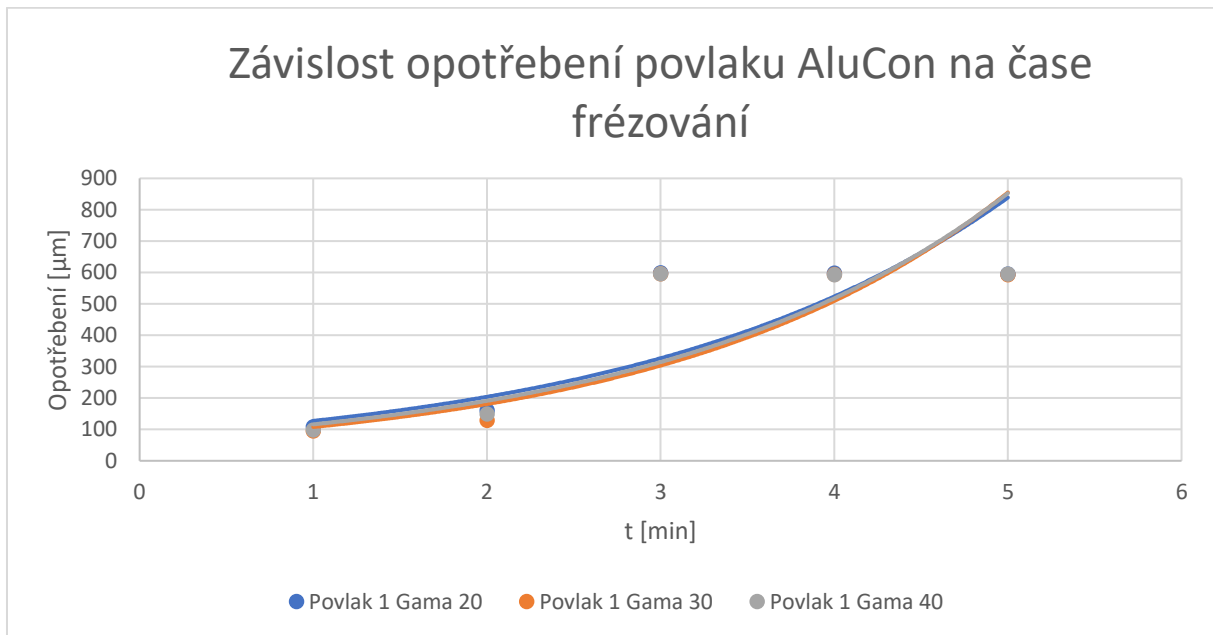
Z Hodnot v TAB 8. a z Graf 1. lze usoudit:

- Opotřebením povlaku se navyšovalo s časem, po který byl nástroj používán.
- Opotřebením prudce narůstalo a brzy se dostalo na hodnotu kdy bylo možné považovat povlak za zcela nepoužitelný pro další frézování.

Opotřebením povlaku u všech tří nožů narůstalo tak rychle, že brzy bylo zřetelné i opotřebením nástroje samotného. Povlak se ihned začal opotřebovat i ze spodní strany hřbetu a trvalo pouhé 3 minuty v záběru, aby toto postihlo celý hřbet. Opotřebením spodní strany hřbetu bylo způsobeno volnými vlákny, která se otírala o povlak v místech, kde nedocházelo k frézování.

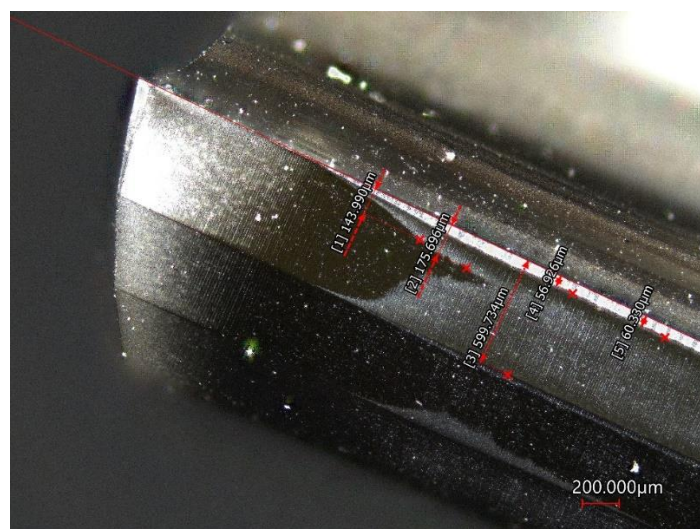
AluCon	Opotřebení [μm] \pm nejistota měření		
Čas	Gama 20°	Gama 30°	Gama 40°
1 min	108,7 \pm 6,7	95,7 \pm 3,8	98,1 \pm 3,4
2 min	160,3 \pm 4,1	128,5 \pm 7,1	149,1 \pm 8,9
3 min	599,5 \pm 1,5	595,9 \pm 10,1	596,5 \pm 10,4
4 min	597,9 \pm 4,2	594,2 \pm 5,9	593,2 \pm 9,2
5 min	595,2 \pm 6,9	594,8 \pm 12,3	594,8 \pm 12,3

TAB 8. Závislost opotřebení povlaku **AluCon** na čase



Graf 1. Závislost opotřebení povlaku **AluCon** na čase frézování

Na Obr. 34. je vidět, jak je ochranný povlak nástroje zcela zničen vlivem obrábění. Je zde také možné si všimnout značného opotřebení samotného nástroje, který byl odkryt.



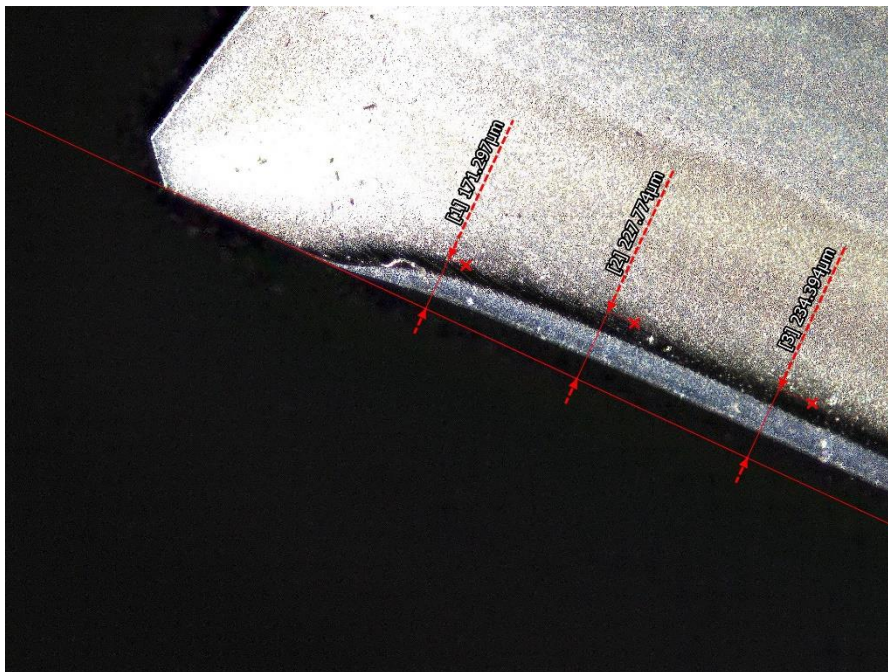
Obr. 34- Opotřebení povlaku **AluCon** nástroj Gama 20° při 3 minutách v provozu

Z důvodu zničení povlaku bylo v dalších měřeních měřeno převážně opotřebení nástroje samotného.

čas	Opotřebení nože [μm] \pm nejistota měření		
	Gama 20°	Gama 30°	Gama 40°
3 min	58,5 \pm 5,2	54,8 \pm 13,9	61,5 \pm 2,7
4 min	71,2 \pm 3,4	63,8 \pm 8,4	70,5 \pm 2,9
5 min	74,8 \pm 11,8	73,3 \pm 13,7	71,5 \pm 5,1

TAB 9. Opotřebení nástroje

Na Obr. 35 je vidět plný rozsah opotřebení nástroje, které je mnohem zřetelnější z pohledu na čelo. Nástroj bez ochranného povlaku byl vystaven velmi pevnému kompozitu s uhlíkovým vláknem, a proto bylo jeho opotřebení značné.



Obr. 35- Opotřebení čela nástroje Gama 40° s povlakem **AluCon** v čase 5 minut

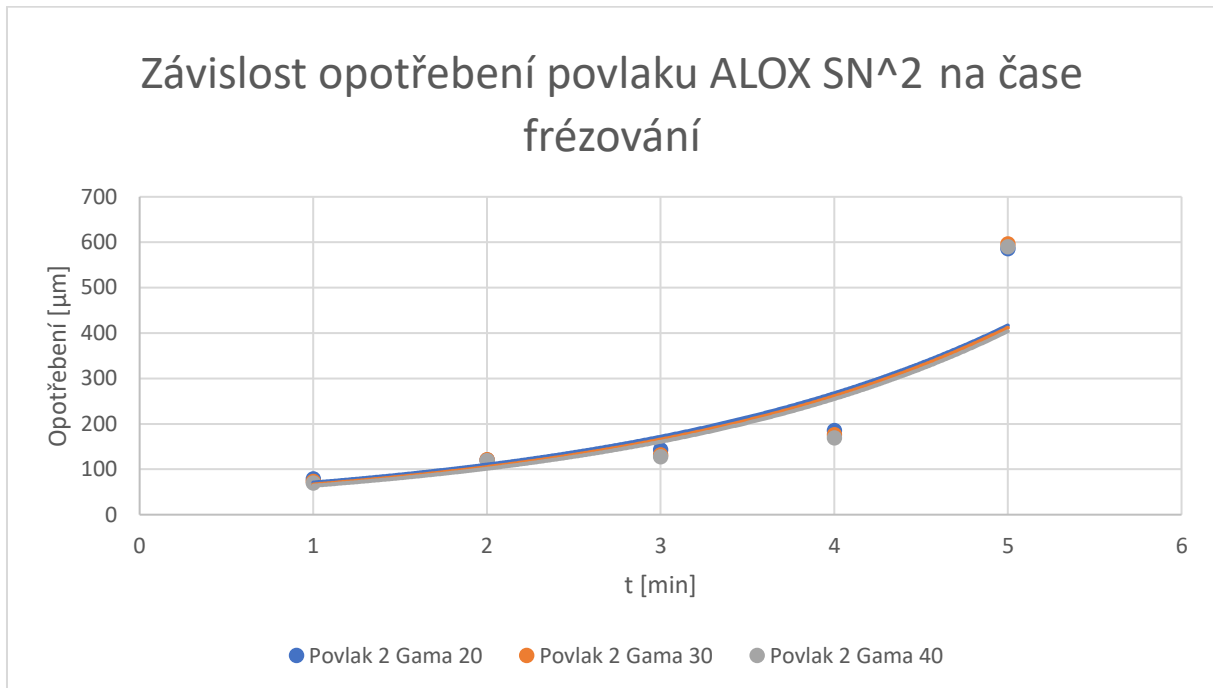
Opotřebení nástrojů s ochranným povlakem **ALOX SN²**

Z hodnot v TAB 10. a z Graf 2. lze usoudit:

- Opotřebení povlaku se opět navyšovalo s časem, který byl nástroj používán.
- Opotřebení u **ALOX SN²** narůstalo pomaleji než u povlaku **AluCon**, avšak narůstalo pořád značnou rychlostí a povlak byl po 5 minutách v provozu nepoužitelný.

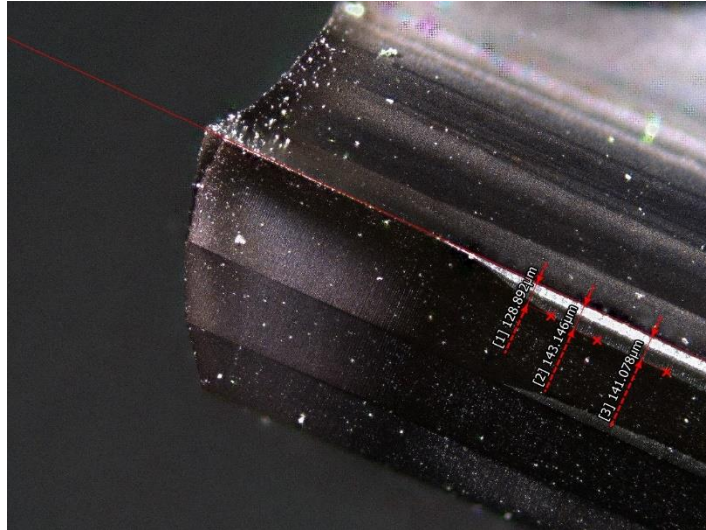
ALOX SN ²	Opotřebení [μm] ± nejistota měření		
	Čas	Gama 20°	Gama 30°
1 min	79,3±11,1	73,4±3,5	69,9±2,7
2 min	120,5±5,1	121,8±3,2	119,5±6,3
3 min	143,4±7,3	131,9±3,9	127,6±6,1
4 min	185,8±8,5	176,1±12,1	169,3±5,3
5 min	586,2±11,1	596,2±2,4	593,7±2,2

TAB 10. Závislost opotřebení povlaku **ALOX SN²** na čase



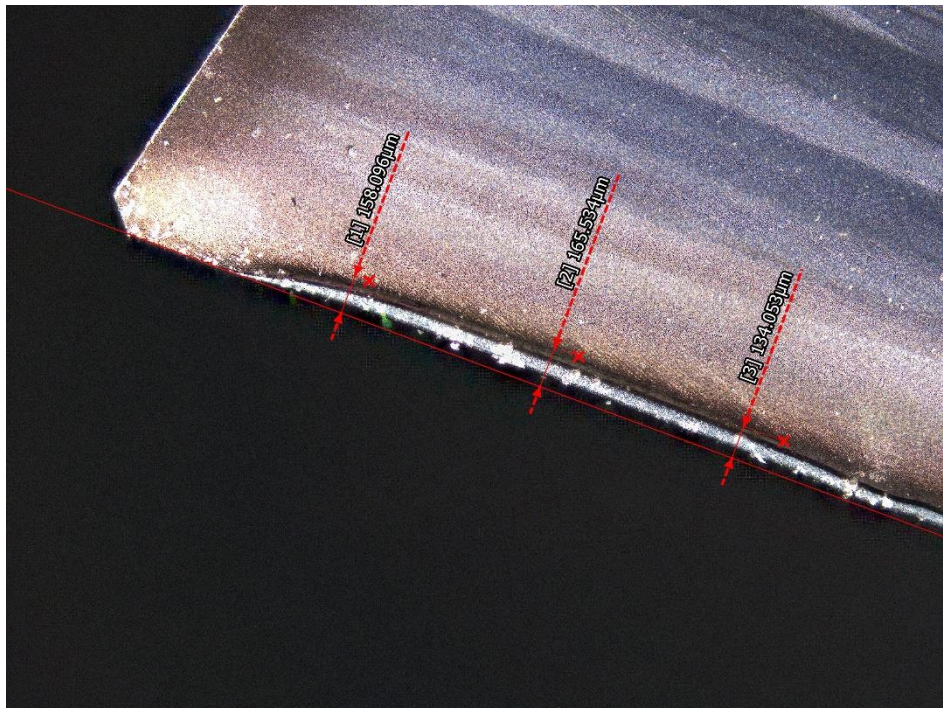
Graf 2. Závislost opotřebení povlaku **ALOX SN²** na čase frézování

Jak je vidět z Obr. 36 opotřebení povlaku je menší než u povlaku **AluCon** ve stejném čase. Avšak můžeme opět vidět opotřebení ze spodní strany a opotřebení samotného nástroje které také roste.



Obr. 36- Opotřebení povlaku **ALOX SN²** nástroj Gama 20° při 3 minutách v provozu

Na Obr. 37- je opět vidět jaký vliv mělo opotřebení nástroje na geometrii břitu z pohledu čela. Opotřebení není tak výrazné jako u povlaku **AluCon** ale stále značné.



Obr. 37- Opotřebení čela nástroje Gama 40° s povlakem **ALOX SN²** v čase 5 minut

Vyhodnocení kapitoly

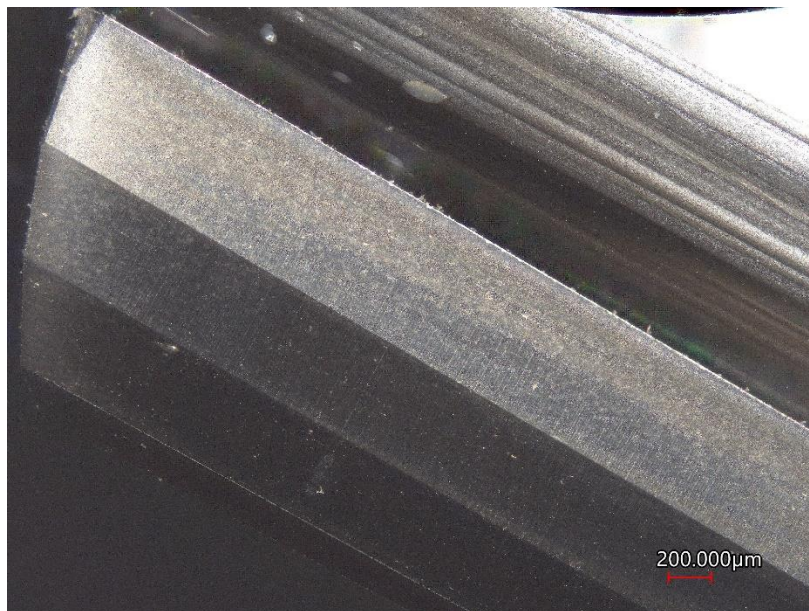
Z naměřených hodnot lze usoudit že:

- Opotřebení povlaku všech nástrojů narostlo na hodnotu pohybující se okolo 600 μm . Je tomu tak, neboť toto je velikost fazetky hřbetu nástroje, při kterém jsme brali povlak jako zcela zničen.
- Nejpomalejší nárůst opotřebení ochranného povlaku byl u nástroje s úhlem gama 40° a ochranným povlakem ALOX SN².
- Naopak nejrychlejší nárůst byl zaznamenán na nástroji s úhlem gama 20° a ochranným povlakem AluCon.

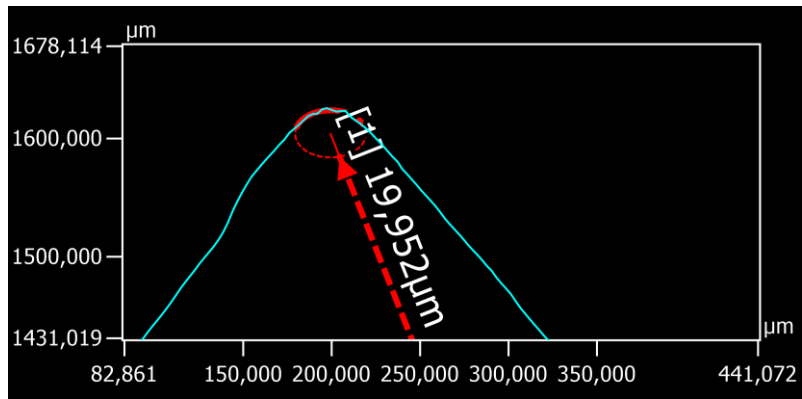
4.1.2. Změna geometrie nástroje

Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, geometrie hřbetu nástrojů byla vlivem opotřebení povlaku změněna. Rádus břitu byl měřen u nových nástrojů a poté po dokončení experimentu. Měření geometrie bylo prováděno kolmo na břit nástroje.

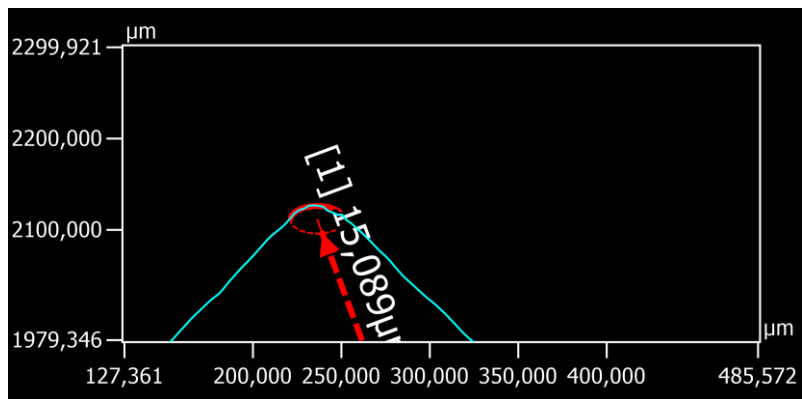
Na Obr 39. je vidět geometrie hřbetu zubu před zahájením experimentu. Nejsou zde vidět žádné velké výchyly v hřbetu a hřbet jako takový má relativně plynulý rádus.



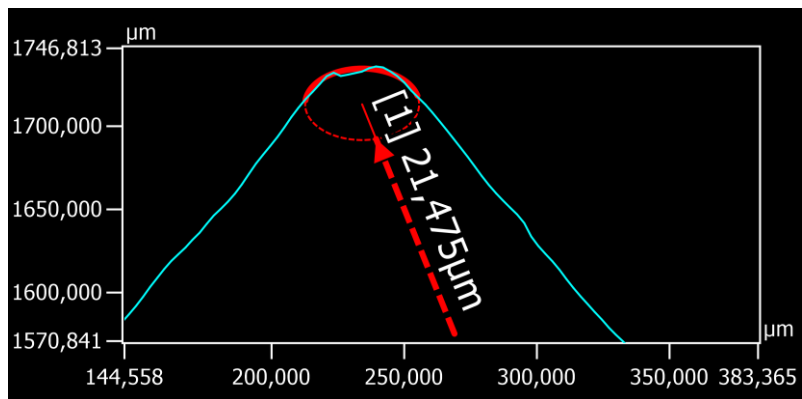
Obr. 38- Hřbet nového nástroje bez opotřebení



a)



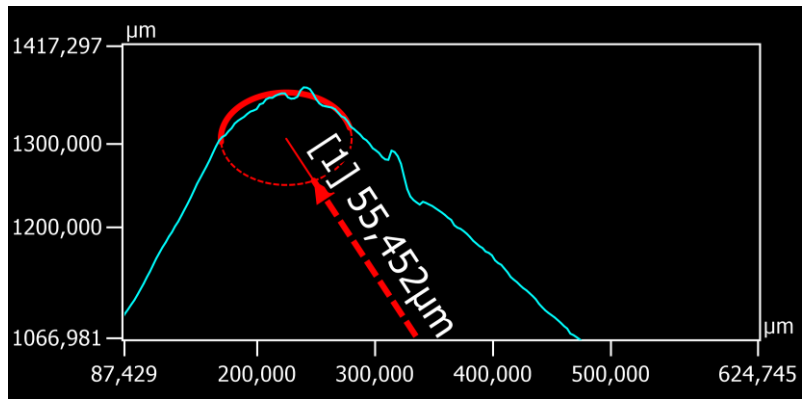
b)



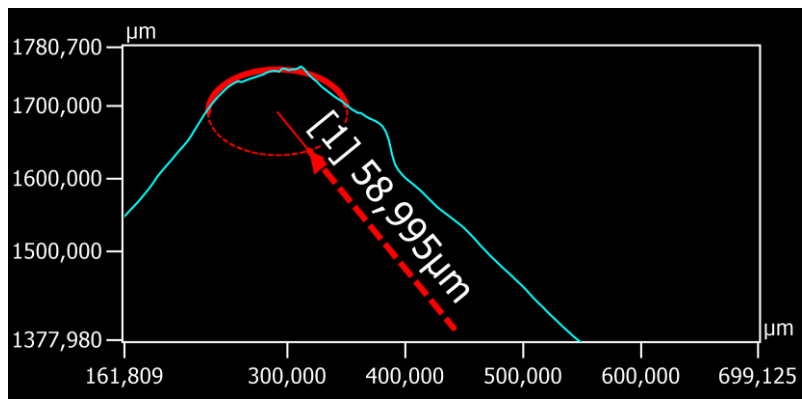
c)

Obr. 39- a) geometrie hřbetu nového nástroje Gama 20°, b) geometrie hřbetu nového nástroje Gama 30°, c) geometrie hřbetu nového nástroje Gama 40°

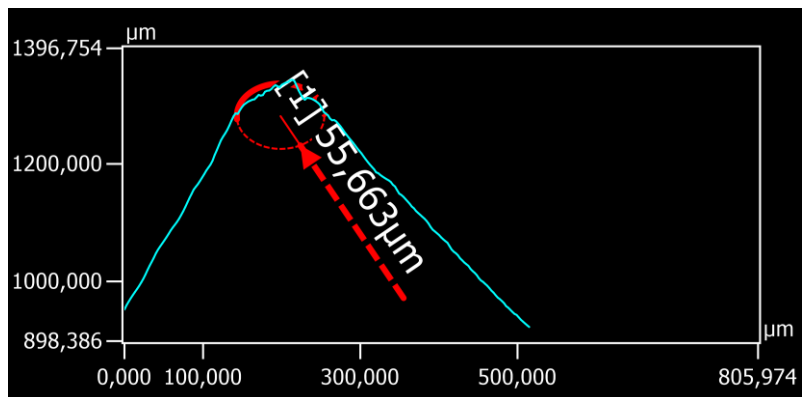
Jak je vidět na Obr. 40 rádius hřbetu se značně zvětšil vlivem opotřebení nástroje. Je zde také možné si všimnout, že profil hřbetu je hrbolatý což bylo opět způsobeno opotřebováním.



a)



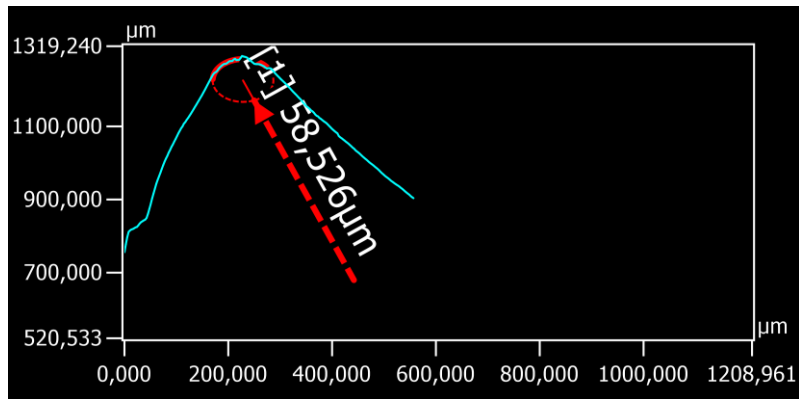
b)



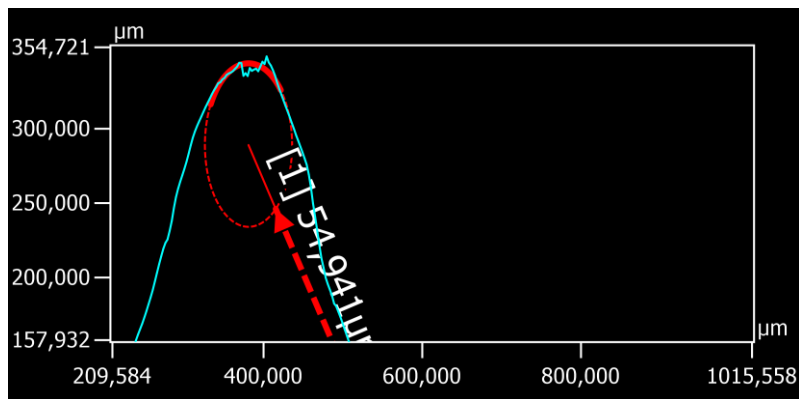
c)

Obr. 40- a) geometrie hřbetu nástroje Gama 20° s povlakem **AluCon**, b) geometrie hřbetu nástroje Gama 30° s povlakem **AluCon**, c) geometrie hřbetu nástroje Gama 40° s povlakem **AluCon**

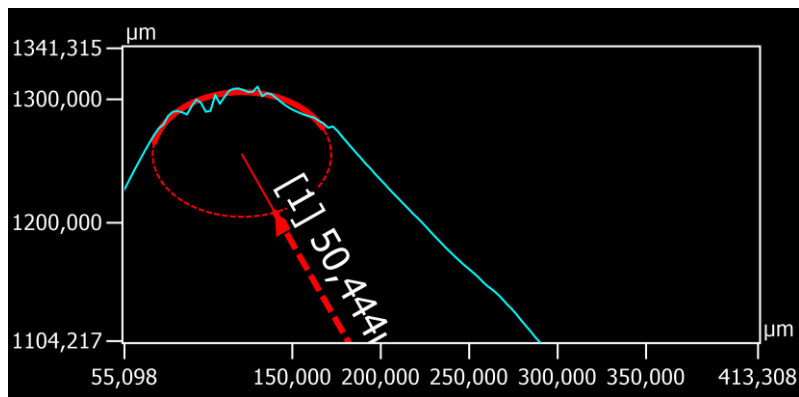
Na Obr. 41 je opět jako na Obr. 40 vidět zvětšeny rádius hřbetu nástroje a hrbatost profilu.



a)



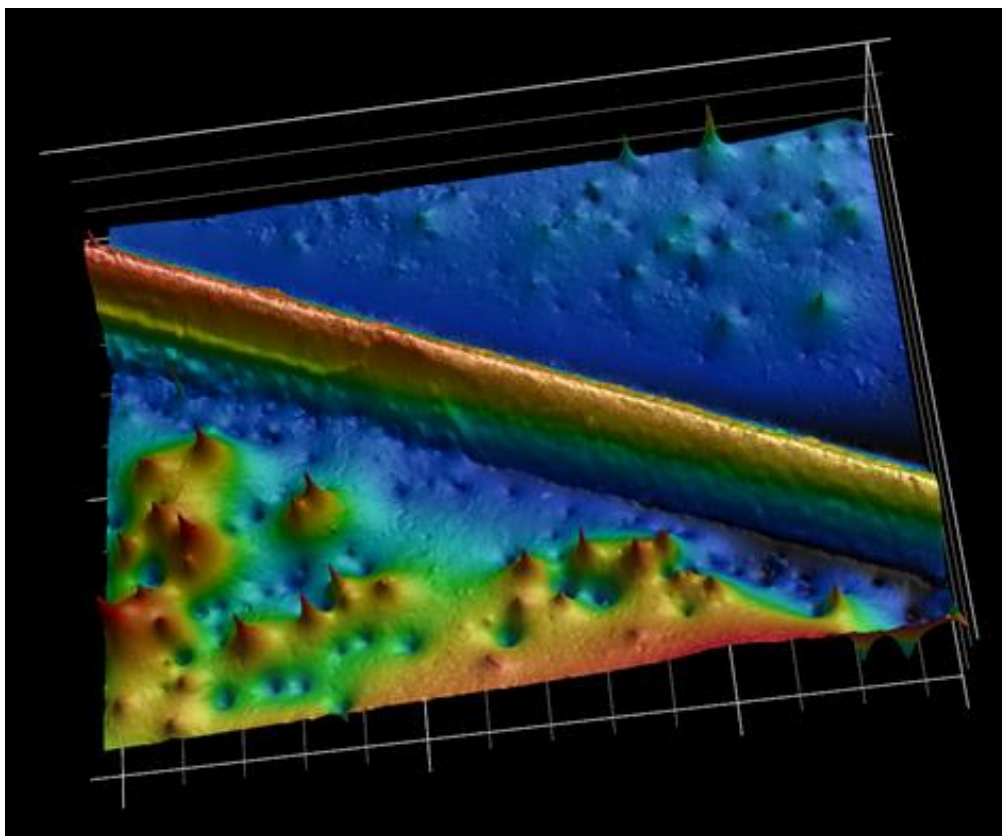
b)



c)

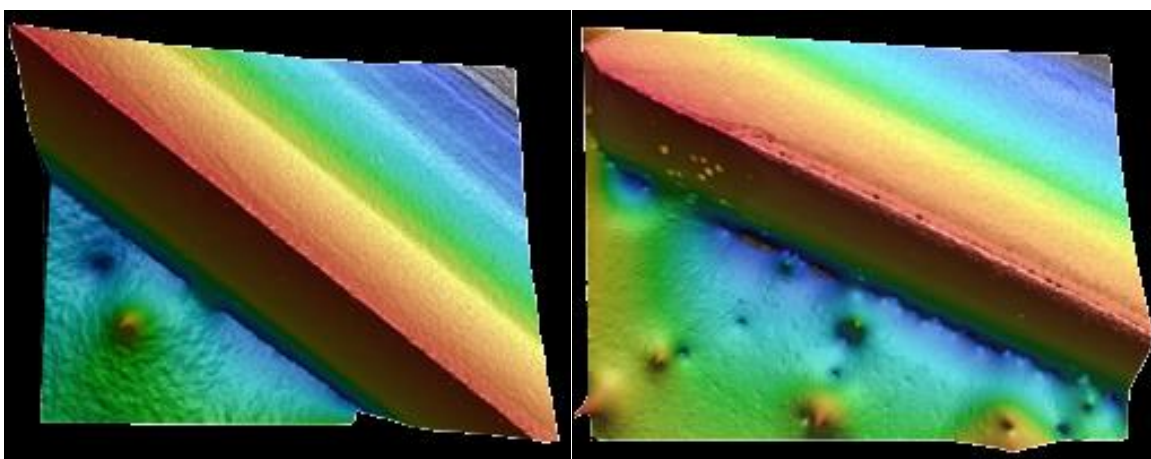
Obr. 41- a) geometrie hřbetu nástroje Gama 20° s povlakem **ALOX SN²** , b) geometrie hřbetu nástroje Gama 30° s povlakem **ALOX SN²** , c) geometrie hřbetu nástroje Gama 40° s povlakem **ALOX SN²**

Na Obr. 42- lze dobře vidět opotřebení povlaku na hřbetu nástroje. Také je tu možné si všimnout, že drsnost povrchu značně narostla.



Obr. 42- 3D sken povrchu nástroje Gama 30 s povlakem **ALOX SN²**

Na Obr. 43 lze ještě jednou vidět rozdíl geometrie mezi novým (levý) a opotřebeným (pravý) nástrojem. Je zde zřejmé, jak opotřebení břitu změnilo celkovou geometrii a s tím i účinnost tohoto nástroje.



Obr. 43- Porovnání geometrie nového a opotřebeného nástroje

Vyhodnocení kapitoly

Z výsledků lze usoudit:

- Zvětšení rádiusu hřbetu nástroje bylo vlivem opotřebení značné
- Nejmenší změna geometrie byla u nástroje s úhlem $\gamma = 40^\circ$ s ochranným povlakem ALOX SN²
- Největší změna geometrie byla opět u nástroje s úhlem $\gamma = 20^\circ$ a ochranným povlakem AluCon

4.2. Delaminace vzorku

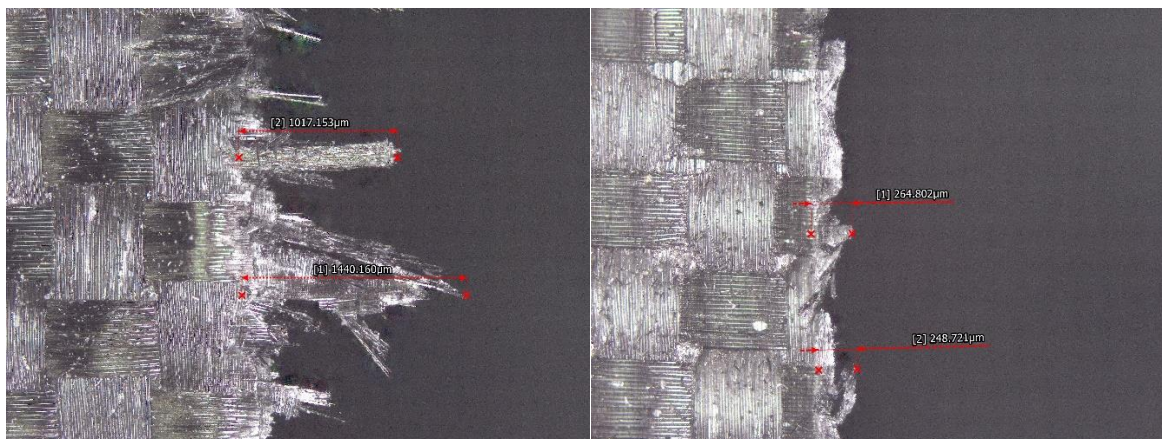
Vzorek byl zkoumán na šesti místech. Byl zkoumán jak z horní, tak spodní strany desky. Místa byla vždy zvolena podle toho, jakým směrem byla vedena uhlíková vlákna v místě řezu. Aby měření bralo v potaz i místa, kde byla delaminace menší. Měření se opakovalo do té doby, dokud nebyl ochranný povlak nástroje prokazatelně zničen.

Jak je vidět na Obr. 44 delaminace závisela na tom, jaký smysl vláken byl zrovna v místě frézování. Místa s vlákny kolmo jdoucími ke směru frézování vykazovala výrazně velkou delaminaci na rozdíl od míst se souběžně jdoucími vlákny, která vykazovala delaminaci značně menší.



Obr. 44- Detail delaminace vzorku po frézování

Během frézování se vyskytovalo několik hlavních typů delaminace. Delaminace prvního typu se vyznačovala dlouhými neořezanými vlákny směřujícími kolmo z hrany desky. Tyto vlákna byli jen mírně, nebo vůbec ořezány projíždějícím nástrojem. Delaminace druhého typu se vyznačovala vlákny podélně jdoucí s hranou řezu. Tyto vlákna byli odtrženy z hrany desky nástrojem, ale zachovali si smysl natočení.

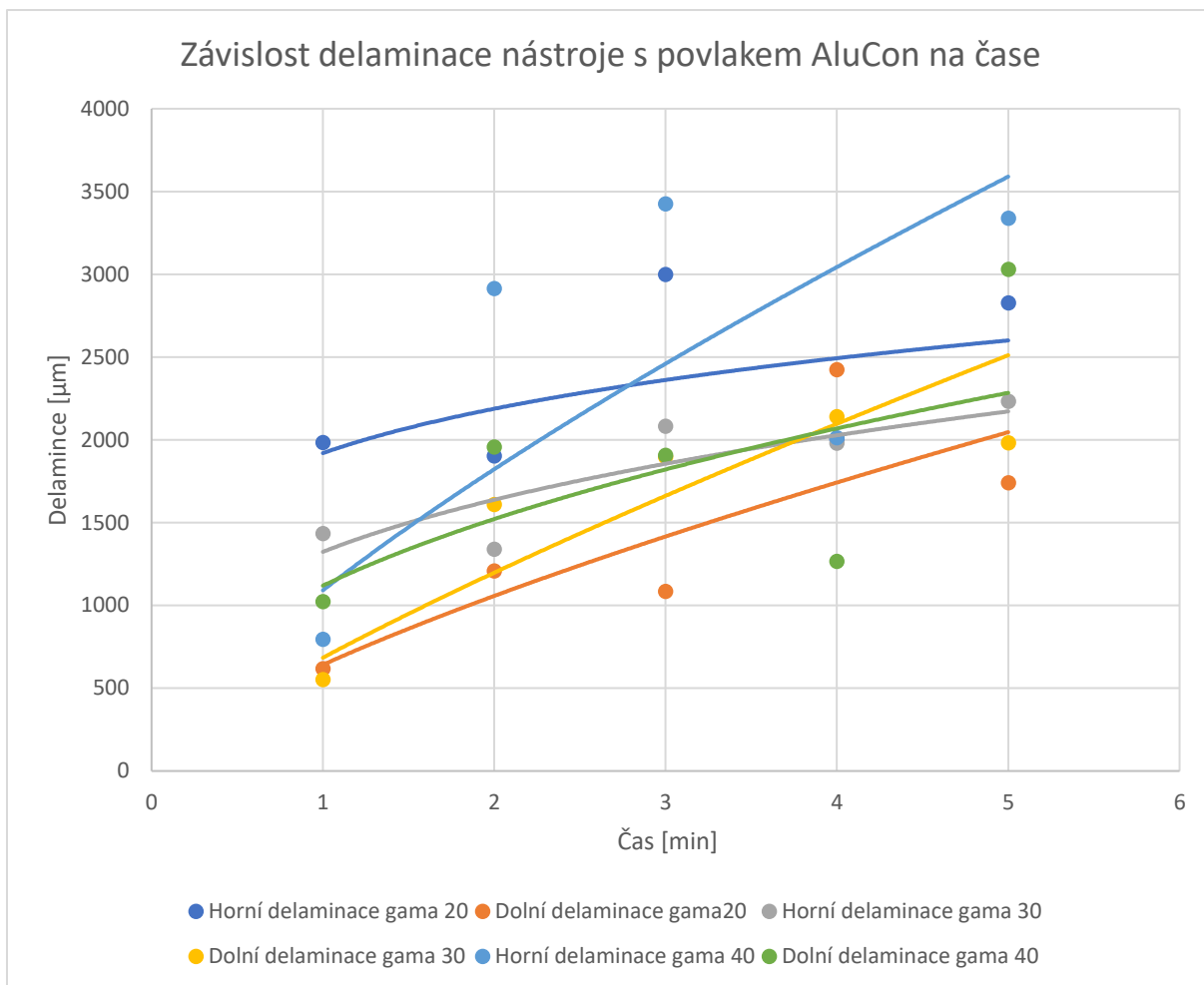


Obr. 45- Ukázka delaminace typu 1 (levý) a typu 2 (pravý)

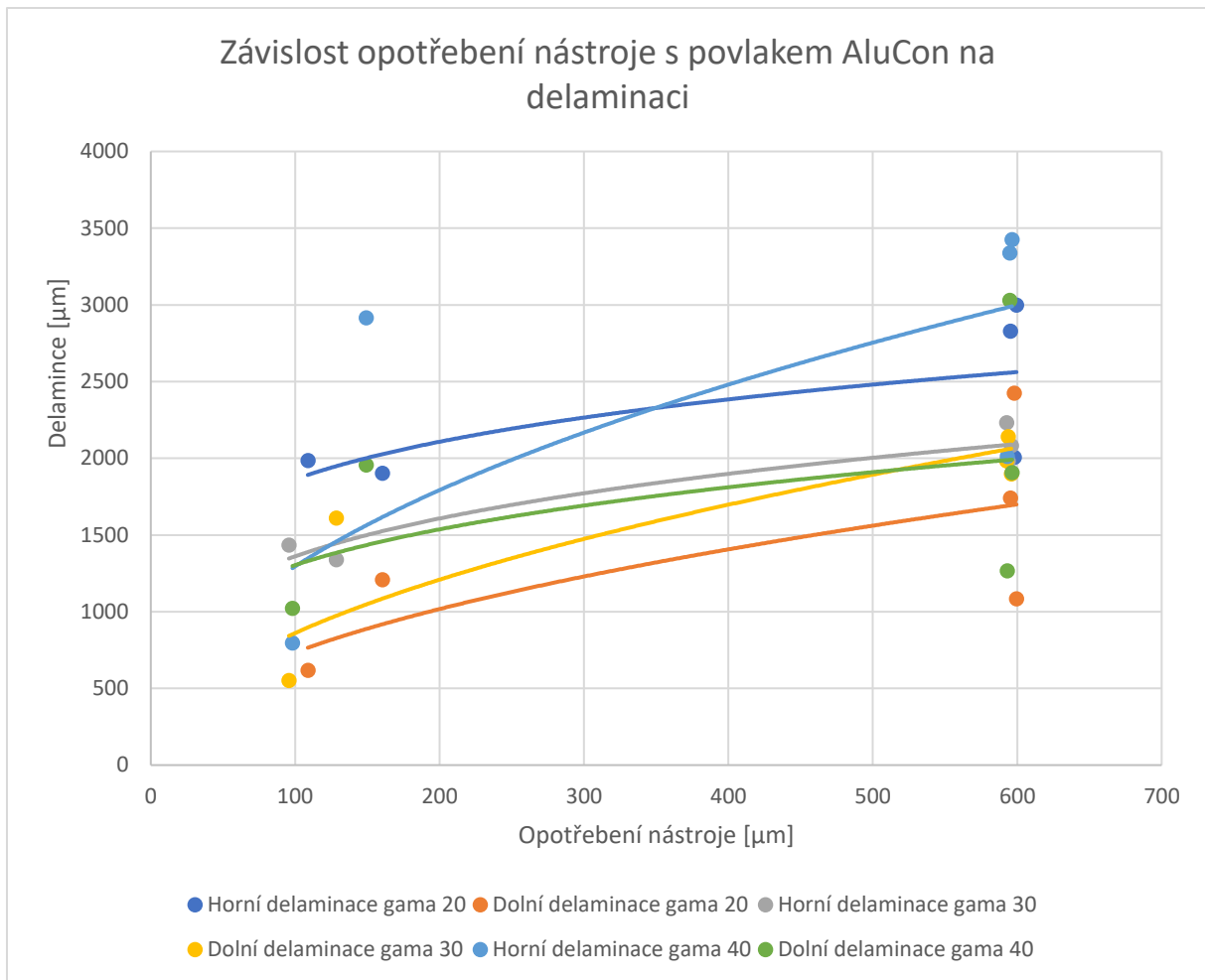
AluCon	Delaminace [μm] \pm nejistota měření					
	Gama 20°		Gama 30°		Gama 40°	
čas	horní	spodní	horní	spodní	horní	spodní
1 min	1985,5 \pm 450,1	618 \pm 282,1	1435,4 \pm 812,2	552,4 \pm 171,7	796,3 \pm 363,7	1022,9 \pm 841,3
2 min	1809 \pm 643,5	1208,8 \pm 898,2	1339,4 \pm 191,4	1610,8 \pm 103,2	2915,3 \pm 605,9	1957,3 \pm 462,8
3 min	2999,9 \pm 290,2	1085,4 \pm 331,8	2125,6 \pm 499,6	1900,9 \pm 105,5	3425,2 \pm 613,1	1908 \pm 465,8
4 min	2006,2 \pm 64,8	2425,4 \pm 563,9	1981,3 \pm 520,1	2140,4 \pm 503,7	2013,7 \pm 578,1	1266,7 \pm 278,9
5 min	2499,7 \pm 199,3	1742,2 \pm 312,9	2233 \pm 106,2	1983 \pm 574,7	3338,8 \pm 682,2	3029,7 \pm 207,8

TAB 11. Závislost delaminace na čase pro nástroje s povlakem AluCon

Jak je vidět na grafu 3. a 4. delaminace narůstala s opotřebením nástrojů i s časem, avšak můžeme si všimnout velmi nepravidelného rozložení měřených hodnot. Je tomu tak, protože geometrie nástrojů byla vlivem opotřebenění značně změněna což napomohlo nepředvídatelné delaminaci.

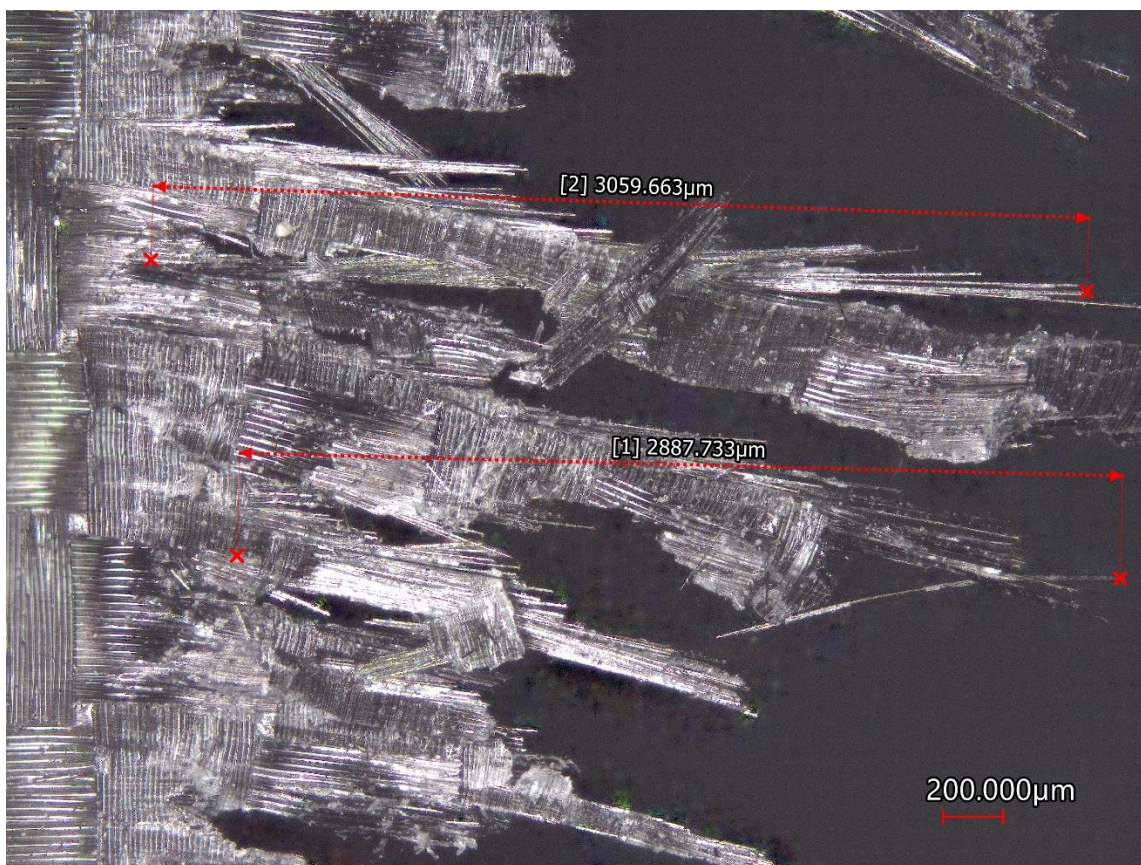


Graf 3. Závislost delaminace na čase pro nástroje s ochranným povlakem **AluCon**

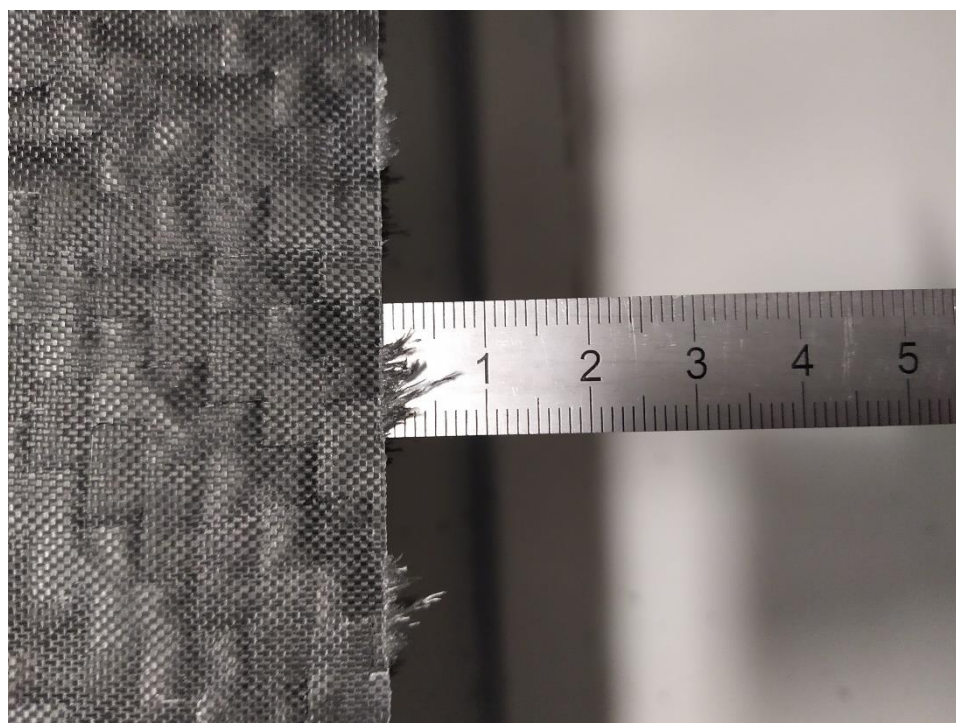


Graf 4. Závislost delaminace na opotřebení pro nástroje s ochranným povlakem **AluCon**

Jak je vidět na obr. 46 a 47 delaminace narostla do hodnot kdy nebyl konfokální mikroskop schopen změřit celou délku delaminace a bylo pro určení délky nutné využít ocelové měřítko.



Obr. 46- delaminace vzorku v konfokálním mikroskopu

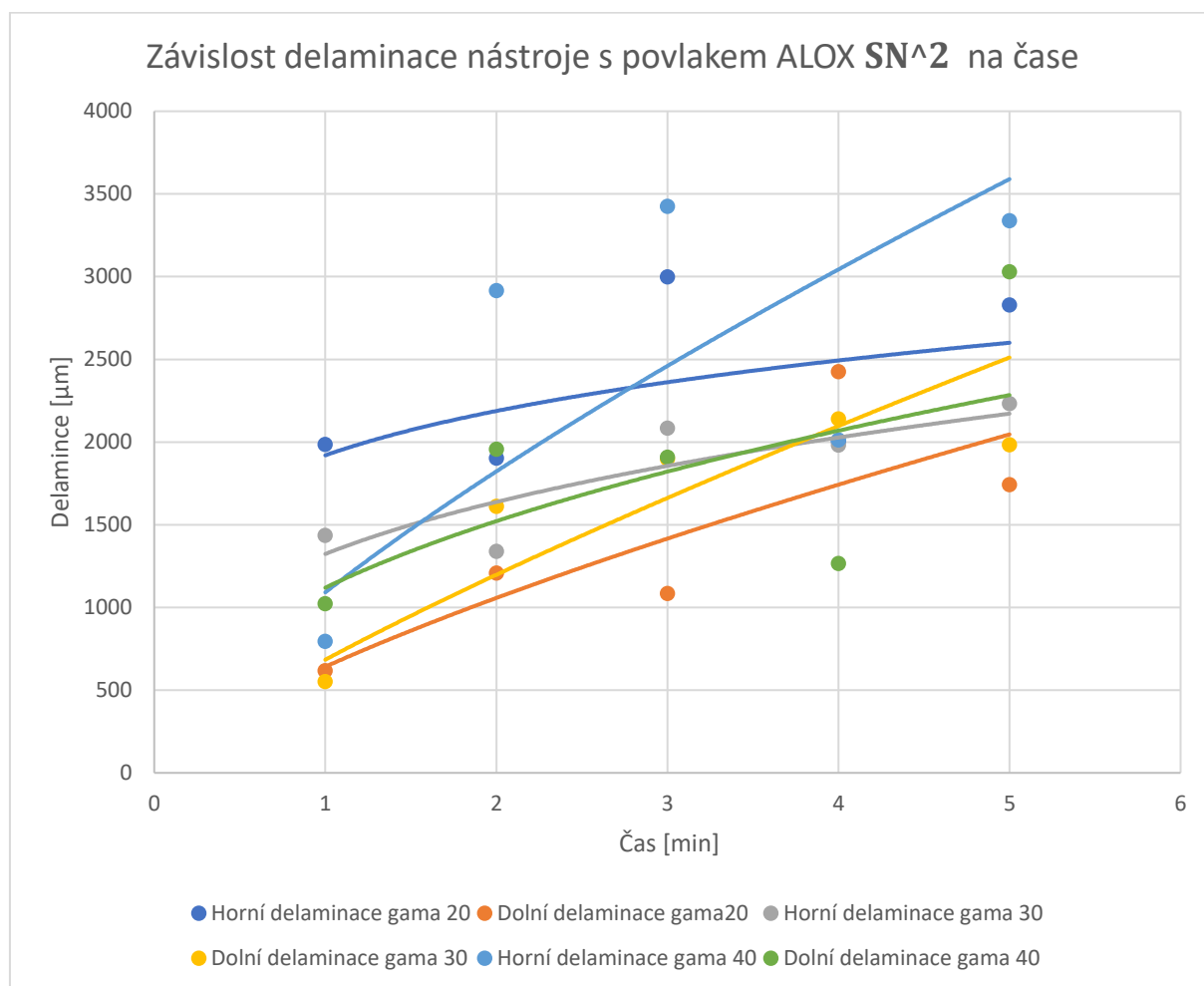


Obr. 47- Delaminace vzorku po 4 minutách frézování

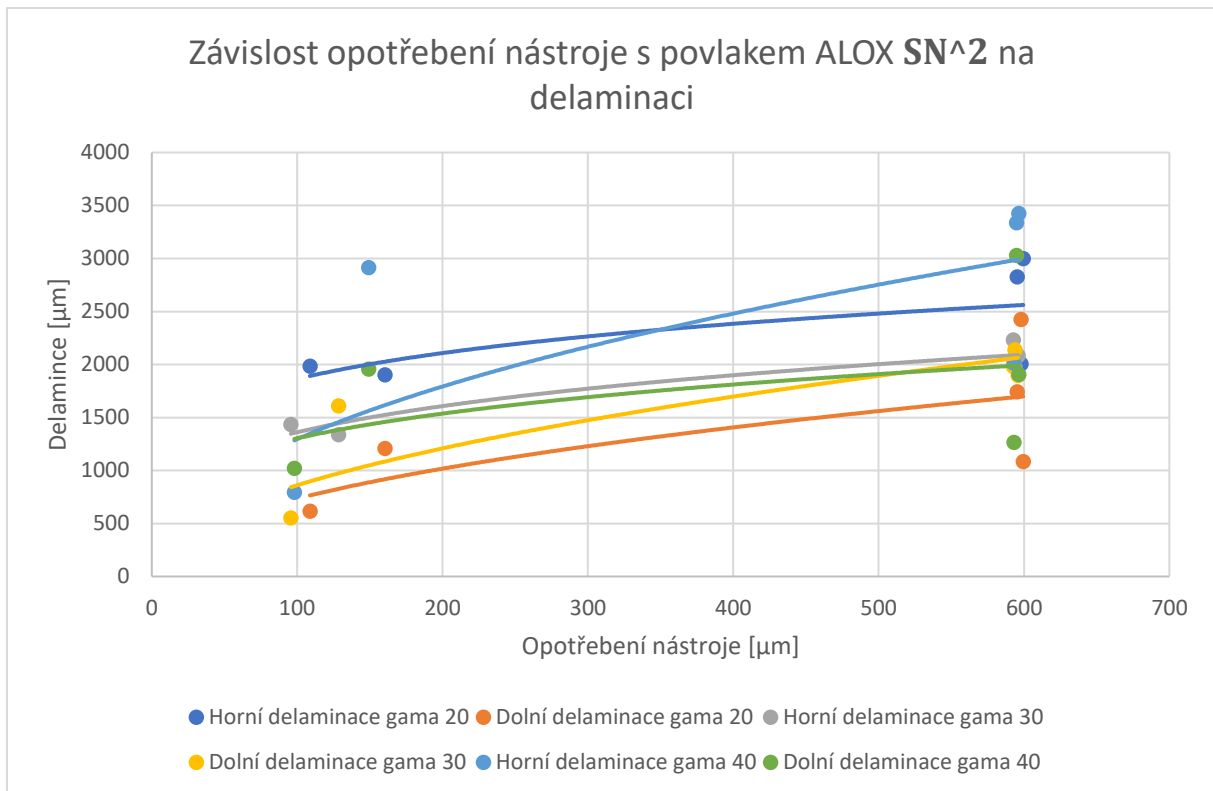
Na grafu 5 a 6 je vidět, že delaminace u povlaku **ALOX SN²** již není plynule závislá na opotřebení ani na čase. Naměřené hodnoty narůstají a klesají s rostoucím opotřebení nástroje i časem frézování. Toto bylo opět způsobeno zničením ochranného povlaku a s tím spjatou změnou geometrie.

ALOX SN ²	Delaminace [μm] \pm nejistota měření					
	Gama 20°		Gama 30°		Gama 40°	
čas	horní	spodní	horní	spodní	horní	spodní
1 min	1963 \pm 673,9	854,7 \pm 389,8	2055,5 \pm 107,5	1803 \pm 469,8	2245,2 \pm 402,5	1292,7 \pm 488,1
2 min	3423,8 \pm 217,1	833,8 \pm 901,1	1573,9 \pm 793,3	1947,3 \pm 338,5	3069,8 \pm 197,5	1431,5 \pm 592,6
3 min	3039,5 \pm 657	2104,9 \pm 182,8	1793,1 \pm 102,2	1194,1 \pm 677,3	2732,9 \pm 110,5	921,7 \pm 253,1
4 min	1774,6 \pm 112,4	2080 \pm 653,3	2085,4 \pm 615,9	1174,6 \pm 747,1	3528,9 \pm 932,9	2308,3 \pm 2312,7
5 min	2706,1 \pm 545,9	1876,4 \pm 683,1	1990,9 \pm 899,6	1954,7 \pm 218,2	2854,9 \pm 199,6	1764,1 \pm 727,2

TAB 12. Závislost delaminace na čase pro nástroje s povlakem **ALOX SN²**



Graf 5. Závislost delaminace na čase pro nástroje s ochranným povlakem **ALOX SN²**



Graf 6. Závislost delaminace na opotřebení pro nástroje s ochranným povlakem ALOX SN²

Vyhodnocení kapitoly

Z naměřených hodnot vyplývá:

- Delaminace byla už od prvního měření značná
- Největší delaminace se vyskytovala v místech, kde byl smysl vláken kolmý na směr frézování.
- Největší naměřená hodnota delaminace byla u desky frézované nástrojem s úhlem gama 20° s ochranným povlakem AluCom po 3 minutách frézování. Naměřená hodnota měla velikost přesahující 7000 μm a byla naměřena z horní strany řezu.

Chyby měření v TAB. 11 a 12 vyšly značné. Toto měření bylo spíše orientační. Pro přesnější vyhodnocení chyb měření by bylo nutné změřit výrazně větší počet vláken, než bylo změřeno, což nebylo z důvodu časové tísně možné. Výsledek takového měření by pak odpovídal skutečné chybě měření.

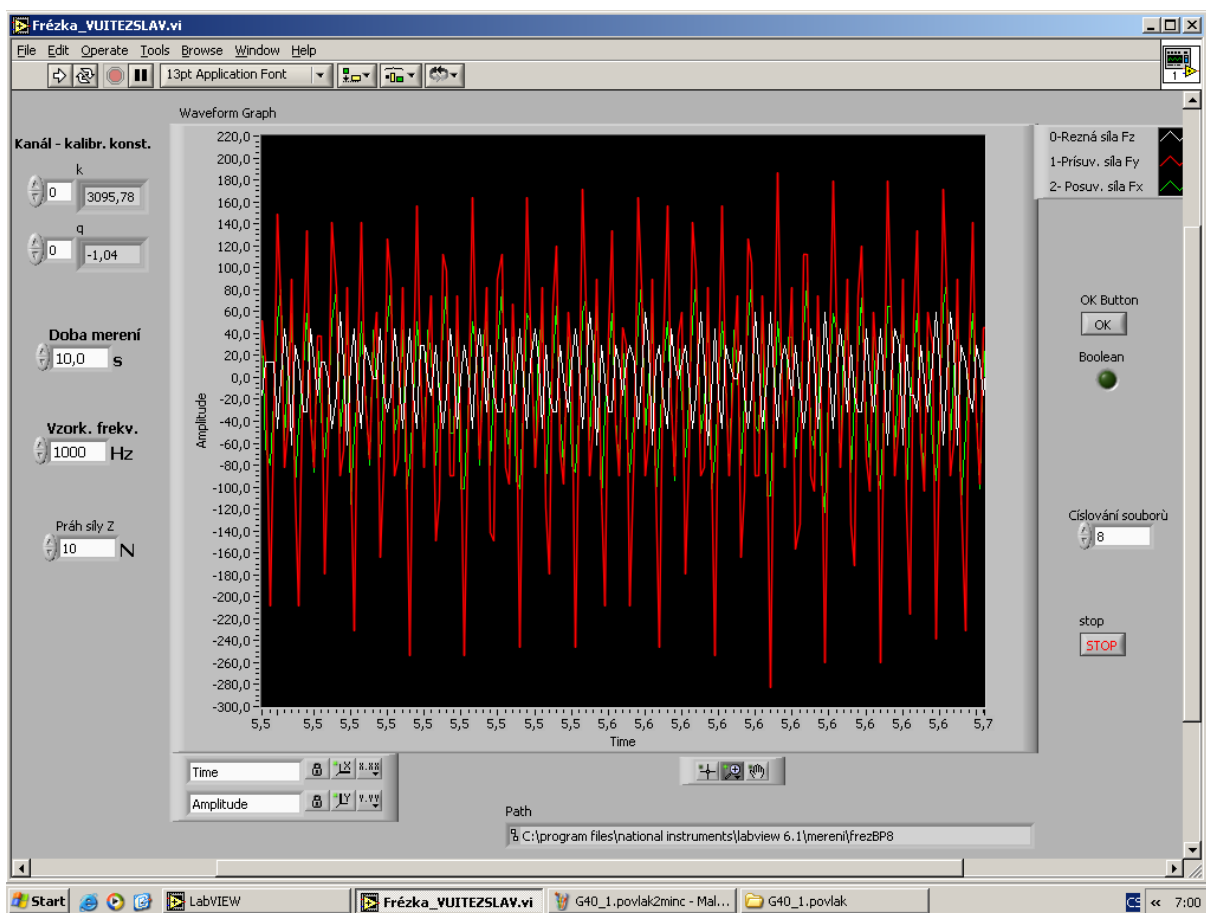
4.3. Síly při frézování

Jak bylo zmíněno v metodice složky síly působící na nástroj byly měřeny během frézování. Tato podkapitola se zabývá tím, jaký vliv na tyto složky měl čas a opotřebení nástroje.

Závislost sil na čase frézování

Za pomoci aplikace Labview byli vyhodnoceny tři náhodné úseky během cyklu frézování. Z těchto úseků byly odečteny složky sil (F_x , F_y , F_z) působící na nástroj.

Na Obr. 48 je vidět ukázkou průběhu složek sil v aplikaci Labview. Červená křivka (F_y) je zde nejvýznamnější jedná se totiž o posuvovou sílu.



Obr. 48- Průběh složek sil působících na nástroj v aplikaci Labview

AluCon	Složky sil [N]± nejistota měření								
	Gama 20°			Gama 30°			Gama 40°		
čas	Fx	Fy	Fz	Fx	FY	Fz	Fx	Fy	Fz
1 min	51,7±8,7	192,5±13,2	63,4±19,1	56,7±17,5	179,2±23,2	46,6±8,7	46,7±24,4	192,5±7,6	50±20,1
2 min	96,7±17,6	265±7,6	77,5±20,1	89,2±15,8	215±20,1	74,2±4,3	94,2±4,3	227,5±7,6	82,5±4,3
3 min	108,9±19,1	233,4±8,7	61,7±8,7	90,9±8,7	251,7±19,1	75,9±15,8	85,2±22,8	244,2±15,8	58,4±3,4
4 min	113,4±61,5	298,4±8,7	76,7±4,3	137,5±34,8	271,7±17,5	96,7±11,6	90±7,6	242,5±4,3	66,7±41,8
5 min	115±22,8	292,5±34,8	70,9±15,8	185,4±37,5	278,4±24,4	106,7±17,5	110,9±4,3	253,4±11,6	65,9±19,1

TAB. 13. Závislost Složek sil na čase frézování pro nástroje s povlakem **AluCon**

Zdánlivě větší chyby měření má za příčinu občasný problém vyčíst z grafu přesnou hodnotu amplitudy, je tomu tak neboť grafy průběhů složek sil se často překrývají, a tak odečtení přesného vrcholu amplitudy není vždy možné.

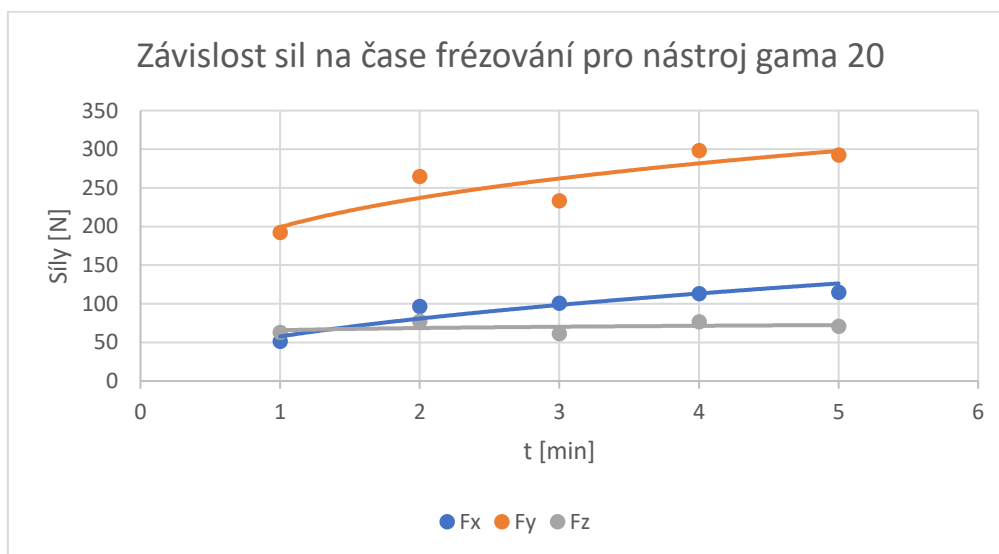
Na grafech 5-7 je vidět, jak se měnily složky sil:

Složky Fx narůstala s časem frézování.

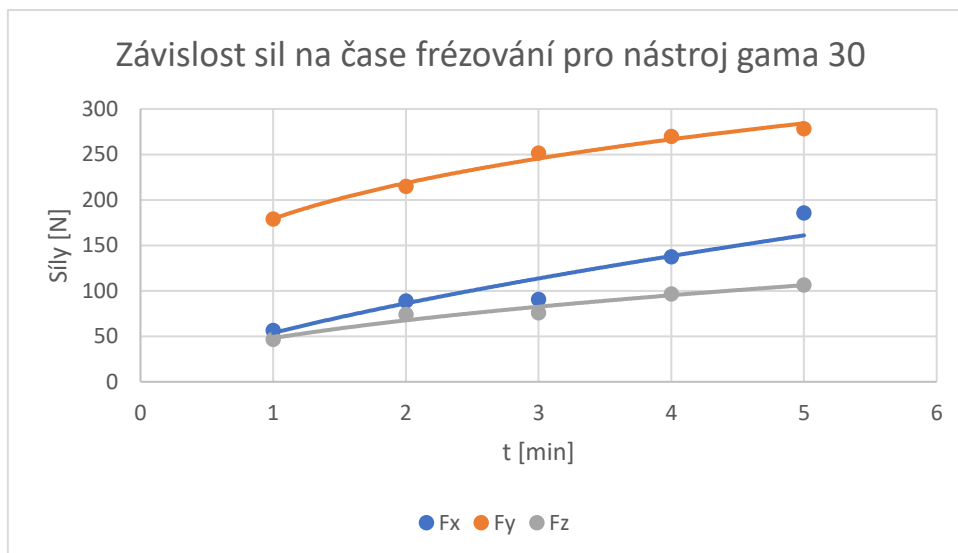
Složky Fy byla vždy největší a také narůstala s časem.

Složka Fz narůstala s časem avšak její změna velikosti byla minimální. Je tomu tak neboť nástroje mají skoro nulový úhel šroubovice.

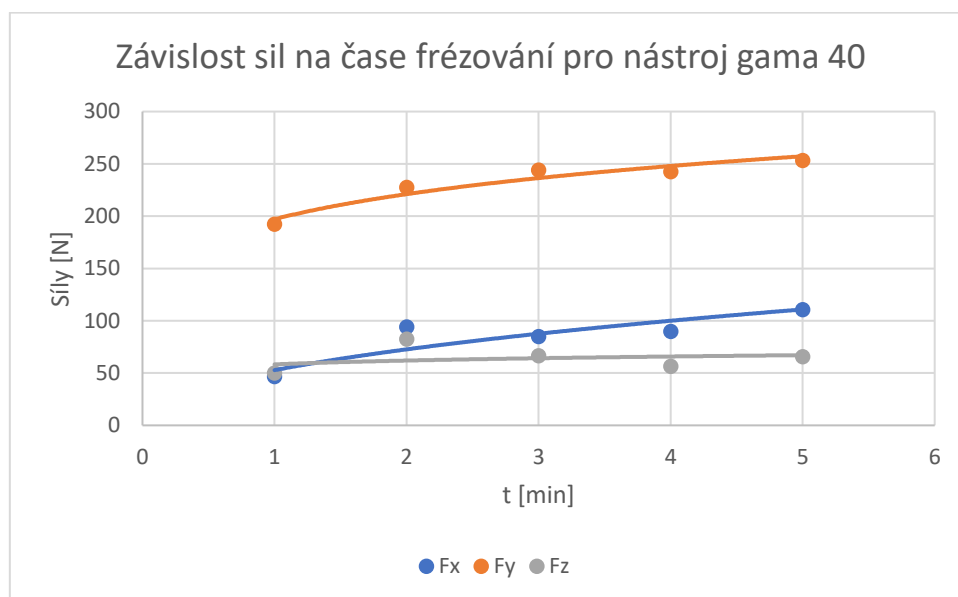
Největší naměřená hodnota síly byla složka Fy u nástroje s úhlem gama 20° při 5 minutách frézování.



Graf 5. Závislost sil na čase pro nástroj Gama 20° s ochranným povlakem **AluCon**



Graf 6. Závislost sil na čase pro nástroj Gama 30° s ochranným povlakem AluCon



Graf 7. Závislost sil na čase pro nástroj Gama 40° s ochranným povlakem AluCon

ALOX SN ²	Složky sil [N]± nejistota měření								
	Gama 20°			Gama 30°			Gama 40°		
čas	Fx	Fy	Fz	Fx	FY	Fz	Fx	Fy	Fz
1 min	88,4±15,8	200±33,1	56,7±11,6	75,9±41,8	162,5±8,7	65,9±4,3	65±26,3	116,7±8,7	69,2±15,8
2 min	118,4±8,7	272,5±8,7	81,7±4,3	96,7±11,6	170,9±11,6	73,4±8,7	80±7,6	155,9±11,6	61,7±4,3
3 min	150±26,3	271,7±23,2	74,2±26,7	135±15,2	200,9±28,7	70±15,2	127,5±46,2	146,7±24,4	51,7±19,1
4 min	166,7±28,7	267,5±36,3	88,4±31,6	144,2±44,5	225±42,3	78,4±30,8	123,4±24,4	221,7±23,2	70±15,2
5 min	192,5±38	275,9±34,3	85,9±17,5	172,5±7,6	237,5±26,3	85,9±4,3	170,9±19,1	225±8,7	77,5±20,1

TAB. 14. Závislost Složek sil na čase frézování pro nástroje s povlakem ALOX SN²

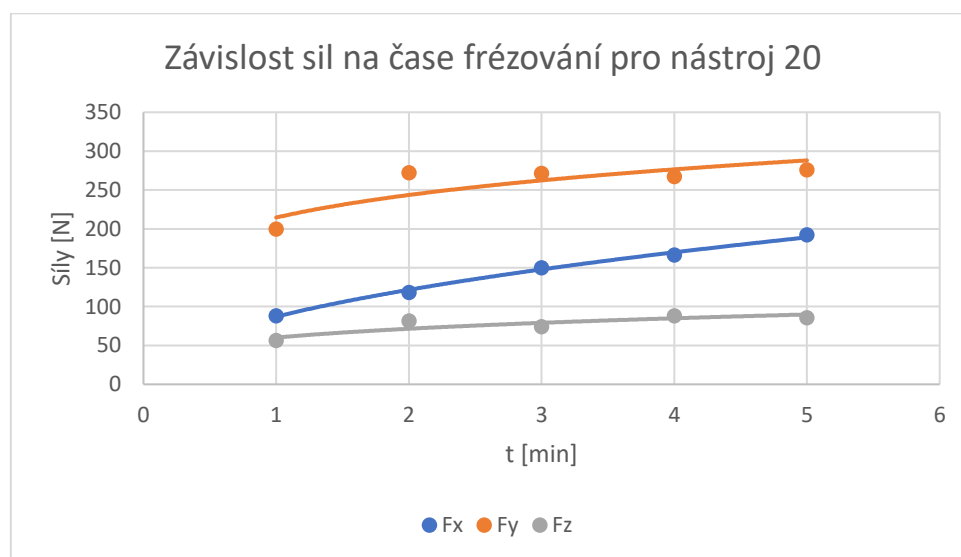
Z grafů 8-10 vyplívá:

Složky F_x se s časem zvětšují stejně jako tomu bylo u nástrojů s povlakem AluCon

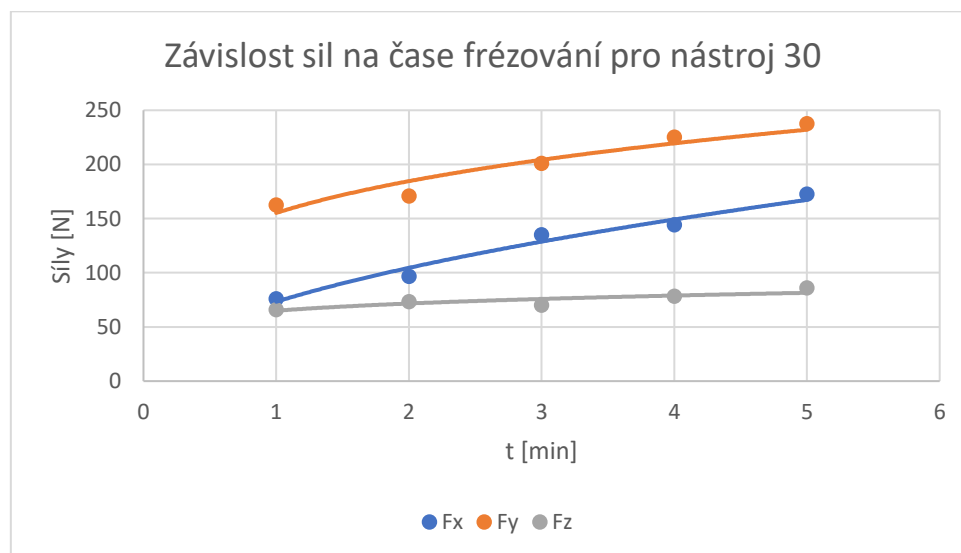
Složky F_y byla opět nejvýznamnější jak svojí velikostí, tak svojí změnou. A její nárůst byl ze všech složek největší.

Složky F_z opět skoro nemění svou velikost.

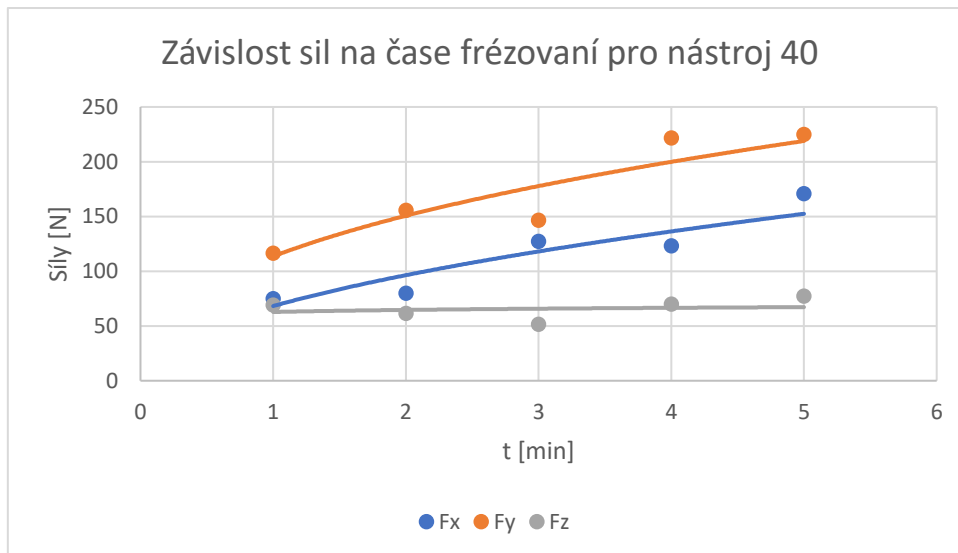
Největší naměřená hodnota byla opět hodnota F_y u nástroje s úhlem $\gamma = 20^\circ$.



Graf 8. Závislost sil na čase pro nástroj Gama 20° s ochranným povlakem **ALOX SN²**



Graf 9. Závislost sil na čase pro nástroj Gama 30° s ochranným povlakem **ALOX SN²**



Graf 10. Závislost sil na čase pro nástroj Gama 40° s ochranným povlakem ALOX SN²

Vyhodnocení kapitoly

Z měření vyplívá:

- Síly narůstaly s časem, a tudíž i s opotřebením
- Nejvýznamnější složka síly byla složka Fy, neboť se jednalo o posuvovou sílu
- Nejvyšší naměřená síla byla síla Fy u nástroje s úhlem gama 20° a ochranným povlakem AluCon a to 292,5±34,8 N.
- Složky Fx a Fz byli v průměru nižší u nástrojů s povlakem AluCon avšak složka Fy byla v průměru vyšší než složka Fy s povlakem ALOX SN²

5. Vyhodnocení a diskuze výsledků

V této kapitole je vyhodnocení výsledků z experimentální části a prodiskutování jejich významu na danou problematiku.

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit vliv řezného nástroje a ochranného povlaku na průvodní jevy při frézování materiálu z kompozitu s uhlíkovým vláknem.

Pro tento experiment bylo nezbytné mít teoretické znalosti dané problematiky, které jsou shrnuty v kapitole 2.

Pro daný experiment bylo nutné rozhodnout, jaké stroje a nástroje budou použity, pro docílení ideálního průběhu experimentu. Toto bylo obsaženo v kapitole 3 metodika. Kde je shrnuto vše potřebné k fyzickému provedení experimentu.

Výsledky a řezné podmínky již realizovaného experimentu byli shrnuty v kapitole 4. kde byli podrobně zmapovány do grafů a tabulek.

Vyhodnocení experimentu je následující:

Opotřebení ochranného povlaku nástroje

Opotřebení ochranného povlaku nástrojů bylo zkoumáno na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X 1000, jehož vlastnosti byly popsány v metodice v podkapitole 3.3. Měření probíhalo dle postupu popsaného v podkapitole 4.1. a naměřené výsledky byly vyhodnoceny v aplikaci Microsoft Excel.

Z experimentu vyplynulo, že opotřebení ochranných povlaků u všech nástrojů rapidně narůstalo s časem frézování. Brzy došlo k úplnému zničení ochranného povlaku a bylo nutné měřit i opotřebení hřbetu nože samotného. Viz. podkapitola 4.1.1.

U všech nožů byla maximální hodnota opotřebení ochranného povlaku okolo 600 μm , což je z důvodu toho, že jde o rozměr fazetky hřbetu nástroje. Proto maximální opotřebení u všech nástrojů byla celá fazetka.

Maximální opotřebení nástroje samotného pak bylo $74,74 \pm 11,8 \mu\text{m}$. Bylo tomu tak u nástroje s úhlem $\gamma 20^\circ$ a ochranným povlakem AluCon.

Geometrie nástrojů byla také značně změněna vlivem opotřebení ochranného povlaku. Rádus břitu se značně zvětšil stal se hrbolatým. Viz podkapitola 4.1.2.

Nejlépe si vedl nástroj s ochranným povlakem ALOX SN² a úhel gama 40°. Jeho změna rádiusu byla z 21,5 µm na 50,5 µm. Tento nástroj vykazoval i nejpomalejší nárůst opotřebení ze všech testovaných nástrojů. Bohužel i přes tento pomalý nárůst byl jeho ochranný povlak zničen po páté minutě frézování stejně jako u ostatních nástrojů s tímto povlakem.

Delaminace

Vzorek byla deska z kompozitního materiálu, jejíž vlastnosti jsou uvedeny v podkapitole 3.7. Měření probíhalo opět na konfokálním mikroskopu Keyence Vx-X 1000. Probíhalo dle postupu popsaném v podkapitole 4.2. Následné výsledky byli opět zpracovány v aplikaci Microsoft Excel.

Během experimentu se vyskytly dva druhy delaminace. Delaminace prvního typu se vyznačovala dlouhými vlákny, která byla pouze mírně nebo vůbec ořezána frézou. Tyto vlákna byli kolmé na smysl frézování a vykazovali vždy největší delaminaci. Delaminace druhého typu byli vlákna podélně jdoucí s hranou řezu odtržené od hrany. Tyto delaminace byly popsány v podkapitole 4.2.

Z experimentu byl zřetelný okamžitý výskyt delaminace. Zkoumané desky ihned vykazovaly extrémní nárůst delaminace. Tato delaminace se vyskytovala v místech, kde měla uhlíková vlákna kolmý smysl ke směru frézování. Změřená delaminace občas narůstala do hodnot, které již nebyl konfokální mikroskop schopen změřit, a proto bylo některé hodnoty nutno měřit jinými způsoby. Největší hodnota delaminace byla u desky frézované nástrojem s úhlem gama 20° s ochranným povlakem AluCom měřená po 3 minutách frézování. Naměřená hodnota měla velikost přesahující 7000 µm a byla naměřena z horní strany řezu. Tato hodnota však nebyla jediná s tak extrémní hodnotou. Hodnoty nezměřitelné konfokálním mikroskopem dosáhli i jiné nástroje a to nástroje viz. TAB. 15.

Nástroj	Povlak	Čas frézování	Hrana	Velikost vlákna [µm]
Gama 20	AluCon	2 min	horní	5000
Gama 20	AluCon	3 min	horní	7000
Gama 20	AluCon	5 min	horní	5000
Gama 40	AluCon	2 min	horní	5000
Gama 40	AluCon	3 min	horní	6000
Gama 40	AluCon	5 min	spodní	5500
Gama 20	ALOX SN ²	2 min	horní	6000
Gama 40	ALOX SN ²	2 min	horní	5500
Gama 40	ALOX SN ²	5 min	horní	5000

TAB. 15. Tabulka extrémních délek naměřených vláken.

Delaminace sice byla závislá na opotřebení nástroje, avšak délka odtržených vláken se s každým měřením lišila ve své délce. Tyto rozdíly byly způsobeny rapidním měněním geometrie nástroje.

Co se týče průměrné velikosti delaminace. Vzorky frézované nástroji s povlakem ALOX SN² vykazovali menší delaminaci než vzorky frézované nástroji s povlakem AluCon. Což odpovídalo rychlosti opotřebení tohoto povlaku.

Řezné síly

Měření sil bylo prováděno během operace frézování za pomoci dynamometru Kistler s parametry popsány v metodice v podkapitole 3.2. Postup měření byl popsán s podkapitole 4.3.1. a naměřené hodnoty složek sil byly následně vyhodnoceny v aplikaci Microsoft Excel.

Z experimentu vyšlo, že největší průměrnou velikost měla složka síly F_y . Tato síla byla největší, neboť se jednalo o posuvovou řeznou sílu. Dále můžeme vidět, že složky sil narůstají s časem.

Největších řezných sil bylo dosaženo u nástroje s ochranným povlakem AluCon a úhlem γ 20°. Tento nástroj dosáhl síly o velikosti $292,5 \pm 34,8$ N. Což koresponduje s ostatními údaji zjištěnými v této práci. Nástroje s tímto povlakem měli rychlejší opotřebení než nástroje s povlakem ALOX SN². Z těchto nástrojů s povlakem Alucon vykazoval právě nástroj s úhlem γ 20° nejrychlejší opotřebení, což zapříčinilo i největší naměřené síly.

6. Závěr

V předložené bakalářské práci na téma „Studie změny úhlu čela řezného nástroje a vlivu řezného povlaku na průvodní jevy při frézování kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem,“ slouží k hlubšímu porozumění problematice frézování kompozitních materiálů s uhlíkovým vláknem.

Cílem této práce bylo zjistit vliv ochranných povlaků a rozdílné geometrie nástroje na opotřebení nástroje a delaminaci desky z kompozitního materiálu s uhlíkovým vláknem při cyklickém konturovém frézování.

Při tomto experimentu byly použity dvě sady jednobřitých fréz vyrobených ze slinutého karbidu o třech kusech v každé sadě. Každá sada byla opatřena jiným ochranným povlakem. Nástroje v sadách se lišily pouze jejich úhlem gama, který byl 20°, 30° a 40°. Zvolené ochranné povlaky pro tyto sady byly AluCon a ALOX SN².

Všechny nástroje byly frézovány za jednotných řezných podmínek popsaných v podkapitole 4.1.

Stroje, měřicí přístroje a metody měření použité k tomuto experimentu byly uvedeny v kapitole 3. Metodika.

Podstatné informace, které vyplynuly z experimentu:

- Opotřebení nástroje při obrábění kompozitu s uhlíkovým vláknem prudce narůstá což má poté vliv na výskyt značné delaminace a s tím spojenými vysokými silami během operace frézování. Ochranné povlaky byly brzy zcela zničeny což vystavilo břit samotného nástroje opotřebení.
- Delaminace zkoumaných vzorků měla rychlý nárůst, který při některých měřeních znemožňoval použití konfokálního mikroskopu. I přes tento nárůst delaminace vzorků nebyla závislá na čase. Je tomu tak, protože geometrie nástrojů byla vlivem opotřebení značně změněna což napomohlo nepředvídatelné delaminaci
- Síly měřené při operaci frézování byly závislé na čase a tím i na opotřebení. Síly vykazovaly plynulý nárůst, který je dobře viditelný v kapitole 4.3.
- Nejlépe si vedla jednobřitá fréza s úhlem gama 40° a ochranným povlakem ALOX SN². Tato fréza vykazovala nejmenší nárůst opotřebení vlivem frézování. K

zničení jejího ochranného povlaku bylo dosaženo ve stejném měřeném čase ($t=5$ min) jako u ostatních nástrojů s tímto povlakem, avšak jeho nárůst byl pomalejší. Tato fréza také prošla nejmenší změnou geometrie břitu což můžeme vidět v podkapitole 4.1.2. Díky jejímu nejpomalejšímu nárůstu opotřebení pak byly i síly naměřené během operace frézování nejmenší. Nejvýznamnější zde byla síla F_y , která byla při posledním cyklu frézování $225\pm 8,7$ N.

- Nejhůře si pak vedl nástroj s úhlem $\gamma 20^\circ$ a ochranným povlakem AluCon. Tento nástroj vykazoval nejrychlejší nárůst opotřebení a po tom co byl povlak prohlášen za zcela zničen i největší opotřebení břitu nože samotného $74,74\pm 11,8$ μm . Síly na tomto nástroji také vykazovali nejvyšší naměřené hodnoty, a to sílu $F_y = 292,5\pm 34,8$ N.

V průměru měli nástroje opatřené ochranným povlakem **ALOX SN²**, frézované za řezné rychlosti **150 m/min** a posuvu na zub **0,1 mm**, lepší výsledky než nástroje s povlakem AluCon. Nejlepší z nástrojů opatřených tímto ochranným povlakem byl pak nástroj s **úhlem $\gamma 40^\circ$** . Tento nástroj s tímto ochranným povlakem je nejlepší variantou pro frézování kompozitních materiálů s uhlíkovým vláknem. Avšak jako navázání na tuto bakalářskou práci by bylo vhodné tento experiment zopakovat se stejnými nástroji, avšak s použitím diamantových ochranných povlaků určených specificky na frézování kompozitu s uhlíkovým vláknem.

Seznam zdrojů

- [1] YE, Ronan. What is Milling: Definition, Process & Operations. *Rapid Prototyping & Low Volume Production* [online]. 10. červenec 2023 [vid. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.3erp.com/blog/milling/>
- [2] SolidCAM 3D frézování. *SolidVision* [online]. [vid. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/cam-reseni/cnc-frezovani/solidcam-3d-frezovani>
- [3] ŠVRČINA, Josef. Princip a podstata frézování. nedatováno.
- [4] *What is Composite Material? Definition, Properties, Types, and Applications* [online]. [vid. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/composite/>
- [5] PUSCH, Jens a Bernd WOHLMANN. Chapter 2 - Carbon Fibers. In: Boris MAHLTIG a Yordan KYOSEV, ed. *Inorganic and Composite Fibers* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2018 [vid. 2024-01-26], The Textile Institute Book Series, s. 31–51. ISBN 978-0-08-102228-3. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102228-3.00002-5
- [6] *China Customized 3k Carbon Fiber Twill Weave 200g Suppliers, Manufacturers, Factory - Free Sample - YIXIN* [online]. [vid. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://cz.suncomposites.com/carbon-fiber-fabric/3k-carbon-fiber-fabrics/3k-carbon-fiber-twill-weave-200g.html>
- [7] *How is Carbon Fiber Made? | ZOLTEK Corporation* [online]. 10. srpen 2017 [vid. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/>
- [8] *Making Carbon Fibre More Cost Effective - EngineeringClicks* [online]. 13. září 2017 [vid. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/carbon-fibre/>
- [9] *Machining carbon composites: Risky business* [online]. 25. leden 2024 [vid. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/machining-carbon-composites-risky-business>
- [10] WARFIELD, Bob. Machining Carbon Fiber: Quick Guide [Composites, Drilling, CNC Tools]. *CNCCookbook: Be A Better CNC'er* [online]. 15. červen 2019 [vid. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.cnccookbook.com/machining-carbon-fiber-composites-drilling-cnc-tools/>
- [11] Carbon Fiber Testing: Five Tips for Machining Carbon Fiber. *Element* [online]. [vid. 2024-01-26]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/carbon-fiber-testing>
- [12] Machining Carbon Fiber: What You Need to Know | AT-Machining. <https://at-machining.com/> [online]. [vid. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://at-machining.com/machining-carbon-fiber/>
- [13] KNÁPEK, Tomáš, Štěpánka DVOŘÁČKOVÁ a Martin VÁŇA. The Effect of Clearance Angle on Tool Life, Cutting Forces, Surface Roughness, and Delamination during Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Milling. *Materials* [online]. 2023, **16**(14), 5002. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma16145002
- [14] *zav_prace_soubor_verejne.pdf* [online]. [vid. 2024-02-08]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83554

- [15] *zav_prace_soubor_verejne.pdf* [online]. [vid. 2024-01-26]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=23996
- [16] SRIDHARAN, S. Introduction. In: Srinivasan SRIDHARAN, ed. *Delamination Behaviour of Composites* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2008 [vid. 2024-01-26], Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, s. xxi–xxiii. ISBN 978-1-84569-244-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-84569-244-5.50029-8
- [17] COMPANY, Harvey Performance. How to Avoid Composite Delamination With Compression Cutters - In The Loupe. *Harvey Performance Company* [online]. 12. září 2017 [vid. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/avoid-delamination-compression-cutters/>
- [18] Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů | MM Průmyslové spektrum. *www.mmspektrum.com* [online]. [vid. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-objevni-kompozitnich-materialu>
- [19] COMPANY, Harvey Performance. Ideal Tooling for Machining Composites - In The Loupe. *Harvey Performance Company* [online]. 21. květen 2018 [vid. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/tooling-machining-composites/>
- [20] Opatření břitů. *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>
- [21] *Tool Wear Patterns in Machining | Secotools.com* [online]. [vid. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/122073>
- [22] *Cutting Force | Kistler* [online]. [vid. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/US/en/cutting-force/C00000102>
- [23] JULLIEN-CORRIGAN, A. a K. AHMADI. Measurement of high-frequency milling forces using piezoelectric dynamometers with dynamic compensation. *Precision Engineering* [online]. 2020, **66**, 1–9. ISSN 0141-6359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2020.07.001
- [24] KUMAR, Praveen a S. K. S. YADAV. Measurement and analysis of cutting forces using dynamometer in turning of EN-8 steel. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2023 [vid. 2024-01-26]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2023.06.222
- [25] ELLIOTT, Amicia D. Confocal Microscopy: Principles and Modern Practices. *Current protocols in cytometry* [online]. 2020, **92**(1), e68. ISSN 1934-9297. Dostupné z: doi:10.1002/cpcy.68
- [26] SR, MEFANET, síť lékařských fakult ČR a. *Konfokální mikroskop – WikiSkripta* [online]. [vid. 2024-03-20]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Konfok%C3%A1ln%C3%AD_mikroskop
- [27] MOUDRÝ, Vojtěch. Jméno a příjmení: Osobní číslo: Studijní program: Zadávací katedra: Akademický rok: nedatováno.
- [28] VÁŇA, Bc Martin. Jméno a příjmení: Osobní číslo: Studijní program: Zadávací katedra: Akademický rok: nedatováno.

[29] *download.pdf* [online]. [vid. 2024-03-24]. Dostupné z: <https://www.unicut.cz/download.php?fid=5257>

[30] *CARBON REINFORCEMENTS* | *grm-systems.cz* [online]. [vid. 2024-03-29]. Dostupné z: <http://www.grm-systems.cz/en/carbon-reinforcements>