



Bakalářská práce

Vliv změny řezných podmínek na průvodní jevy při vrtání kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken.

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

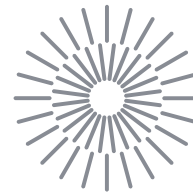
Jan Stružinský

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Knápek

Katedra obrábění a montáže

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Vliv změny řezných podmínek na průvodní jevy při vrtání kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken.

Jméno a příjmení:

Jan Stružinský

Osobní číslo:

S21000106

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Zadávací katedra:

Katedra obrábění a montáže

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí poznatků o kompozitních materiálech a jejich obrábění, shrnutí poznatků o technologii vrtání, vyhodnocování opotřebených řezných nástrojů, řezných sil a delaminace.
2. Volba vhodných řezných nástrojů a řezných podmínek pro vrtání kompozitních materiálů plněných uhlíkovými vlákny.
3. Návrh metodiky prováděných experimentů.
4. Realizace experimentů.
5. Vyhodnocení experimentů. Vyjádření závislostí mezi opotřebením nástroje, řeznými silami, řeznými podmínkami a delaminací. 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. 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.

Vliv změny řezných podmínek na průvodní jevy při vrtání kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken.

Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce je poskytnutí informací o procesu vrtání kompozitních materiálů, které jsou tvořeny reaktoplasty vyztuženými uhlíkovými vlákny.

Hlavním záměrem bakalářské práce je návrh optimálního řezného nástroje z hlediska geometrie nástroje a ověřit vhodné řezné podmínky pro proces vrtání reaktoplastu vyztuženého uhlíkovými vlákny.

Základní potřebné teoretické znalosti v oblasti dané problematiky jsou detailně popsány v teoretické části této práce, která obsahuje poznatky o kompozitních materiálech, procesu vrtání, používaných nástrojích a vzniklých defektech spojených s vrtáním.

Pro splnění vytyčeného cíle slouží celá experimentální část, jejíž součástí je metodika a popis měření sledovaných parametrů. Neodmyslitelnou její součástí je diskuze a závěr, kde dochází k vyhodnocení dosažených závěrů.

Klíčová slova

Vrtání, řezné podmínky, kompozitní materiál, uhlíková vlákna

Influence of changing cutting conditions on drilling phenomena in carbon fibre composite material

Abstract

The subject of this bachelor thesis is to provide information on the drilling process of composite materials, which are made up of carbon fibre reinforced thermoset.

The main aim of the bachelor thesis is to design the optimal cutting tool in terms of tool geometry and to verify the appropriate cutting conditions for the drilling process of carbon fibre reinforced thermoset.

The basic necessary theoretical knowledge in the field of the subject is described in detail in the theoretical part of this thesis, which contains knowledge about composite materials, the drilling process, the tools used and the resulting drilling-related defects.

The whole experimental part, which includes the method and description of the measurement of the observed parameters, serves to fulfil the set objective. The discussion and conclusion, where the conclusions reached are evaluated, are an essential part of the experiment.

Keywords

Drilling, cutting conditions, composite material, carbon fibre

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Tomáši Knápkovi a konzultantovi panu Ing. Martinu Váňovi za jejich cenné připomínky a věcné rady při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině a blízkým přátelům za podporu během studia.

Obsah

<u>1.</u>	Úvod	12
<u>2.</u>	Teoretická Část	13
<u>2.1</u>	Kompozitní materiály	13
<u>2.2</u>	Vrtání	15
<u>2.3</u>	Vrtání kompozitních materiálů	17
<u>2.3.1</u>	Řezné podmínky	18
<u>2.3.2</u>	Měření řezných sil	19
<u>2.4</u>	Volba nástroje	20
<u>2.4.1</u>	Geometrie nástroje	20
<u>2.4.2</u>	Materiál řezného nástroje	22
<u>2.5</u>	Opotřebení řezného nástroje	23
<u>2.6</u>	Poškození způsobené vrtáním	25
<u>3.</u>	Metodika měření	26
<u>3.1</u>	Zkušební vzorky - CFRP	27
<u>3.2</u>	Použité obráběcí zařízení	28
<u>3.3</u>	Nástroje	30
<u>3.4</u>	Řezné podmínky	31
<u>3.5</u>	Měřené parametry při vrtání	32
<u>3.5.1</u>	Měření řezné síly	32
<u>3.5.2</u>	Měření opotřebení nástroje a delaminace	33
<u>3.6</u>	Tříska	34
<u>4.</u>	Experiment	53
<u>4.1</u>	Řezná síla	35
<u>4.1.1</u>	Řezná síla v závislosti na počtu vyvrtaných děr	35
<u>4.1.2</u>	Řezná síla v závislosti na opotřebení hlavního hřbetu	38

<u>4.2</u> Opotřebení nástroje	41
<u>4.3</u> Delaminace	45
<u>4.3.1</u> Rozsah delaminace v korelaci s opotřebením hlavního hřbetu	46
<u>4.4</u> Generovaná tříška	51
<u>5.</u> Vyhodnocení a diskuse výsledků	53
<u>6.</u> Závěr	58
Použitá literatura	60

Seznam zkratek

AS	Průměrná pevnost	[-]
CE	Řezná hrana	[-]
CER	Poloměr řezné hrany	[-]
CFRP	Kompozity s uhlíkovými vlákny posílené polymery	[-]
CT	Počítačová tomografie	[-]
CVD	Chemické napařování z plynné fáze	[-]
D	Průměr obráběné díry	[mm]
DF	Delaminační faktor	[-]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
FRP	Kompozity s vlákny posílené polymery	[-]
HM	Vysoký modul pružnosti	[-]
HS	Vysoká pevnost	[-]
HSS	Rychlořezná ocel	[-]
HT	Vysoká houževnatost	[-]
MMC	Kompozit s kovovou maticí	[-]
PAN	Polyakrylonitril	[-]
PKD	Polykrystalický diamant	[-]
PMC	Kompozit s polymerní maticí	[-]
SEM	Skenovací elektronový mikroskop	[-]
SK	Slinutý karbid	[-]
S-N-O-P	Soustava Stroj – Nástroj – Obrobek – Přípravek	[-]
VB	Velikost opotřebení boku nebo hřbetu	[μm]
VBD	Vyměnitelné Břitové Destičky	[-]
WC	Karbid wolframu	[-]

f_n	Posuv nástroje	$[\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}]$
f_z	Posuv na zub	$[\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}]$
n	Otáčky	$[\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_c	Řezná rychlost	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_e	Rychlost řezného pohybu	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_f	Posuvová rychlost	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
z	Počet břitů	$[-]$
θ	Úhel řezu vlákna	$[\text{°}]$
π	Ludolfovo číslo	$[-]$
γ	Úhel čela	$[\text{°}]$
D1	Průměr řezné části	$[\text{mm}]$
D2	Průměr stopky	$[\text{mm}]$
L1	Celková délka nástroje	$[\text{mm}]$
L2	Délka řezné části nástroje	$[\text{mm}]$

1 Úvod

Kompozitní materiály se postupně stávají běžným materiálem v průmyslové praxi i v dalších oblastech, včetně potřeb pro volnočasové aktivity. Přesto jejich hlavní oblast použití se nachází v letectví, vojenském průmyslu, nebo v kosmonautice, kde jsou využívány hlavně kvůli jejich vynikajícím mechanickým vlastnostem, jimiž jsou proslulé především kompozitní materiály plněné uhlíkovými vlákny. Mezi jejich hlavní přednosti spadá nízká hmotnost, zároveň s vysokou pevností, ve srovnání s jinými konstrukčním materiálem.

Jedním z nejčastějších dokončovacích procesů jejich obrábění je vrtání, které však přináší mnoho komplikací, vlivem problematické obrobitelnosti kompozitních materiálů. Tyto komplikace vedou k závažným vadám, jako opotřebení břitu nástroje, delaminaci, podpovrchovým poškozením, otřepům a poruchy skelného přechodu. Proto je zásadním faktorem při vrtání vláknových kompozitů pečlivé nastavení procesních podmínek, jako jsou rychlost posuvu, řezná rychlost, geometrie, materiál a povlaky nástroje, společně s vlivem prostředí na samotný proces vrtání a kvalitu vytvořeného otvoru.

Hlavním záměrem této bakalářské práce je návrh optimálního řezného nástroje z hlediska geometrie nástroje a ověřit vhodné řezné podmínky pro proces vrtání kompozitního materiálu CFRP. Konkrétně se zaměřuje na reaktoplast vyztužený uhlíkovými vlákny v podobě tkaniny s keprovou vazbou. Pro získání tíženého cíle byla vytvořena komplexní metodika pro měření řezných sil, opotřebení břitu, vzniklé delaminace a charakteru generované třísky, spolu s následným vyhodnocením naměřených výsledků.

Pro splnění vytyčeného cíle jsou potřebné teoretické znalosti v oblasti dané problematiky, které jsou detailně popsány v teoretické části této práce.

2 Teoretická část

Teoretická část obsahuje základní přehled o problematice konvenčního vrtání CFRP počínaje rozbořem částí kompozitního materiálu, přes problémy s obráběním až k volbě vhodných řezných podmínek a jejich vliv na průvodní jevy.

2.1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály spadají do speciální třídy materiálů, které kombinují dva nebo více odlišných materiálů, jejímž spojením výsledný materiál (kompozit) získá vylepšené vlastnosti tzv. synergetický efekt, tedy takové, jež nelze dosáhnout pouhým součtem jednotlivých vlastností. Tyto materiály se skládají z matrice, která plní roli pojiva, které udržuje celý materiál pohromadě a výztuže, jež poskytne materiálu vysokou pevnost a tuhost, čímž se stává nosným prvkem. Kromě toho matrice chrání před poškozením, které může vznikat na povrchu a před vlivem okolí jako je vysoká teplota, vlhkost či koroze [1, 2].

Na kompozitní materiály můžeme nahlížet podle příčného rozměru vyztužující fáze jako na mikrokompozitní materiály, kterými se zabývá i tato práce, dále na makrokompozity využívané především ve stavebnictví jako výztuž stavebních materiálů a nanokompozity. Dále kompozity mohou obsahovat různé druhy matrice, které mají různé vlastnosti. Konkrétně bio-polymerní, polymerní neboli s plastickou maticí PMC, kovová MMC, skleněná, sklokeramická a keramická [2].

To samé platí i pro vlákna, které mohou být skleněná, uhlíková, borová, polymerní, keramická, přírodní, proteinová a piezoelektrická. Vzhledem k malým rozměrům vláken jsou uspořádána do svazků, které se později využívají jako výztuž. Tyto svazky se dále zpracovávají ve formě Rovingu (pramence), tkaniny připomínající běžnou textilií, Rohože, Prepregy a Sendviče [2].

Dále je práce věnována kompozitům s polymerní maticí PMC, konkrétně vlákny vyztuženými plasty FRP a převážně na kompozit obsahující epoxidovou, fenolovou pryskyřici nebo jinou polymerní maticí (reaktoplast dříve termoset a termoplast) a uhlíková vlákna známé pod zkratkou CFRP. Jejich použití se uplatňuje v různých průmyslech např.

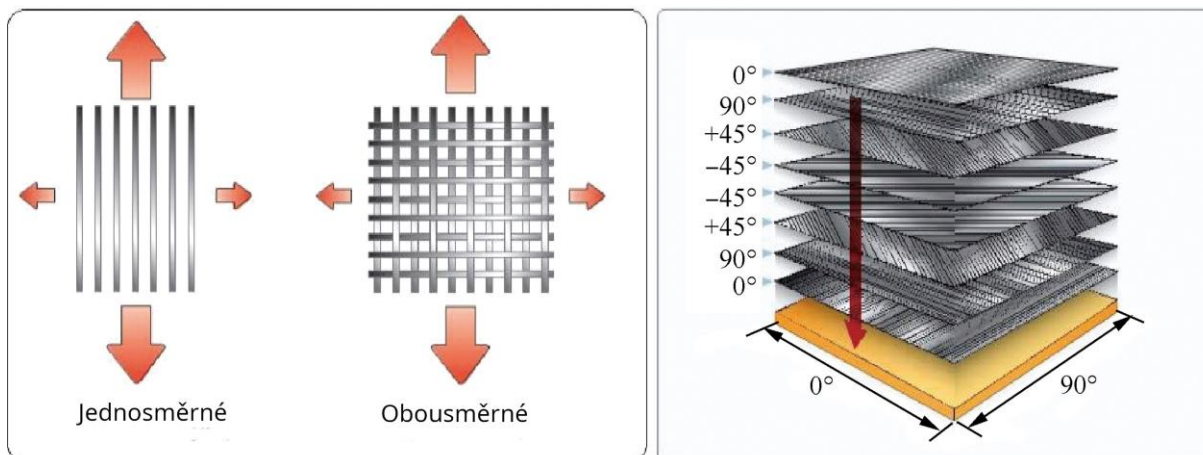
leteckém, automobilním, kosmickém, sportovním a zdravotnickém. Často se používají jako konstrukční materiály, které se dále spojují s jinými konstrukčními materiály, jako je ocel a další kovy, prostřednictvím mechanických spojů. Proto vrtání patří mezi nejčastější způsob obrábění CFRP [4].

Výroba uhlíkových vláken probíhá v pěti vzájemně navazujících fázích. Příprava prekurzoru, stabilizace, karbonizace, grafitizace, povrchová úprava. Z praktického hlediska se uhlíková vlákna klasifikují podle hodnot modulu pružnosti a pevnosti E výsledného vlákna na několik typů, mezi které patří AS (s průměrnou pevností), HS (s vysokou pevností), HT a HM (s vysokým modulem pružnosti) a mnohé další [5].

Jedna z neduh CFRP je jejich navlhavost, přestože nabízejí vysoký poměr pevnosti k hmotnosti výbornou odolnost proti korozi. Proto při použití procesního media dochází k nabobtnání a s tím spojené změně rozměrů. Při nasycení vodou a vystavením nízkých teplotám dochází ke změně jejich mechanických vlastností. Dochází k poklesu modulu pružnosti a pevnosti E , dále ke snížení houževnatosti. Proto při navrhování konstrukcí při těchto podmínkách je třeba zahrnout tyto vlivy prostředí [6].

Další problém se vyskytuje jak při obrábění tak při běžném použití vlivem reaktoplastické matrice nesmí být překročena kritická teplota, jelikož by docházelo k tepelné degradaci.

Vláknové kompozitní díly se nejčastěji vyrábějí procesem zvaný laminace, při kterém dochází k postupnému ukládání jednotlivých vrstev zpracované tkaniny a následnému prosycení pryskyřicí. Díky tomu vykazuje kompozitní materiál výrazně lepší mechanické vlastnosti ve směru vláken ve srovnání se směrem kolmým na vlákna. Proto se často uchyluje k střídavému ukládání výztuže v různých směrech s cílem dosáhnout, co neoptimálnější rozvržení mechanických vlastností (obr 1). Toho lze nejlépe docílit kvaziizotropní laminátovou strukturou, kde vrstvy ve směru 0° slouží pro zachycení osového zatížení, $\pm 45^\circ$ na smykové zatížení a 90° na boční (obr. 1). Mezi další metody výroby vláknových kompozitů patří vytvrzování v autoklávu, lisování, navíjení, vakuový vak a tažení [2, 3, 4].



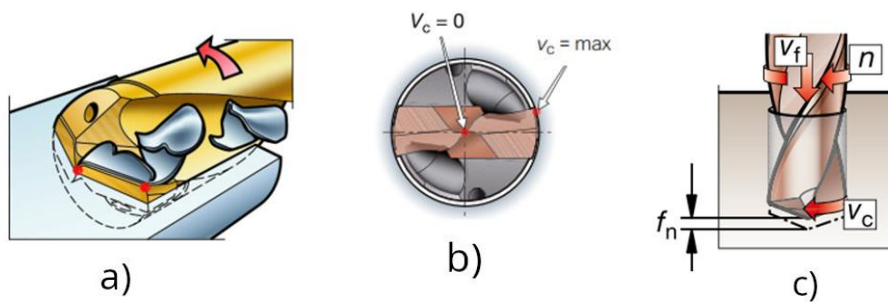
Obr. 1 Příklady možností rozložení vláken a nejlepší možnost kvaziizotropní laminátová struktura [7]

2.2 Vrtání

Vrtání je druh obráběcího procesu, který patří do kategorie třískového obrábění, využívaného pro obrábění vnitřních rotačních ploch válcového tvaru, vytváření otvorů s odstupňovanými průměry, závity a pro sražení hran, pomocí vícebřitvého nástroje zvaného vrták. Při vrtání koná hlavní řezný pohyb (rotační) převážně nástroj v některých případech například při vrtání na soustruhu koná obrobek. Vedlejší pohyb, kterým je posuv, provádí také nástroj a to ve směru osy nástroje.

Rozlišujeme tři základní způsoby vrtání do plného materiálu, do předvrtaných otvorů a na jádro. Hloubka záběru u způsobu vrtání do plného materiálu je dána geometrii nástroje, zejména poloměrem nástroje. Při vrtání do předvrtaných otvorů je dána rozdílem poloměrů před zahájením a po dokončení operace.

Jedním z důležitých faktorů pro proces vrtání je také změna řezné rychlosti v závislosti na vzdálenosti od osy nástroje. U osy nástroje nabývá hodnot nulových, jak je patrné z (obr. 2 b), zatímco směrem k obvodu dosahuje maximálních, proto se za řeznou rychlost obvykle uvažuje obvodová na největším průměru nástroje [8].



Obr. 2 Základní schéma procesu vrtání: a) schéma vrtání; b) přehled rozdělení rychlostí; c) schéma rozložení řezných podmínek [9]

Na vrtačkách se za řezné podmínky volí otáčky vřetena a posuv nástroje, z kterých vypočítáme potřebné rychlosti, jejich grafické znázornění se nachází na (obr. 2 c).

Řezná rychlost v_c podle vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

Kde: D je průměr obráběné díry [mm]

n jsou otáčky nástroje [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$]

Posuvová rychlost v_f podle vztahu:

$$v_f = f_n \cdot n \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

Kde: f_n je posuv nástroje na jednu otáčku [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$]

Rychlost řezného pohybu podle vztahu:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = \frac{n \cdot \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + f_n^2}}{1000} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

Dále posuv na zub f_z podle vztahu:

$$f_z = \frac{f_n}{z} \text{ [mm} \cdot \text{ot}^{-1}\text{]}$$

Kde: z je počet zubů (břitů) nástroje

2.3 Vrtání kompozitních materiálů

Vrtání je považováno za nejpoužívanější dokončovací metodu obrábění CFRP, nicméně vzhledem k anizotropním vlastnostem a již zmíněné heterogenitě materiálu skýtá v sobě mnoho úskalí, jelikož se během procesu obrábění střídá, vysoce abrazivní uhlíková vyztuž s mnohem méně tvrdou maticí. Uhlíková vyztuž vyvolá zvýšení teploty třením a s tím spojenému abrazivnímu poškození nástroje, jelikož má kompozit malou tepelnou vodivost tak většina tepla odchází nástrojem. Tím pádem dochází k závažným vadám, jako opotřebení břitu nástroje, delaminaci, podpovrchovým poškozením, otřepům a poruchy skelného přechodu. Zároveň i k nepřesnostem v průměru a kruhovitosti otvoru známé z konvenčního vrtání. Tyto defekty vyžadují speciálně navržené nástroje, které odolávají střídavému mechanickému a tepelnému zatížení, které vzniklé vady buď odstraní úplně, nebo potlačí na přípustné hodnoty [7].

V leteckém průmyslu se klade veliký důraz na technologickou preciznost, což je patrné na počtu montážních děr, které je nutné vytvořit. U menších letadel se může jednat o více než sto tisíc děr, zatímco u větších letadel se běžně dostáváme za hranici milionu. Každý z těchto otvorů musí být vyvrtán s nejvyšší možnou přesností vzhledem k bezpečnosti a soudržnosti letadla. Proto byla zaznamenána vysoká míra vyřazenosti v leteckém průmyslu, která dosahovala až 60% související se zmíněnými vadami [7].

Proces vrtání kompozitních materiálů a kovových materiálů se zásadně liší, zvláště co se týče tvorby třísky. U kovových materiálů probíhá tvorba třísky kontinuálně obvykle ve formě spirál, vznikajícím stříhem (smykem). Tyto třísky lze odstranit pomocí procesního média, která zároveň slouží pro odvod tepla z místa řezu. Naopak u kompozitní materiálů jako je CFRP dochází k odlamování a k tvorbě jemných, měkkých třísek, jelikož se obrábí i polymerní matrice tak dochází ke vzniku prachových částic a již dříve zmíněná vlastnost polymeru navlhavost taky značně ovlivní použití procesního média jak pro chlazení, tak pro odvod třísky. Vzniklý prach je pro lidské tělo závadný společně s abrazivními vlastnostmi vzniklého uhlíkového prachu na styčné plochy, jako jsou ložiska, či posuvné vedení a možný vznik zkratu důsledkem elektrické vodivosti. Proto je potřeba vzniklý prach odsávat. Pokud je zapotřebí použít procesní medium, nejčastěji se uchyluje k použití vzduchu, zatímco v ojedinělých případech pro snížení pevnosti kompozitu

v místě řezu se využívají speciální roztoky nebo samotná voda. Popřípadě se používá kryogenní chlazení, kde hraje velkou roli vysoká pořizovací cena [10, 11].

Během vrtání dochází k odebrání materiálu řadou lomů různého charakteru a nerovnoměrnému rozdělení zatížení mezi vlákna a matrici. Břity nástroje se dostávají do kontaktu s několika vrstvy různě orientovaných uhlíkových vláken, což způsobuje dynamickou změnu úhlu řezu vláken θ a tím i způsobů odvádění třísek [11].

2.3.1 Řezné podmínky

Prostřednictvím literárního průzkumu se zjistilo, že použitím nízkých rychlostí posuvů společně s vysokými řeznými rychlostmi prospívá ke snížení velikosti axiální, přítláčné síly společně s krouticím momentem, jenž jsou zodpovědné za většinu defektů převážně delaminaci. Vzhledem k tomu, že s vyšším posuvem roste průřez třísky, dochází k nárůstu řezné síly a krouticího momentu. Nicméně příliš vysoká řezná rychlost vede k zvýšení teploty v místě řezu a s tím spojené možné překročení skelného přechodu matrice. Dále bylo zjištěno, že větší opotřebením nástroje vede ke zvýšení řezných sil. Naopak nízké řezné rychlosti a nízké posuvy podporují minimalizaci opotřebením nástroje. Volba vhodných řezných podmínek se tedy stává náročnou otázkou, kde je potřeba zvolit kompromis v závislosti, který faktor pro nás bude kýžený [1, 12].

Vzhledem k heterogenitě strukturních vlastností kompozitních materiálů, popřípadě orientací nebo obsahu vláken v matrici nelze univerzálně stanovit hodnoty řezných podmínek, které by byly aplikovatelné na všechny varianty těchto materiálů. Z tohoto důvodu poskytují výrobci široké spektrum doporučených řezných podmínek, umožňující zákazníkům najít optimální nastavení pro maximální efektivitu obrobeneých otvorů, počtažmo vlastní výnosnost. Pro získání základního přehledu lze vycházet z obecně známých parametrů pro konvenční vrtání, tudíž že posuv by se měl pohybovat v rozmezí 0,05 až 1,1 mm · ot⁻¹ a řezná rychlost v rozmezí 10 až 300 m · min⁻¹. Nýbrž podle literatury jsou typické řezné rychlosti pro vrtání kompozitů CFRP s vrtáky vyrobených ze SK bez povlaku pohybují v rozmezí 40 až 60 m · min⁻¹, zatímco pro nástroje s diamantovým povlakem se doporučuje rychlost mezi 60 až 120 m · min⁻¹. Doporučený posuvu by se měl pohybovat v rozmezí 0,05 až 0,15 mm · ot⁻¹ [13].

2.3.2 Měření řezných sil

Při vrtání CFRP má řezná síla zásadní roli pro vznik poškození, specificky ovlivňuje jak kvalitu povrchu, tak rychlost opotřebení nástroje. Z tohoto důvodu je nutné analyzovat a měřit její charakteristiky, popřípadě velikost, která lze rozdělit na přítláčnou (axiální) složku síly a krouticí moment. Standardní metodou pro měření řezných sil se provádí pomocí dynamometru, založeného na principu měření deformace v soustavě stroj – nástroj - obrobek během obrábění. V průmyslové praxi se často setkáváme s piezoelektrickými dynamometry (obr. 3), které využívají piezoelektrický jev – generování elektrického náboje na povrchu krystalu při deformaci. Krystaly jsou typicky ve formě křemene nebo z materiálů na bázi titanu barnatého, Seignettovy soli a dalších. Při působení zatížení na měřící článek dochází k vzniku náboje, jehož velikost je přímo úměrná působící síle. S úbytkem zatížení se objevuje lineární snížení náboje až do úplného vymizení při absenci zatížení. Mezi další běžně využívané měřidla patří elektrické odporové dynamometry, známé jako tenzometry (obr 4.), které měří velikost deformace pomocí změny odporu snímače, Tyto změny odporu jsou specificky u tenzometrů indukované deformací vodiče nebo polovodiče, což má za následek přesné určení velikosti a směru deformace a poté sil [14].



Obr. 3 Dynamometr KISTLER pro měření složek řezných sil při vrtání [14]



Obr. 4 Systém DDU od firmy MARPOSS (rotor a stator) senzorový systém pro bezdotykové sledování rotujících a pevných držáků nástroje [15]

2.4 Volba nástroje

Při volbě nástroje musí být dodrženy následující požadavky, které jsou, tvrdost nástroje musí být vyšší než tvrdost obráběného materiálu, nástroj musí být odolný proti otěru (adheze, difuze, nárůstky...), houževnatý, chemicky stálý a musí vykazovat chemicky neutrální chování vůči obráběnému materiálu. Dále nástroj musí mít značnou pevnost v ohybu, značnou tepelnou vodivost a musí být stálý za vysokých teplot a navíc pro vrtání kompozitu je zapotřebí speciální geometrie s vysokou ostrostí břitu. V důsledku těchto vlastností se převážně vyrábějí nástroje nebo vyměnitelné břity (VBD) ze SK, popřípadě druhé dražší varianty z PKD. Nástroje z HSS (rychlořezné oceli) se téměř nevyužívají vzhledem k tomu, že se rychle opotřebovávají a špatně vedou vzniklé teplo, nicméně se dají použít vzhledem k jejich nízké pořizovací ceně, ale výsledná kvalita otvoru bude odpovídat vadám spojenými s popsányými nevýhodami [16].

2.4.1 Geometrie nástroje

Kvalita výsledného otvoru nezáleží pouze na již dříve zmíněných řezných podmínkách, ale také na geometrii a materiálu, z kterého je nástroj vyroben popřípadě na celkové tuhosti systému S-N-O-P. Kromě konvenčních spirálových vrtáků byly odborníky vyvinuty speciální tvarové nástroje, které umožňují lepší tvorbu třísky, kvalitnější povrch otvoru a menší opotřebení nástroje. Nejpoužívanější vrtací nástroje jsou schematicky znázorněny (obr. 5). Nicméně se v průmyslu upřednostňuje standartní spirálový vrták a to především kvůli tomu, že sofistikované geometrie jsou nákladné a jejich přebroušení je obtížné. V experimentální části bude použit vrták spirálový s dvojitým úhlem hrotu (obr. 5 c). Klíčovými parametry, jenž ovlivňují finální geometrie těchto nástrojů, jsou:

- 1) Poloměr řezné hrany by měl být co nejmenší, aby se minimalizovala převaha plastické deformace matrice a vláken, stejně jako převaha mechanismu dělení třísky pomocí ohybu. Příliš malý poloměr však může vést k nestabilnímu řezání a neočekávanému poškození.

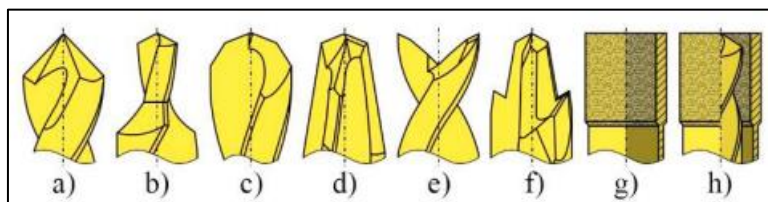
- 2) Úhel čela a hřbetu by měl být vždy kladný a zároveň co největší pro vrtání CFRP. Větší úhel hřbetu snižuje délku kontaktu, což vede k menšímu tření, nižší řezné

síle, teplotě v místě řezu a tím k menšímu opotřebení břitu. Tímto způsobem se také tvoří delší třísky, které jsou snadněji odstranitelné a produkují méně nebezpečného prachu pro lidské zdraví.

3) Úhel šroubovice nástroje by měl být co nejmenší, aby se snížila tvorba otřepů na vstupu a výstupu z otvoru. Menší úhel vede k vybočení vláken ve směru, kde jsou vlákna podepřena, a tím k jejich správnému odříznutí. Pokud je úhel příliš velký, vlákna jsou podepřena proti vybočení na okrajích otvoru, což vede k výrazné tvorbě otřepů. Nicméně příliš malý úhel často stěžuje odstranění třísek.

4) Úhel špičky by měl být také co nejmenší, aby se snížila již dříve zmíněná axiální složka řezné síly, která je zodpovědná za vznik delaminace. Příliš malý úhel však prodlužuje délku nástroje a celého vrtacího cyklu. Navíc mohou radiální složky síly na okraji otvoru odříznout vlákna.

5) Geometrie nástroje by měla být navržena, aby nejprve došlo k odříznutí kompozitu v blízkosti stěny a až poté k vytlačení odříznutého kompozitu, nikoli naopak. Tato metoda výrazně omezuje vznik delaminace [12].



Obr. 5 Pokročilé vrtací nástroje pro CFRP: a) spirálový vrták s malým úhlem hrotu; b) stupňovitý vrták; c) spirálový vrták s dvojitým úhlem hrotu; d) dýkový vrták (známý jako jednobřítý vrták); e) vrták s rybím ocasem; f) vrták typu brad & spur (svíčkový vrták); g) jádrový vrták; h) jádrový vrták s vnitřním vrtákem [12]

Například firma Sandvik Coromant nabízí celou řadu nástrojů pro vrtání CFRP, proto zde budou uvedeny jen některé. Jako jsou vrtáky CoroDrill řady 863-A1-O, 854, 856 (obr 6, 7), které jsou navrženy pro zvýšení kvality výsledného otvoru, potlačení vzniku delaminace a ořepů [17].



Obr. 6 CoroDrill 863-A1-O [17]



Obr. 7 CoroDrill 854/856 [17]

2.4.2 Materiál rezného nástroje

Výběr správného materiálu pro nástroj je klíčový. Jak již bylo zmíněno, HSS obvykle není ideální pro obrábění kompozitů. Oproti tomu slinuté karbidy na bázi WC, poskytují pomalejší opotřebení a delší udržení ostroty. Převážně díky větší tvrdosti a lepší kondukcii tepla, která je důležitá pro odvod tepla z místa řezu. Pro zlepšení vlastností se využívají povlaky převážně na bázi PKD, který zaručí nejlepší výsledky. Tento údaj potvrdil i Iliescu a další [18], kterým nástroj z karbidu s povlakem PKD umožnil obrábět 10-12 déle než nástroj bez povlaku. Kromě toho se používají i další povlaky na bázi oxidů, nitridů či karbidů, které prodlužují životnost nástroje a zlepšují jejich mechanické vlastnosti. Díky povlaku je možné dosáhnout vyšší kvality vrtaných otvorů, zejména díky snížení opotřebení. Povlaky rovněž minimalizují chemickou reaktivitu a disperzi v kontaktních plochách. Tloušťka povlaku ovlivňuje kvalitu povrchu výsledného otvoru, neboť mění poloměr rezné hrany. Povlaky se nejčastěji aplikují metodou chemického napařování (CVD) [11].

Ačkoli nástroje vyrobené z PKD mají nejdelší životnosti, v průmyslu se osvědčily spíše nástroje z karbidu. Důvodem je jejich nižší cena a srovnatelné vlastnosti, popřípadě možností povlakování PKD, který vylepšuje jejich mechanické vlastnosti.

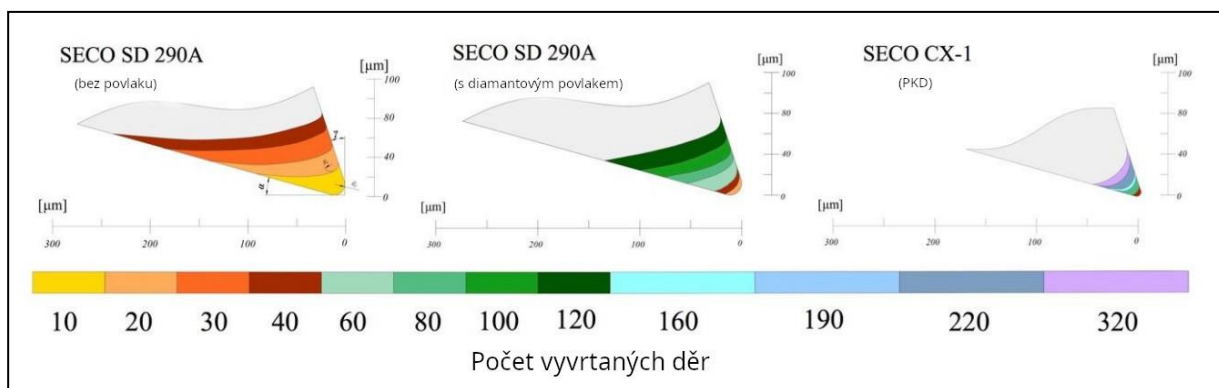
2.5 Opotřebení řezného nástroje

Životnost nástroje a kvalita obrobeného povrchu jsou hlavními ukazateli výkonnosti procesu obrábění. Jak již bylo dříve zmíněno, tyto faktory jsou ovlivněny materiálem a geometrií nástroje, stejně jako řeznými podmínkami. Je obecně známo, že míra opotřebení nástroje hraje klíčovou roli na výslednou kvalitu vyvrtaného otvoru.

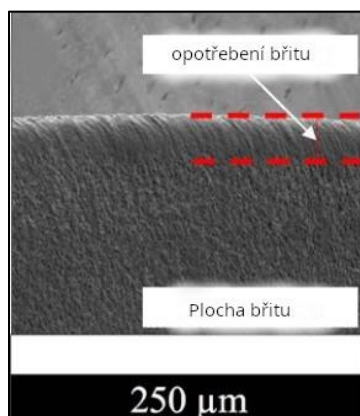
Při obrábění kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken (CFRP) se opotřebení nástrojů liší od opotřebení při konvenčním obrábění kovů. V případě kovů vede zvýšená řezná rychlost a s ní související zvýšená teplota k opotřebení způsobenému chemickým otěrem nebo difuzí. Oproti tomu při obrábění vláknových polymerních kompozitů teplota během obrábění nedosahuje hodnot, které by mohly vést k mechanismům opotřebení způsobené zvýšenou rychlostí nebo teplotou. Proto zde převládá opotřebení mechanického typu převážně abrazivního otěru, který je důsledkem abrazivní povahy vláknové výztuže. Nejčastější formy opotřebení zahrnují zaoblení hran bříty, abrazivní otěr a vylamování hran bříty [19].

Pro popis byl vybrán experiment analogický této práci, v rámci něhož byly použity tři druhy vrtáků: nástroj ze samotného slinitého karbidu, nástroje z karbidu s diamantovým povlakem aplikovaný metodou CVD a nástroje z PKD. Jako obráběný materiál sloužil CFRP s PAN vlákny s kvaziizotropní laminátovou strukturou. Míra opotřebení byla vyhodnocena s využitím 3D mikroskopu Alicona Infinite Focus, kde byly pro zvýšení vizuální názornosti vrstveny skenované profily řezné hrany CE, jak je ilustrováno na (obr. 8). Experiment byl prováděn až do okamžiku, kdy kvalita vyvrtaného otvoru již nebyla považována za přijatelnou, což lze rovněž pozorovat z obrázku a dojít k závěru, že vrták z PKD vykazoval nejvyšší kvalitu a životnosti. Bylo také potvrzeno, že nejčastějším typem opotřebení je v podobě úběru boků VB a zaoblení řezné hrany CER. K dalšímu hodnocení opotřebení lze použít i skenovací elektronový mikroskop SEM, jehož snímky jsou prezentovány na (obr. 9). Pro znázornění i posledního nejčastějšího opotře-

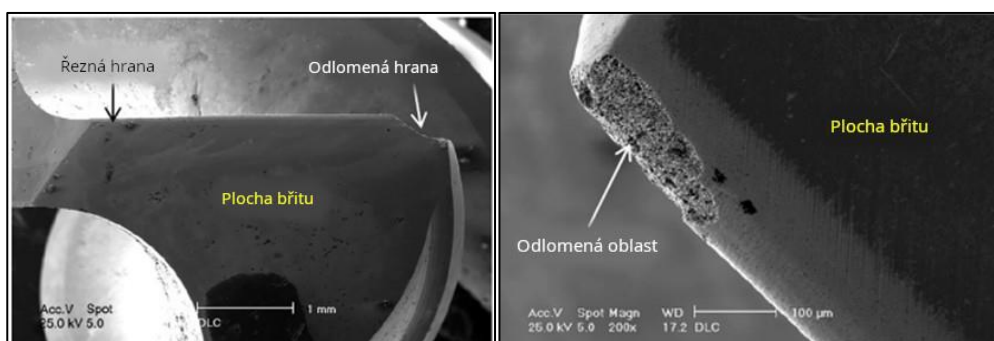
bení vylamování hran břitu slouží (obr. 10, 11). Mezi další možnosti posuzování opotře-
bení se používá Konfokální mikroskop, nebo asi nejjednodušší porovnání objemů opo-
třezení [20]



Obr. 8 Profil CE opotřezení vrtáků [20].



Obr. 9 Snímek ze SEM pro vrták Seco CX-1 (PKD) [20]



Obr. 10, 11 Snímky pořízené pomocí SEM mikroskopu pro vrták s povlakem PKD po 170 otvo-
rech [21]

2.6 Poškození způsobené vrtáním

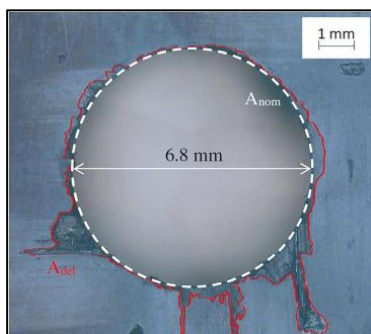
Vzhledem k dříve zmíněné heterogenitě a anizotropii, jež vedou ke špatné obrobitelnosti, lze očekávat četné vady obrábění, jako jsou delaminace, otřepy, podpovrchové poškození a tepelné poškození.

Delaminace (interlaminární lom) patří mezi nejzávažnější poškození, způsobuje výrazné zhoršení rozměrové přesnosti, kvalitu povrchu a celkové strukturální integrity. Díky těmto vadám je nejvíce zodpovědná za velkou vyřazenost hotových dílů. Její vznik je způsoben již dříve zmíněnými reznými silami, které způsobí oddělení vrstvy vláken od zbytku, dochází ke vniku tzv. prohlubně v důsledku ztráty adheze. K měření rozsahu a kvantifikaci se využívá několik nedestruktivních kontrol například delaminační faktor DF (obr. 12). Ve výzkumných studiích se lze setkat i s mikropočítačovou tomografií CT pro získání detailních informací o vnitřní struktuře. Dále slouží pro zhodnocení opotřebení elektronový mikroskop SEM [21, 22].

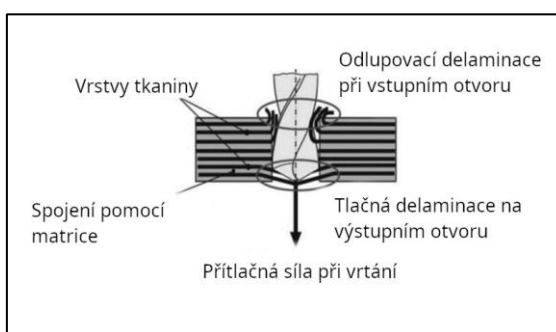
$$DF = \frac{A_{del} - A_{nom}}{A_{nom}} \cdot 100 [\%]$$

Kde A_{del} je oblast delaminace vyznačená plnou červenou čarou a A_{nom} je jmenovitá oblast vyvrtaného otvoru vyznačená čerchovanou bílou čarou (obr. 12)

Delaminaci lze rozdělit podle místa vzniku na odlupovací (Peel-up), jenž se objevuje při vstupu nástroje do materiálu podél vrtací drážky. Tato forma delaminace souvisí s geometrií nástroje a krouticím momentem, přičemž dochází k oddělování horních vrstev kompozitu a vytaháváním vláken. Naopak delaminace, která vzniká na výstupní straně tlačná (Push-down), která souvisí převážně s axiální, přitlačnou reznou silou, která se zvyšuje s rostoucím posuvem. Tato síla vytlačí vrstvy lamel z otvoru, jelikož smykové napětí překročí pevnost mezilamelové vazby. Tlačná delaminace je závažnější, jelikož nepůsobí žádná síla, která by bránila prohýbání jednotlivých vrstev. Nicméně lze omezit její vznik podepřením obrobku, což vede k menšímu ohýbání vrstev. Zvýšená teplota v místě řezu společně s opotřebením nástroje rovněž podporuje vznik delaminace. Obě formy delaminace jsou prezentovány na (obr. 13) [11]



Obr. 12 Snímek pro vyhodnocení delaminace, delaminační faktor [21]



Obr. 13 Druhy delaminací [11]

Otřepy neboli nežádoucí výstupky, jsou většinou tvořeny neřezanými vlákny, popřípadě neprořízlým materiálem matrice, nebo jejich kombinací. Vznikají při obcházení řezného nástroje a objevují se na vstupní či výstupní hraně. Mohou také vzniknout v mezivrstvách, kde se projevují jako dutiny. Na vznik otřepů má zásadní vliv geometrie nástroje, konkrétně poloměr řezné hrany. Při velkém poloměru se vlákna ohýbají a stlačují pod řeznou hranu, což vede k jejich nadměrné tvorbě. To má za následek zhoršení drsnosti povrchu obrobeneho otvoru. Tvorbu otřepů lze potlačit snížením posuvu a zvýšením rychlosti řezu, což platí pro většinu vad.

Povrchové dutiny vznikají oddělování vláken od matrice ztrátou adheze, po kterém následuje ohybem a smykem vyvolaný lom vláken. Velikost vzniklé dutiny je určena četností tvořícího lomu [11]

Při přípravě teoretické části textu byl využit program ChatGPT 4, konkrétně ve formě zlepšení návaznosti textu a vyjadřovacích schopnosti na úroveň akademické práce.

3 Metodika měření

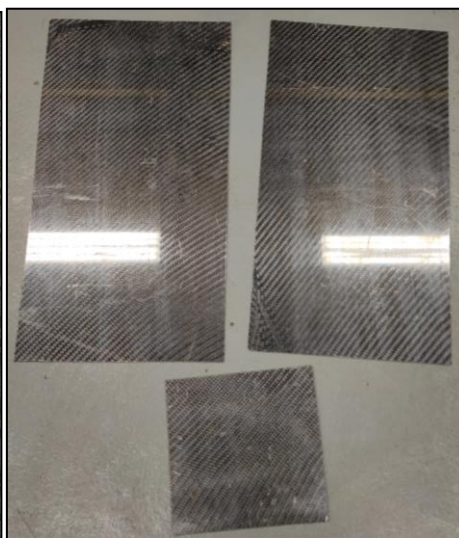
Tato kapitola bakalářské práce obsahuje informace o zkoumaných vzorcích, jejich přípravě, použitých strojích, nástrojích, měřicích zařízeních, popis jednotlivých měření a stanovených řezných podmínek, které sloužili pro celkové zpracování a vyhodnocení experimentu. Celý experiment probíhal v laboratoři Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci, i použité měřicí zařízení se nacházelo na stejném místě. Cílem experimentu bylo zjistit závislost opotřebení břitu, delaminace a řezné síly na zvolené geometrii nástroje, popřípadě řezných podmínkách.

3.1 Zkušební vzorky-CFRP

Obráběné vzorky byly vyrobeny na půdě Technické univerzitě v Liberci pomocí metody vakuové infuze, konkrétně se jedná o uhlíkovou tkaninu 24K 600 g/cm² s keprovou vazbou 2 x 2 cm. Výsledný materiál byl tvořen z matrice tvořené epoxidovou pryskyřicí LG120 od firmy GRM Systems s.r.o. a pro vytvrzení bylo použito tužidlo HG 356 od stejné firmy. Výztuž CCH600 byla zakoupena od firmy Kordkarbon a.s. Výsledné desky měly rozměry 800 x 1300 x 4 mm, proto bylo potřeba desky nařezat pomocí oscilační brusky BOSCH PMF 220 CE (obr. 14) na rozměry, které bylo možné upnout ve speciálním přípravku. Zmíněné rozměry byly 250 x 600 x 4 mm (obr. 15). Okraje nebyly použity z důvodu menší tloušťky.



Obr. 14 Příprava vzorků



Obr. 15 Zkušební vzorky

3.2 Použité obráběcí zařízení

CNC frézka CMX 600V

Veškeré obráběcí operace spojené s experimentem budou realizovány na vertikálním frézovacím centru CMX 600V od výrobce DMG MORI (obr. 16) veškeré parametry viz (tab. 1).



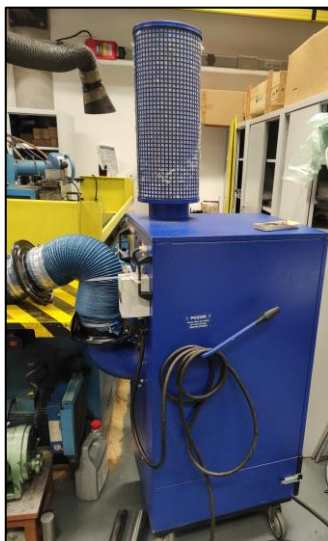
Obr. 16 Vertikální frézovací centrum CMX 600V

Tab. 1 Parametry CNC frézky CMX 600V

Vertikální frézovací centrum CMX 600V		
Charakteristika stoje	hodnota	jednotky
Pracovní zdvih podélný (x)	600	[mm]
Pracovní zdvih příčný (y)	560	[mm]
Pracovní zdvih svislý (z)	510	[mm]
Max. délka obrobku	900	[mm]
Max. šířka obrobku	560	[mm]
Max. výška obrobku	630	[mm]
Maximální zatížení stolu	600	[kg]
Max. otáčky vřetena	12 000	[ot/min]
Výkon	13	[kW]
Výkon pohonu [40/100 % zatíž.]	13.IX	[kW]
Krouticí moment [40/100 % zatíž.]	83/57	[Nm]
Typ nástrojového kužele	SK 40 BT / SK / ISO / HSK	[-]

Odsávací zařízení

Vzhledem k negativním účinkům prachu, který vzniká při vrtání, jenž má jak zdravotní, tak mechanické důsledky, bylo nezbytné použití odsávacího zařízení. Konkrétně bylo zvoleno zařízení od firmy Vzduchotechnika Chrastava s.r.o. typ POC 9-M1 (obr. 17). Toto zařízení účinně potlačí zmíněné účinky. Parametry zařízení viz (tab. 2).



Obr. 17 Kapsový odsavač POC 9-M1




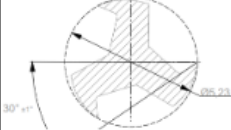
Tab. 2 Parametry odsavače POC 9-M1

Kapsový odsavač POC 9-M1		
Charakteristika stoje	hodnota	jednotky
Odsávané množství vzduchu	900	[m ³ /h]
Celkový tlak na sání	1200	[Pa]
Připojovací napětí	3 x 380/240	[V]
Frekvence	50	[Hz]
Proud (při 380 V)	1,8	[A]
Příkon elektromotoru	0,75	[kW]
Krytí elektromotoru	IP 54	[-]
Otáčky elektromotoru	2 850	[ot/min]
Hlučnost	65	[dB]
Filtrační plocha	4,5	[m ²]
Hmotnost	100	[kg]
Hustota vzduchu	1,2	[kg/m ³]

3.3 Nástroje

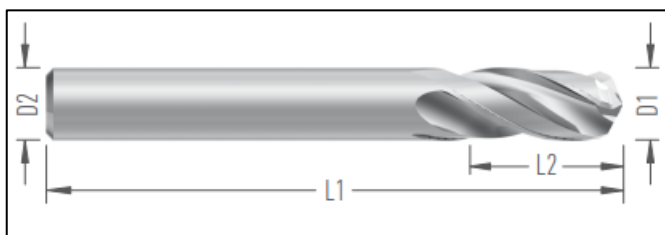
Pro realizaci experimentu byly vybrány na základě doporučení výrobce tři vrtáky podle katalogu firmy UniCut. Explicitně se jedná o nástroj Trikomp tříbřitý vrták na kompozitové desky spirálového typu, který se liší v geometrii břitu, přesněji byl dodán ve třech verzích s jinými úhly čela γ 10°, 20°, 30°. Další rozměry viz (tab. 4). Z katalogu lze rovněž vyčíst podobu třísky, která by měla mít formu prachu. Cílem je zjistit jaká geometrie, bude nejvhodnější z hlediska celkové integrity otvoru a opotřebení nástroje. Pro lepší názornost je dispozici (tab. 3), která poskytuje bližší informace pro orientaci v dalším textu.

Tab. 3 Zvolené nástroje pro plánovaný experiment

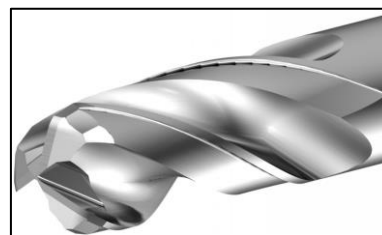
Zvolené nástroje					
Označení					
TRIKOMP V6020	Materiál	Průměr vrtáku D [mm]	Povrchová úprava	Úhel čela γ	Obr. čela
γ 10	SK GU92	6	žádná	10°	
γ 20				20°	
γ 30				30°	

Trikomp

Specifikace poskytnuté výrobcem jsou následující, jedná se, jak již bylo zmíněno o tříbřitý vrták s ultra-jemnou strukturou slinutého karbidu, který je vhodný pro produktivní obrábění přesných otvorů do kompozitových materiálů s termoplastovou i reaktoplastovou maticí s uspokojivou delaminací na výstupu i vstupu do kompozitových desek. Pro vysoce produktivní vrtání v leteckém průmyslu. Pro zlepšení představy jsou k dispozici obrázky (obr. 15,16).



Obr. 15 Trikomp V6020 základní geometrie [23]



Obr. 16 Trikomp V6020 detail [23]

Tab. 4 Rozměry Trikomp V6020

Rozměry		
	hodnota	jednotky
D1	6	[mm]
D2	6	[mm]
L1	57	[mm]
L2	12	[mm]
z	3	[-]

3.4 Řezné podmínky

Obrábění bude provedeno na stroji CMX 600V bez procesním media, pouze bude odsáván nebezpečný vzniklý prach, jak lze vyčíst z tabulky specifikace (tab. 5). Ve stejné tabulce se nachází i zvolené řezné podmínky pro celý experiment, měření bylo rozděleno na dvě různé řezné rychlosti, první byly stanoveny na základě poznatků z literatury a druhé na základě zvýšení měřených veličin na markantnější hodnoty. Řezné podmínky budou stejné pro všechny měření, to znamená pro měření opotřebení nástroje, velikosti řezné síly F a pro měření delaminace.

Tab. 5 Řezné podmínky pro měření opotřebení, řezné síly a delaminace

Parametry experimentu							
Nástroj	Počet břitů z [-]	Průměr vrtáku D [mm]	startovní		optimalizované		Procesní medium
			vc [m/min]	f [mm/ot]	vc [m/min]	f [mm/ot]	
γ 10	3	6	180	0,15	220	0,15	žádné
γ 20							
γ 30							

3.5 Měřené parametry při vrtání

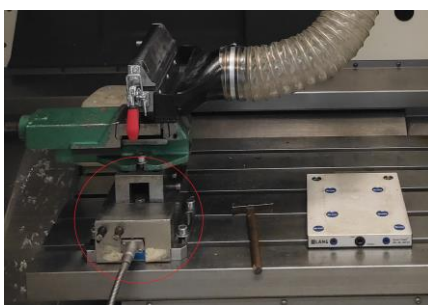
Zvolené měřené parametry byly:

- řezná síla,
- opotřebení bříty,
- delaminace,
- generovaná tříska.

Je nutné poznamenat, že veškeré parametry budou měřeny bez procesní kapaliny, pouze bude docházet k odsávání vzniklého prachu

3.5.1 Měření řezné síly

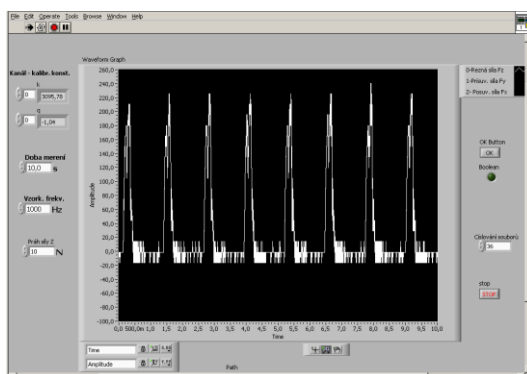
Pro získání hodnot řezné síly F byl vybrán tříoskový piezoelektrický dynamometr KISTLER typu 9265B (obr. 17). Slouží pro měření tří složek řezné síly (X , Y , Z). Vzhledem k složitosti vyhodnocení a měření všech složek řezných sil, bude měřena pouze hodnota řezné síly F_z neboli v ose z , dále se již v textu bude vyskytovat, jako řezná síla F . Princip funkce dynamometru viz kapitola 2.3.2. Získaný generovaný náboj musí být zesílen a převeden na elektrický signál pomocí nábojového zesilovače 5019B (obr. 18). Poté bude výsledný signál převeden do počítače, kde bude následně vyhodnocen v prostředí LabVIEW 6.1. Dále bude signál konvertován do grafického zobrazení působící svislé řezné síly v ose nástroje. V dalším kroku bude provedeno odečtení 5 hodnot z grafických detailů, viz (obr. 19), které budou sloužit pro statistické vyhodnocení.



Obr. 17 Dynamometr KISTLER 9265B



Obr. 18 Nábojový zesilovač



Obr. 19 Grafické znázornění řezné síly LabVIEW 6.1

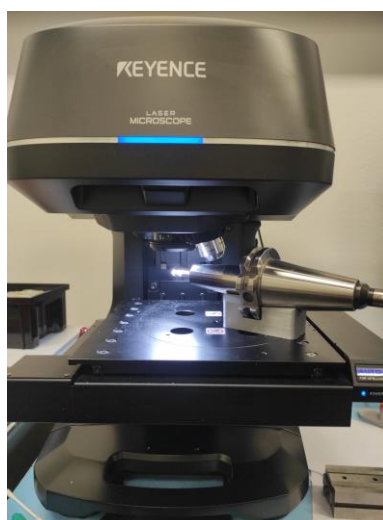
Měření bude realizováno následujícím postupem, jednotlivé nástroje budou měřeny v definovaných cyklech, během kterých se bude sledovat opotřebení nástroje až do dosažení limitní hodnoty **150 μm** , přičemž každý cyklus zahrnuje stanovený počet otvorů, který je násobkem čísla **96**. Tudíž pro každý nástroj proběhne počet měření odpovídající počtu těchto násobků **96**, dokud nebude dosaženo limitní hodnoty.

3.5.2 Měření opotřebení nástroje a delaminace

Pro měření opotřebení a delaminace byl vybrán konfokální mikroskop Keyence VK-X1000 (obr. 20), jenž je vybaven 3D laserovým profiloměrem. Součástí mikroskopu je pracovní stůl, který poskytuje plochu k měření o velikosti 50x50 mm. Celý přístroj se ovládá přes počítačové rozhraní. Měření bude probíhat po stejných cyklech jako při měření sil. Po vyvrtání cyklů bude nástroj a obráběný vzorek vyndán a poté přeměřen na mikroskopu.

Opotřebení nástroje

Mikroskop bude sloužit pro získání snímků označeného břitu, z kterých se odečte poškození ve formě opotřebení hlavního hřbetu VB. Při měření opotřebení bude využit speciální 3D tištěný přípravek, který umožní měření nástroje bez nutnosti vyjmutí z tepelného upínače (obr. 20). Jednotlivé nástroje budou proměřeny po vyvrtání cyklu, konkrétně třikrát z provedených měření se určí aritmetický průměr se statickým intervalem nejistoty měření. Pro získání uceleného pohledu na vzniklé opotřebení bude ještě provedeno 3D měření profilu břitu, které poskytne orientační přehled o poloměru zaoblení řezné hrany.



Obr. 20 Konfokální mikroskop Keyence VK-X1000

Delaminace

Pro vyhodnocení rozsahu vzniklé delaminace na povrchu zkoumaného materiálu, dojde též po vyvrtání cyklu. Vyhodnocovat se bude jak delaminace na vstupní, tak i na výstupní straně otvoru. Z každé strany otvoru budou provedeny tři měření, z kterých se jako u měření opotřebení provede statistická analýza. Pro delaminaci typu I (vyčnívající vlákna) bude měřena celková délka přečnívajících vláken. Při delaminaci typu II (vy lámování) bude zaznamenána největší vzdálenost od okraje otvoru. Při kombinaci obou typů bude měřena celková vzdálenost od kraje vylomené plochy až ke konci vyčnívajících vláken.

3.6 Tříska

Pro vyhodnocení vznikajících třísek bude odebrán vzorek prachu ulpělého na přípravku, z nástroje a materiálu, který bude dále přezkoumán, též na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X1000. Vzhledem k zdravotně škodlivým účinkům bude zkoumána velikost prachových částic.

4 Experiment

Následující kapitola se zabývá vyhodnocením získaných výsledků z měření klíčových parametrů, jenž jsou rozděleny do čtyř podkapitol. Každá z těchto podkapitol se zaměřuje na různé aspekty procesu obrábění. Konkrétně se jedná o vyhodnocení řezné síly v ose z, vzniklé opotřebení nástrojů, kvantifikaci rozsahu delaminace a charakter třísky. Pro připomenutí celé měření probíhalo bez přítomnosti procesního media, pouze bylo zajištěno odsávání vzniklého prachu.

Výsledky jsou formulovány ve formě váženého aritmetického průměru s příslušným statistickým intervalem spolehlivosti (nejistotou měření), který zajišťuje že výsledná hodnota se nachází s 95 % pravděpodobností v daném intervalu díky přenásobení příslušným studentovým koeficientem pro počet měření. Počet měření pro jednotlivé měřené parametry viz kapitola 3. Dílčí výsledky včetně tabulek a grafů byly zpracované v programu Microsoft Excel.

4.1 Řezná síla

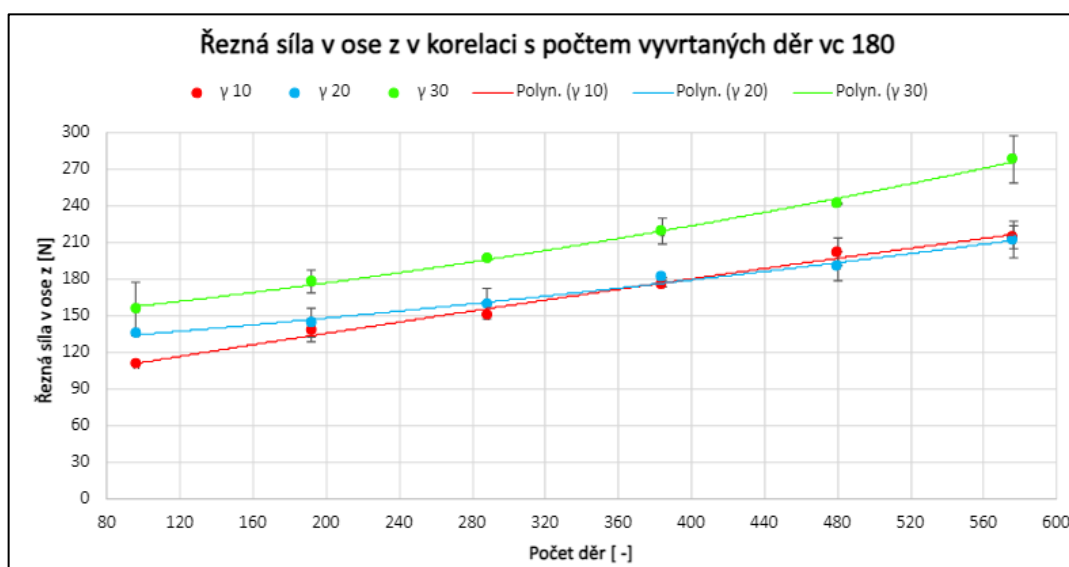
Měření probíhalo během procesu obrábění zkušební vzorku, bližší informace o zkušebních vzorcích viz kapitola 3.1. Postupovalo se dle popsaného postupu, který se nachází v kapitole 3.5.1, za předem stanovených řezných podmínek a měřila se složka řezné síly ve směru z, tudíž v ose nástroje. Pro každou řeznou rychlost byly vytvořeny příslušné tabulky a grafické znázornění závislosti. Měření bylo rozděleno na dvě části. V první je zkoumána závislost řezné síly na počtu vyvrtaných děr a v druhé na vzniklém příslušném opotřebení hlavního hřbetu.

4.1.1 Řezná síla v závislosti na počtu vyvrtaných děr

V tabulce 6 se nachází hodnoty řezné síly v závislosti na počtu vyvrtaných děr při řezné rychlosti. $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tab. 6 Naměřená řezná síla v ose z při $v_c 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na počtu vyvrtaných otvorů

Řezná síla v ose z v korelaci s počtem vyvrtaných děr $v_c 180$		
Nástroj	Počet děr [-]	Řezná síla v ose z [N] ± Nejistota měření [N]
γ 10	96	110,27 ± 0,21
	192	138,73 ± 9,29
	288	150,51 ± 0,40
	384	176,16 ± 2,17
	480	202,15 ± 11,15
	576	214,53 ± 9,37
γ 20	96	135,98 ± 0,79
	192	144,75 ± 11,41
	288	159,95 ± 12,17
	384	181,69 ± 0,16
	480	190,86 ± 12,05
	576	212,22 ± 14,87
γ 30	96	156,08 ± 21,77
	192	178,02 ± 9,72
	288	197,42 ± 1,12
	384	219,38 ± 10,49
	480	242,12 ± 0,27
	576	278,38 ± 19,34



Graf 1 Naměřená řezná síla v ose z při $v_c 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na počtu vyvrtaných otvorů

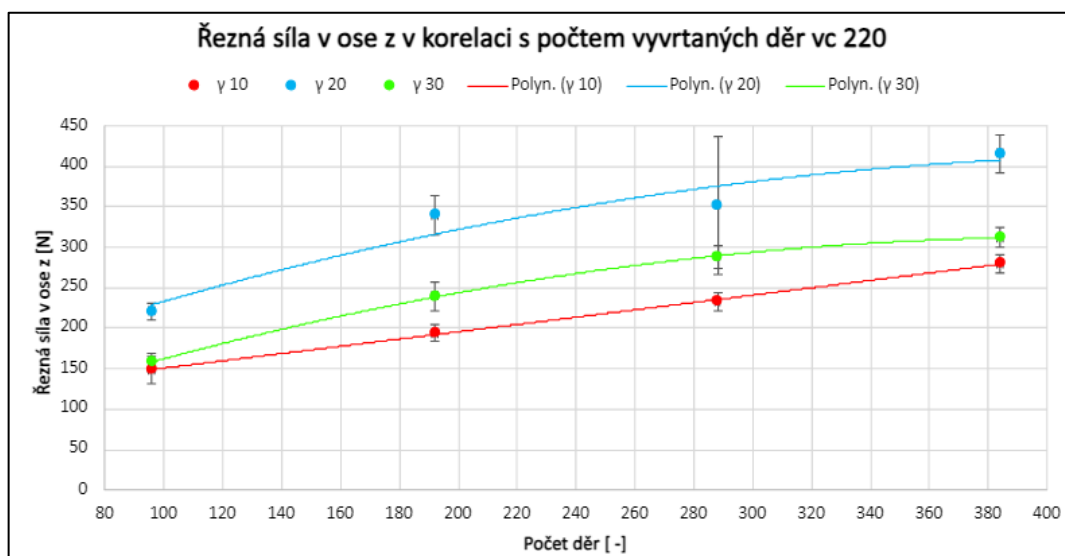
Z tab. 6 a příslušného grafu 1 lze vyčíst, téměř lineárně se zvyšující trend závislosti řezné síly s počtem vyvrtaných otvorů při řezné rychlosti $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Jednotlivé nástroje generovaly přibližně stejné zvýšení řezné síly.

Nejvyšší řezné síly $278,38 \pm 19,34$ N bylo dosaženo nástroje γ 30 při 576 vyvrtaných otvorech. Naopak nejnižší řezné síly $212,22 \pm 14,87$ N bylo dosaženo nástrojem γ 20 po 576 vyvrtaných otvorech, čili po ukončení experimentu. Velice podobnou hodnotu $214,53 \pm 9,37$ N zaznamenal i nástroj γ 10 na konci experimentu.

V tabulce 7 se nachází hodnoty řezné síly v závislosti na počtu vyvrtaných děr při řezné rychlosti $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tab. 7 Naměřená řezná síla v ose z při vc $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na počtu vyvrtaných otvorů

Řezná síla v ose z v korelaci s počtem vyvrtaných děr vc 220		
Nástroj	Počet děr [-]	Řezná síla v ose z [N] \pm Nejistota měření [N]
γ 10	96	$148,34 \pm 17,40$
	192	$194,16 \pm 9,90$
	288	$233,34 \pm 11,42$
	384	$279,92 \pm 11,64$
γ 20	96	$220,98 \pm 10,68$
	192	$339,66 \pm 24,06$
	288	$351,72 \pm 85,33$
	384	$414,54 \pm 23,40$
γ 30	96	$157,96 \pm 10,76$
	192	$239,7 \pm 17,86$
	288	$288,18 \pm 14,63$
	384	$312,08 \pm 11,70$



Graf 2 Naměřená řezná síla v ose z při vc $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na počtu vyvrtaných otvorů

Z tabulky 7 a grafu 2 pro řeznou rychlost $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, lze pozorovat téměř stejnou lineární závislosti trendu jako při řezné rychlosti $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Dále lze konstatovat zvýšení velikosti řezné síly v řádu jednotek stovek newtonů. Z toho vyplývá, že se zvyšující řeznou rychlostí dochází ke zvýšení řezné síly.

Nejvyšší řezné síly $414,54 \pm 23,40 \text{ N}$ dosáhl nástroj $\gamma 20$ při 384 vyvrtaných otvorech. Naopak nejnižší řezné síly $279,92 \pm 11,64 \text{ N}$ bylo dosaženo nástrojem $\gamma 10$ při 384 vyvrtaných otvorech.

Nejnižších hodnot řezné síly při obou řezných rychlostech zaznamenal nástroj $\gamma 10$.

4.1.2 Řezná síla v závislosti na opotřebením hlavního hřbetu

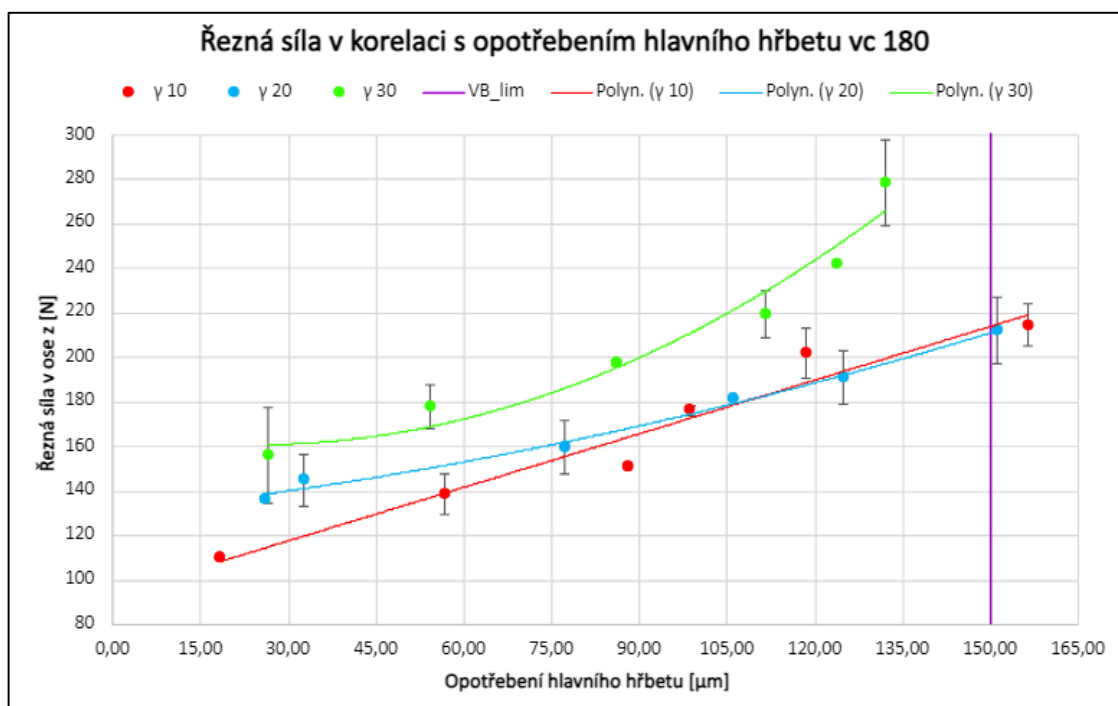
Hodnoty řezných sil a opotřebením hlavního hřbetu byly měřeny po stejných cyklech, dle metodiky, viz kapitoly 3.5.1 a 3.5.2.

V tabulce 8 jsou uvedeny hodnoty řezných sil a k nim příslušné změřené opotřebením nástroje pro řeznou rychlost $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tab. 8 Naměřená řezná síla v ose z při $vc 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na opotřebením hlavního hřbetu

Řezná síla v korelaci s opotřebením hlavního hřbetu $vc 180$		
Nástroj	Opotřebením $[\mu\text{m}] \pm$ Nejistota měření $[\mu\text{m}]$	Řezná síla v ose z $[\text{N}] \pm$ Nejistota měření $[\text{N}]$
$\gamma 10$	$18,19 \pm 7,63$	$110,27 \pm 0,21$
	$56,78 \pm 24,73$	$138,73 \pm 9,29$
	$88,01 \pm 19,50$	$150,51 \pm 0,40$
	$98,66 \pm 38,89$	$176,16 \pm 2,17$
	$118,39 \pm 14,27$	$202,15 \pm 11,15$
	$156,50 \pm 39,67$	$214,53 \pm 9,37$
$\gamma 20$	$28,88 \pm 12,47$	$135,98 \pm 0,79$
	$32,72 \pm 31,24$	$144,75 \pm 11,41$
	$77,30 \pm 12,81$	$159,95 \pm 12,17$
	$106,05 \pm 22,42$	$181,69 \pm 0,16$
	$124,90 \pm 15,22$	$190,86 \pm 12,05$
	$151,09 \pm 20,52$	$212,22 \pm 14,87$
$\gamma 30$	$26,49 \pm 6,71$	$156,08 \pm 21,77$
	$54,23 \pm 26,08$	$178,02 \pm 9,72$
	$86,10 \pm 6,41$	$197,42 \pm 1,12$
	$111,46 \pm 17,28$	$219,38 \pm 10,49$
	$123,72 \pm 30,21$	$242,12 \pm 0,27$
	$131,98 \pm 19,78$	$278,38 \pm 19,34$

Pro účely experimentu byla stanovena limitní hodnota opotřebení hlavního hřbetu $VB_{lim} = 150 \mu\text{m}$, jejímž překročením byl ukončen experiment pro daný nástroj.



Graf 3 Naměřená řezná síla v ose z při $vc 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na opotřebení hlavního hřbetu

Z příslušné tabulky 8 a grafu 3, lze konstatovat zjištění, že řezná síla postupně narůstá se zvyšujícím se opotřebením nástroje. Ze získaných hodnot rovněž vyplývá, že se zvýšením úhlu čela dochází k menšímu opotřebení řezného nástroje. Tato závislost je v souladu s odbornou literaturou.

Nejrychleji rostoucí trend zvyšování řezné rychlosti zaznamenal nástroj $\gamma 30$, kdy dosáhl maximální hodnoty řezné síly $278,38 \pm 19,34 \text{ N}$, po vyvrtání 576 otvorů, nicméně dosáhl nejmenší opotřebení nástroje $131,98 \pm 19,78 \mu\text{m}$.

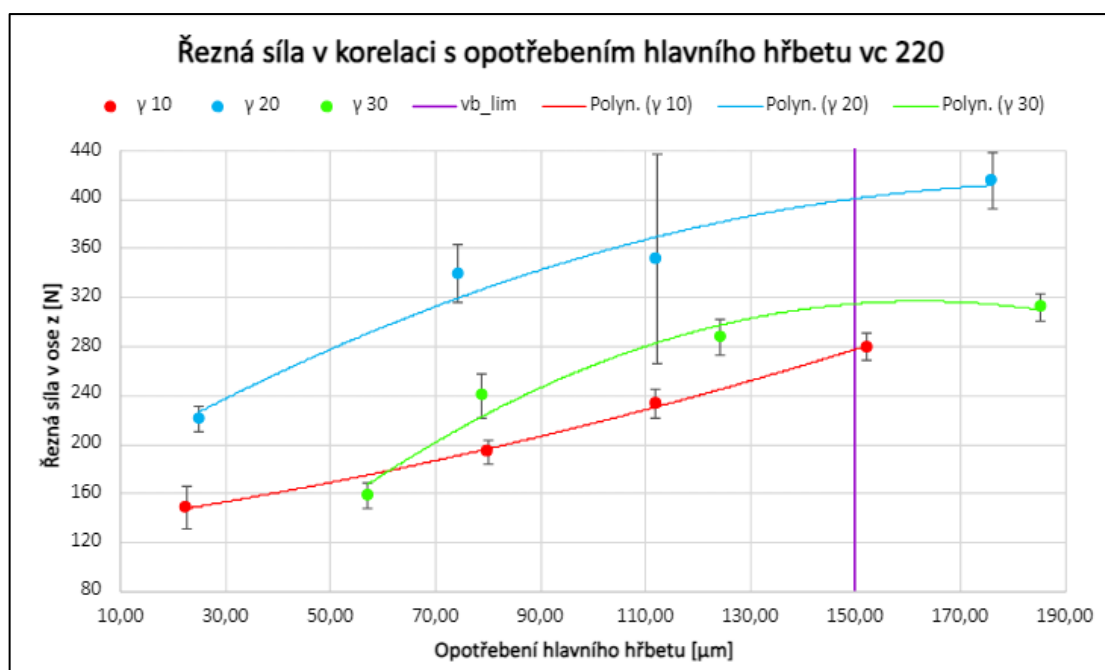
Pozvolnější stoupající trend byl zaznamenán u nástroje $\gamma 20$, s minimální hodnotou řezné síly $212,22 \pm 14,87 \text{ N}$, po ukončení experimentu, nýbrž bylo dosaženo téměř nejvyšší opotřebení nástroje $151,09 \pm 20,52 \mu\text{m}$.

Při řezné rychlosti $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ lze považovat za nejvíce vhodný nástroj $\gamma 20$ popřípadě $\gamma 10$ z hlediska nejnižší generované řezné síly.

V tabulce 9 jsou uvedeny hodnoty řezných sil a k nim příslušné změřené opotřebení nástroje pro řeznou rychlost $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tab. 9 Naměřená řezná síla v ose z při $vc 220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na opotřebení hlavního hřbetu

Řezná síla v korelaci s opotřebením hlavního hřbetu $vc 220$		
Nástroj	Opotřebení [μm] \pm Nejistota měření [μm]	Řezná síla v ose z [N] \pm Nejistota měření [N]
$\gamma 10$	$22,52 \pm 8,39$	$148,34 \pm 17,40$
	$79,89 \pm 16,08$	$194,16 \pm 9,90$
	$111,88 \pm 18,38$	$233,34 \pm 11,42$
	$152,22 \pm 16,11$	$279,92 \pm 11,64$
$\gamma 20$	$24,98 \pm 11,11$	$220,98 \pm 10,68$
	$74,35 \pm 19,32$	$339,66 \pm 24,06$
	$112,11 \pm 10,58$	$351,72 \pm 85,33$
	$176,12 \pm 47,01$	$414,54 \pm 23,40$
$\gamma 30$	$57,09 \pm 25,17$	$157,96 \pm 10,76$
	$78,78 \pm 37,64$	$239,7 \pm 17,86$
	$124,35 \pm 22,94$	$288,18 \pm 14,63$
	$185,28 \pm 10,35$	$312,08 \pm 11,70$



Graf 4 Naměřená řezná síla v ose z při $vc 220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na opotřebení hlavního hřbetu

Z výše zpracovaných hodnot je patrné, že již není prokazatelné zjištění zvyšujícího opotřebení v závislosti na zvyšujícím se úhlu čela, naopak při řezné rychlosti 220

$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ dochází spíše k opačnému trendu. Dále dochází k rapidnímu nárůstu řezné síly při zvýšení řezné rychlosti.

Nejvyšší řezné síly $414,54 \pm 23,40 \text{ N}$ bylo dosaženo nástrojem $\gamma 20$ při odpovídajícím opotřebení $176,12 \pm 47,01 \mu\text{m}$, po vyvrtání 384 otvorů.

Nejmenší řezné síly $279,92 \pm 11,64 \text{ N}$ bylo dosaženo nástrojem $\gamma 10$ při odpovídajícím opotřebení $152,22 \pm 16,11 \mu\text{m}$, jenž je zároveň i nejmenší dosažené opotřebení nástroje po vyvrtání 384 otvorů.

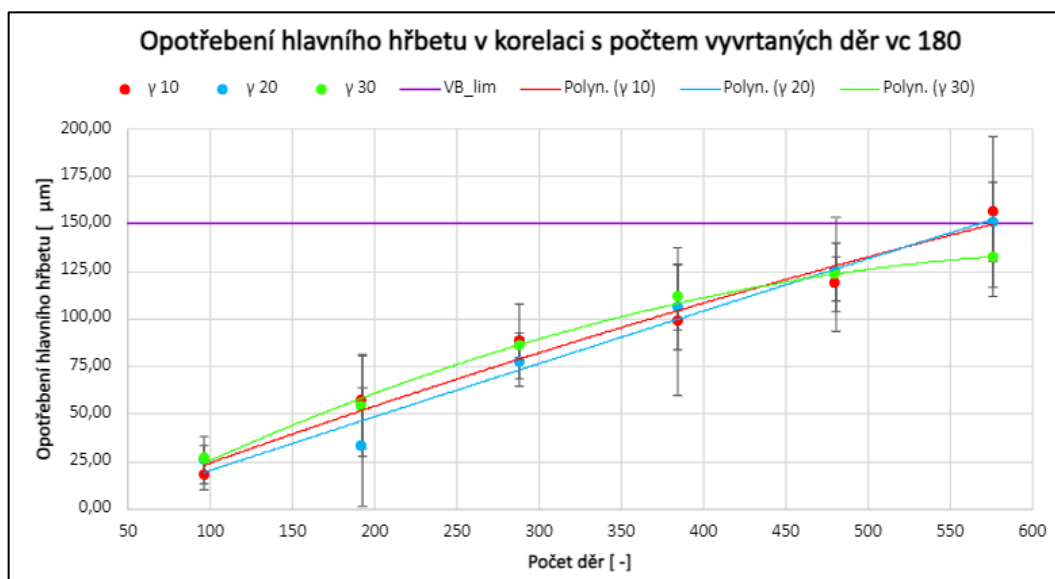
Při řezné rychlosti $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ lze považovat za nejvíce vhodný nástroj $\gamma 10$ z hlediska nejnižší generované řezné síly.

4.2 Opotřebení nástroje

Následující kapitola shrnuje dosažené výsledky z měření opotřebení nástroje pomocí postupu popsaného v kapitole 3.5.2. Stejně jako předchozí vyhodnocování bude kapitola rozdělena na dvě části. První část je zaměřena na nejčastější objevující se opotřebení nástroje neboli abrazivní oěr. V druhé části bylo orientačně vyhodnoceno zaoblení hrany, které má taktéž dosti významný vliv na kvalitu otvoru.

Tab. 10 Naměřené opotřebení hlavního hřbetu nástrojů při $v_c 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na počtu vyvrtaných otvorů

Opotřebení hlavního hřbetu v korelaci s počtem vyvrtaných děr $v_c 180$		
Nástroj	Počet děr [-]	Opotřebení [μm] \pm Nejistota měření [μm]
$\gamma 10$	96	$18,19 \pm 7,63$
	192	$56,78 \pm 24,73$
	288	$88,01 \pm 19,50$
	384	$98,66 \pm 38,89$
	480	$118,39 \pm 14,27$
	576	$156,50 \pm 39,67$
$\gamma 20$	96	$28,88 \pm 12,47$
	192	$32,72 \pm 31,24$
	288	$77,30 \pm 12,81$
	384	$106,05 \pm 22,42$
	480	$124,90 \pm 15,22$
$\gamma 30$	576	$151,09 \pm 20,52$
	96	$26,49 \pm 6,71$
	192	$54,23 \pm 26,08$
	288	$86,10 \pm 6,41$
	384	$111,46 \pm 17,28$
	480	$123,72 \pm 30,21$
	576	$131,98 \pm 19,78$



Graf 5 Naměřené opotřebení hlavního hřbetu nástrojů při $vc\ 180\ m\cdot min^{-1}$ v závislosti na počtu vyvrtaných otvorů

Z hlediska opotřebení hlavního hřbetu nástroje pro řeznou rychlost $180\ m\cdot min^{-1}$ můžeme z tabulky 10 a grafu 5 vyvodit následující. Opotřebení postupně roste s počtem vyvrtaných otvorů, téměř lineárně z pohledu trendu. Dále je patrné, že s vyšším úhlem čela klesá opotřebení nástroje.

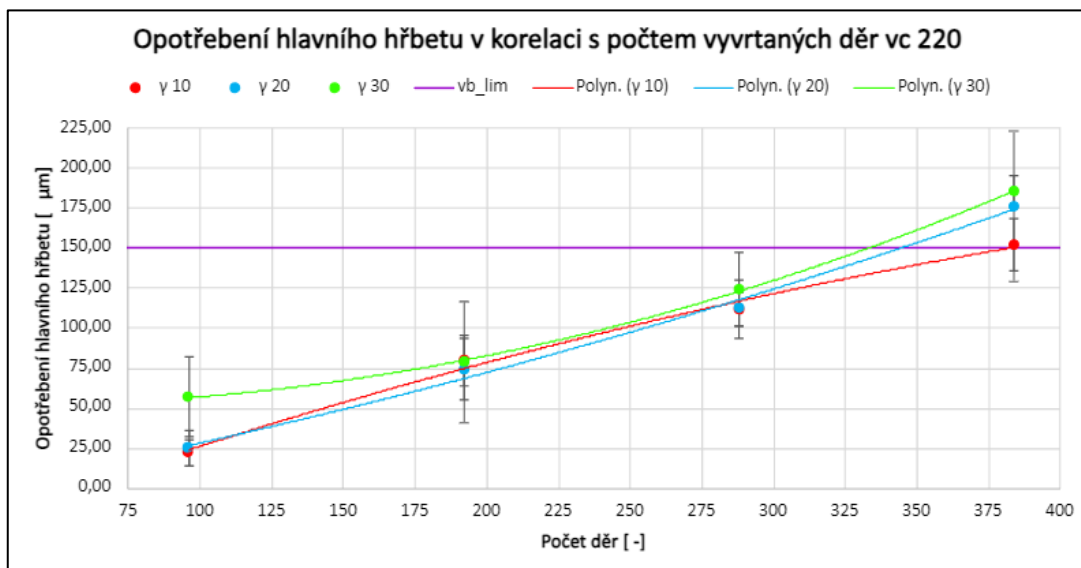
Nejvyšší opotřebení hlavního hřbetu $156,50 \pm 39,67\ \mu m$ zaznamenal nástroj $\gamma\ 10$, po ukončení experimentu.

Nejnižší opotřebení hlavního hřbetu $131,98 \pm 19,78\ \mu m$ na konci experimentu zaznamenal nástroj $\gamma\ 30$.

Z výše zjištěných výsledků lze konstatovat, že nejlépe jeví se nástrojem pro řeznou rychlost $180\ m\cdot min^{-1}$ z hlediska opotřebení hlavního hřbetu je $\gamma\ 30$.

Tab. 11 Naměřené opotřebení hlavního hřbetu nástrojů při $v_c 220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na počtu vyvrtaných otvorů

Opotřebení hlavního hřbetu v korelaci s počtem vyvrtaných děr $v_c 220$		
Nástroj	Počet děr [ks]	Opotřebení [μm] \pm Nejistota měření [μm]
$\gamma 10$	96	$22,52 \pm 8,39$
	192	$79,89 \pm 16,08$
	288	$111,88 \pm 18,38$
	384	$152,22 \pm 16,11$
$\gamma 20$	96	$24,98 \pm 11,11$
	192	$74,35 \pm 19,32$
	288	$112,11 \pm 10,58$
	384	$176,12 \pm 47,01$
$\gamma 30$	96	$57,09 \pm 25,17$
	192	$78,78 \pm 37,64$
	288	$124,35 \pm 22,94$
	384	$185,28 \pm 10,35$



Graf 6 Naměřené opotřebení hlavního hřbetu nástrojů při $v_c 220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na počtu vyvrtaných otvorů

Z příslušné tabulky 11 a grafu 6 pro řeznou rychlost $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ lze zaznamenat zcela opačný trend v opotřebení hlavního hřbetu na konci experimentu. Konkrétně, že zvyšující se úhel čela vede k většímu abrazivnímu opotřebení.



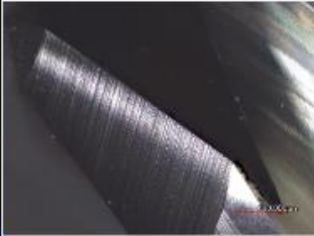
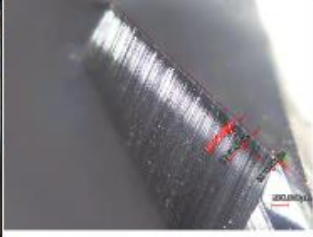


Nejvyšší opotřebení hlavního hřbetu $185,28 \pm 10,35 \mu\text{m}$ zaznamenal nástroj $\gamma 30$, po vyvrtání 384 otvorů.

Nejnižší opotřebení hlavního hřbetu $152,22 \pm 16,11 \mu\text{m}$ zaznamenal nástroj $\gamma 10$, po vyvrtání 384 otvorů.

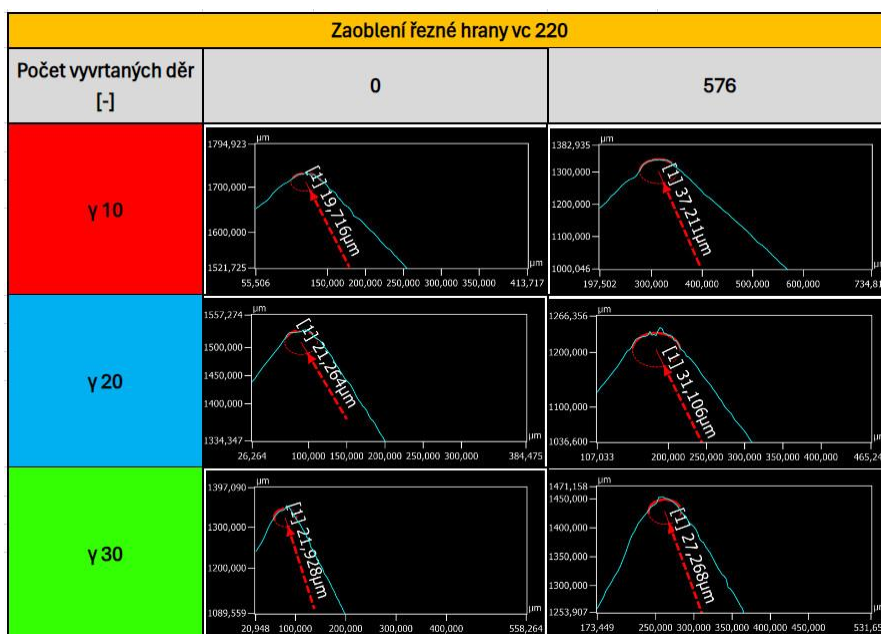
Pro řeznou rychlost $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ z aspektu opotřebení hlavního hřbetu představuje nejlepší volbu nástroj $\gamma 10$.

V tabulce 12 jsou vyobrazeny snímky z průběhu měření, které poukazují na jev, že během obrábění docházelo k opotřebení nástroje pomocí abrazivního otěru způsobeného abrazivním chováním uhlíkového vlákna.

Tab. 12 Snímky opotřebení hlavního hřbetu při $v_c 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ na začátku a na konci experimentu

Opotřebení hlavního hřbetu pro jednotlivé nástroje $v_c 180$		
Počet vyvrtaných děr [-]	0	576
$\gamma 10$		
$\gamma 20$		
$\gamma 30$		

Tab. 13 Naměřené zaoblení řezné hrany při $v_c 220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ na začátku
a na konci experimentu



Tabulka 13 prezentuje dosažené výsledky z měření zaoblení řezné hrany při řezné rychlosti $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, které slouží pro informační účely. Je možné vyvodit, že nejmenší zaoblení řezné hrany **27,268 μm** na konci experimentu bylo dosaženo nástrojem $\gamma 30$, tudíž se jeví jako nejlepší možná volba z pohledu zaoblení řezné hrany.

4.3 Delaminace

Tato kapitola poskytuje ucelený pohled na problematiku vzniklé delaminace. Měření probíhalo podle metodiky v kapitole 3.5.2. Delaminace byla měřena z obou stran obráběného vzorku, kde byly provedeny 3 měření z každé strany. Ze zmíněných měření byl vypočten vážený aritmetický průměr a nejistota měření. U nejistoty měření se vyskytují velké intervaly z důvodu přístupu k měření. Měření delaminace bylo převážně zaměřeno na vyčnívající vlákna (delaminace I) přes perimetr otvoru, tudíž nedošlo k rozdělení na delaminaci typu I a II, kde by byly druhy hodnoceny zvlášť. Výsledné hodnoty delaminace jsou proto dosti orientační, z důvodu hodnocení náhodných děr v malém rozsahu. Pro získání relevantních výsledků by bylo potřeba mnohem více měření a zaměření se zvlášť na jednotlivé druhy. Jelikož je práce zaměřena na více měřených parametrů a ne

jen na delaminaci, bylo z důvodu časové náročnosti provedeno její vyhodnocení ve zkrácené formě. Proto by bylo vhodné v budoucnu navázat na tuto práci výzkumem zaměřeným převážně na tvorbu delaminace u vrtaných otvorů a dosáhnout tak uspokojivých výsledků. Pro získání komplexního pohledu je vzniklá delaminace dána do vzájemné závislosti s opotřebením hlavního hřbetu.

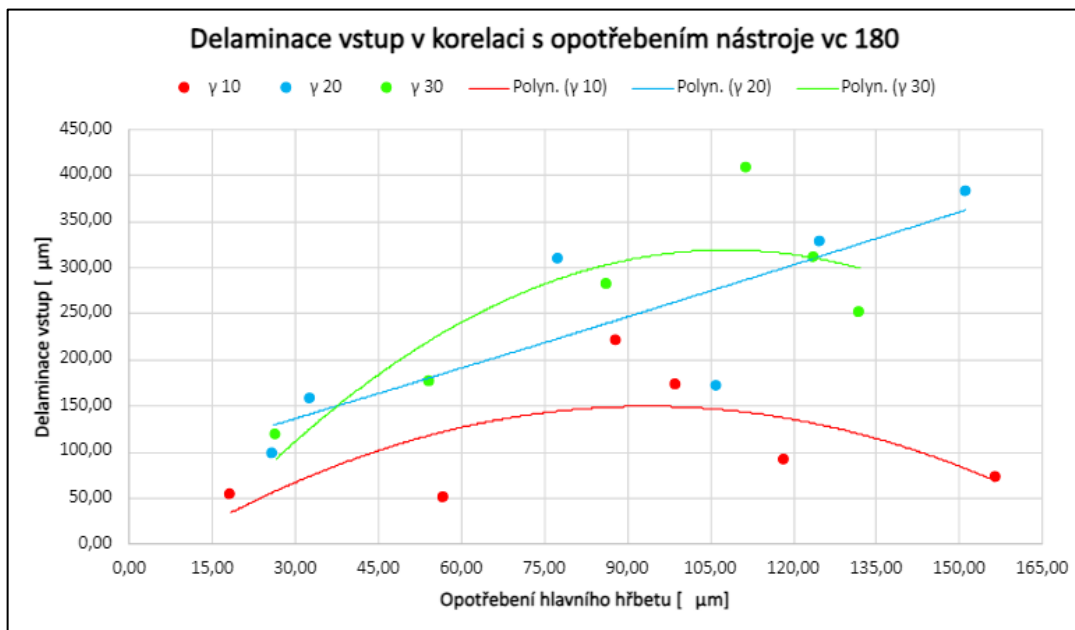
4.3.1 Rozsah delaminace v korelaci s opotřebením hlavního hřbetu

V tabulce 14 jsou zaznamenány hodnoty opotřebením hlavního hřbetu v závislosti s delaminací, která se dělí na delaminaci vstup, jenž vznikla na rozhraní otvoru, kde nástroj vstupoval do procesu obrábění a na delaminaci výstup, která naopak vznikla na rozhraní otvoru, kde nástroj vystupoval z procesu obrábění. Při rezné rychlosti $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

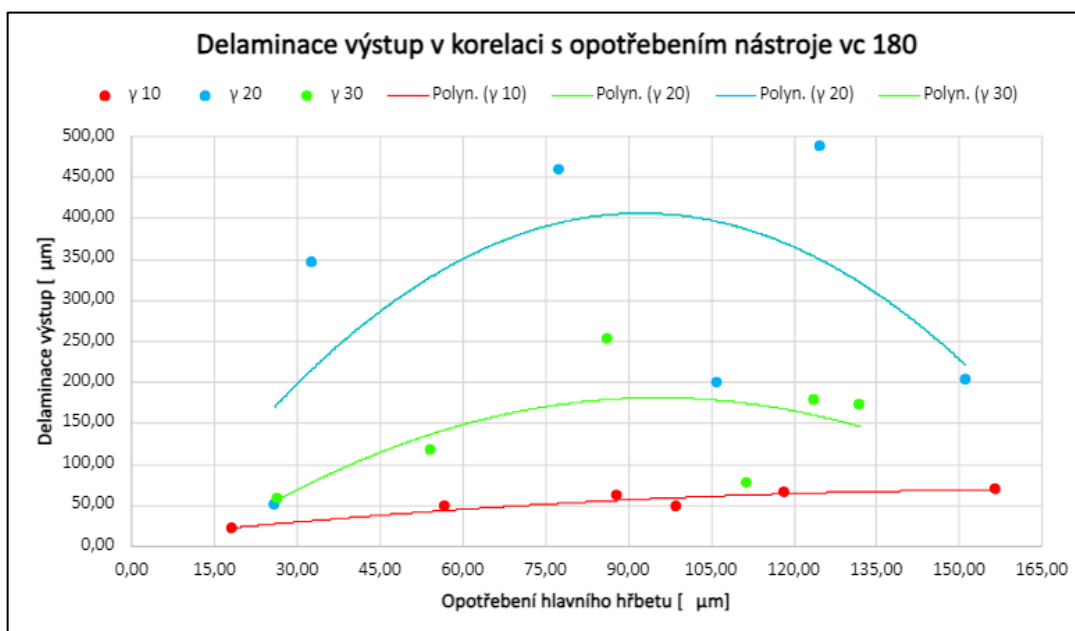
Tab. 14 Naměřený rozsah vstupní a výstupní delaminace při v_c $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na opotřebením hlavního hřbetu

Rozsah delaminace v korelaci s opotřebením nástroje v_c 180			
Nástroj	Opotřebením $[\mu\text{m}] \pm$ Nejistota měření $[\mu\text{m}]$	Delaminace vstup $[\mu\text{m}] \pm$ Nejistota měření $[\mu\text{m}]$	Delaminace výstup $[\mu\text{m}] \pm$ Nejistota měření $[\mu\text{m}]$
γ 10	18,19 ± 7,63	53,56 ± 15,37	21,17 ± 9,77
	56,78 ± 24,73	49,83 ± 11,58	47,69 ± 26,63
	88,01 ± 19,50	220,88 ± 144,02	61,74 ± 14,73
	98,66 ± 38,89	173,47 ± 76,38	49,44 ± 16,05
	118,39 ± 14,27	91,41 ± 12,26	65,97 ± 15,30
	156,50 ± 39,67	72,28 ± 19,95	69,88 ± 12,62
γ 20	28,88 ± 12,47	98,14 ± 64,58	51,02 ± 14,17
	32,72 ± 31,24	157,38 ± 76,23	346,81 ± 90,59
	77,30 ± 12,81	309,88 ± 119,47	458,52 ± 189,96
	106,05 ± 22,42	171,58 ± 66,58	199,65 ± 104,70
	124,90 ± 15,22	327,39 ± 116,48	488,05 ± 321,39
	151,09 ± 20,52	381,78 ± 87,53	203,48 ± 75,66
γ 30	26,49 ± 6,71	117,93 ± 25,19	57,81 ± 12,85
	54,23 ± 26,08	176,56 ± 58,45	116,66 ± 40,54
	86,10 ± 6,41	281,19 ± 28,81	252,03 ± 127,20
	111,46 ± 17,28	408,12 ± 48,03	76,78 ± 13,12
	123,72 ± 30,21	311,46 ± 83,06	178,68 ± 53,57
	131,98 ± 19,78	251,20 ± 34,40	171,84 ± 31,28

Vzhledem k velkému rozmezí nejistoty nebude v grafech zaznamenána.



Graf 7 Naměřený rozsah vstupní delaminace při $vc\ 180\ m \cdot min^{-1}$ v závislosti na opotřebení hlavního hřbetu



Graf 8 Naměřený rozsah výstupní delaminace při $vc\ 180\ m \cdot min^{-1}$ v závislosti na opotřebení hlavního hřbetu

Při pohledu výše na zpracované data, lze dojít ke konstatování, že se zvyšujícím se opotřebením roste společně i rozsah delaminace při řezné rychlosti $180\ m \cdot min^{-1}$. Tento

jev není zcela průkazný u všech hodnot z důvodu popsaného v kapitole 4.3. Nicméně budou vyzdvihnuty vyčnívající hodnoty. Z výsledků není úplně patrné, ale ve větším rozsahu se vyskytovala delaminace na vstupní straně. Rozpor od zmíněného tvrzení je způsoben větším zastoupením vyčnívajících vláken (delaminace I typu) na výstupní straně, které se objevovaly sporadicky, nicméně ve větších rozměrech a proto u nástroje γ 20 došlo k opačnému trendu.

Pro nástroj γ 10 byla dosažena nejvyšší delaminace na vstupní straně $220,88 \pm 144,02 \mu\text{m}$. Na straně výstupu $69,88 \pm 12,62 \mu\text{m}$

Pro nástroj γ 20 byla dosažena nejvyšší delaminace na vstupní straně $381,78 \pm 87,53 \mu\text{m}$. Na straně výstupu $488,05 \pm 321,39 \mu\text{m}$, jenž je i nejvyšší naměřená ze všech měření.

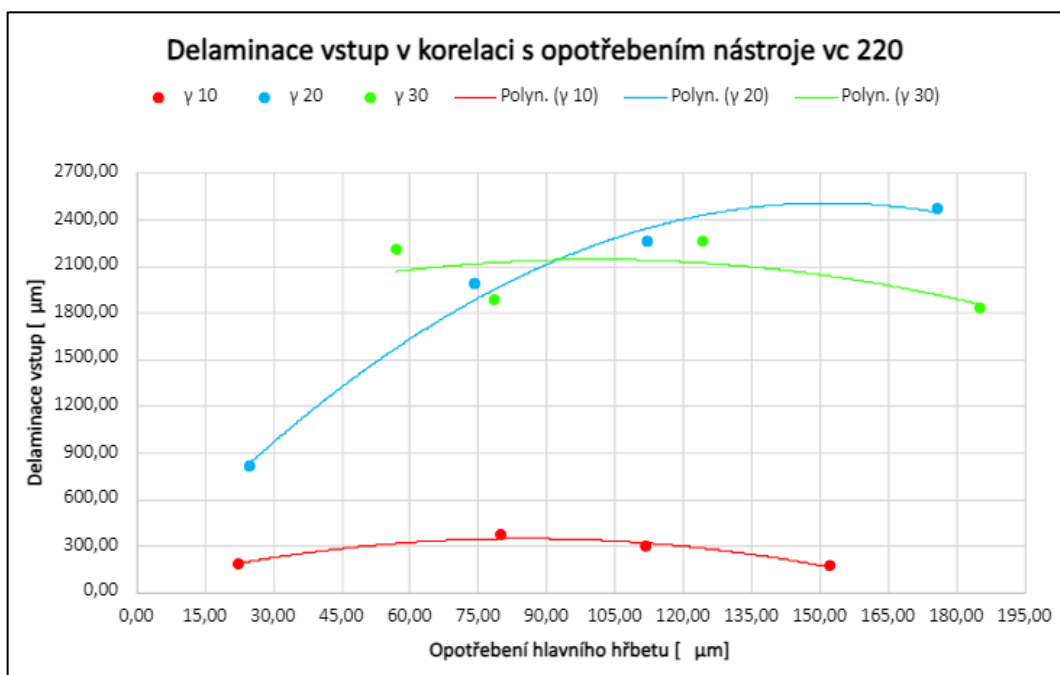
Při obrábění nástrojem γ 30 byla dosažena nejvyšší delaminace na vstupní straně $408,12 \pm 48,03 \mu\text{m}$, což je i nejvyšší pro všechny nástroje. Nejvyšší dosažená delaminace na výstupu činí $252,03 \pm 127,20 \mu\text{m}$.

Z výsledků jednoznačně vyplývá nástroj γ 10 jako optimální volba vzhledem k velmi malému rozsahu vzniklé delaminace, při řezné rychlosti $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

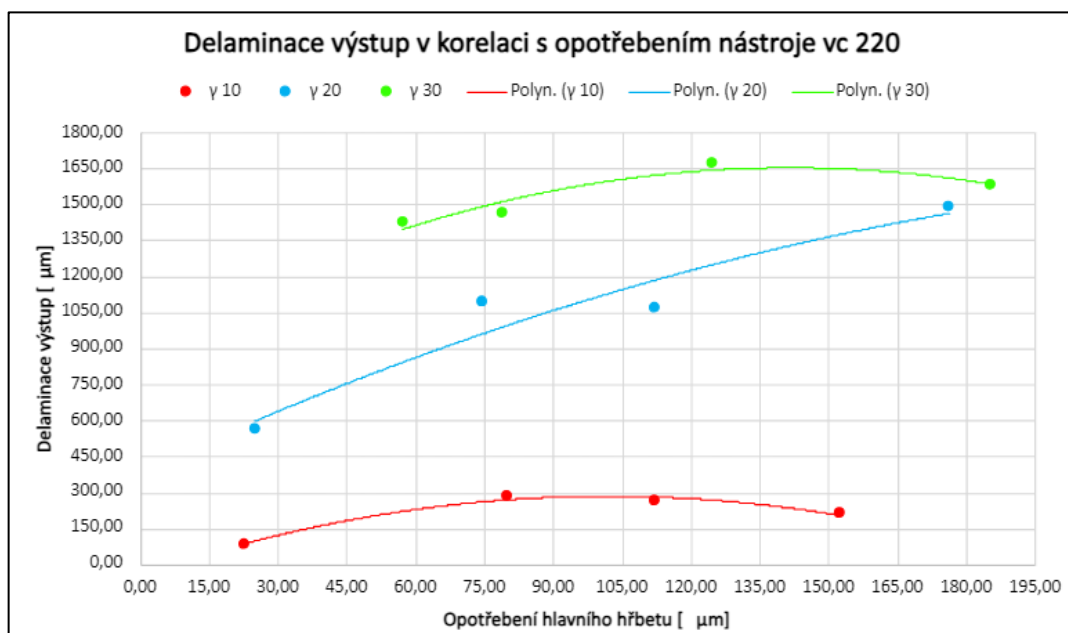
Tabulka 15 obsahuje zpracovaná data ze statické analýzy rozsahu delaminace v závislosti na opotřebení hlavního hřbetu při řezné rychlosti $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tab. 15 Naměřený rozsah vstupní a výstupní delaminace při v_c $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v závislosti na opotřebení hlavního hřbetu

Rozsah delaminace v korelaci s opotřebením nástroje v_c 220			
Nástroj	Opotřebení [μm] \pm Nejistota měření [μm]	Delaminace vstup [μm] \pm Nejistota měření [μm]	Delaminace výstup [μm] \pm Nejistota měření [μm]
γ 10	22,52 \pm 8,39	185,57 \pm 129,18	85,26 \pm 45,99
	79,89 \pm 16,08	373,72 \pm 213,40	288,20 \pm 102,53
	111,88 \pm 18,38	290,98 \pm 145,03	265,21 \pm 117,79
	152,22 \pm 16,11	173,80 \pm 126,55	212,79 \pm 110,21
γ 20	24,98 \pm 11,11	810,81 \pm 479,62	561,89 \pm 220,81
	74,35 \pm 19,32	1 980,39 \pm 825,35	1 092,80 \pm 534,67
	112,11 \pm 10,58	2 261,96 \pm 282,07	1 068,51 \pm 383,78
	176,12 \pm 47,01	2 464,37 \pm 153,69	1 489,59 \pm 370,18
γ 30	57,09 \pm 25,17	2 208,88 \pm 366,26	1 424,17 \pm 326,85
	78,78 \pm 37,64	1 878,01 \pm 560,35	1466,61 \pm 480,07
	124,35 \pm 22,94	2 263,19 \pm 499,84	1 670,39 \pm 248,45
	185,28 \pm 10,35	1 824,44 \pm 340,93	1 580,13 \pm 291,26



Graf 9 Naměřený rozsah vstupní delaminace při $vc\ 220\ m \cdot min^{-1}$ v závislosti na opotřebení hlavního hřbetu



Graf 10 Naměřený rozsah výstupní delaminace při $vc\ 220\ m \cdot min^{-1}$ v závislosti na opotřebení hlavního hřbetu

V tabulce 15 a grafech 9 a 10 jsou zpracovány hodnoty vzniklé delaminace při zvýšené řezné rychlosti $220\ m \cdot min^{-1}$. Při pohledu na výsledky lze dospět k závěru, že se zvyšující se řeznou rychlostí dochází k markantnímu nárůstu velikosti delaminace. Tento jev koresponduje s odbornou literaturou. Při zvýšené řezné rychlosti došlo ke stejnému

trendu, konkrétně k většímu rozsahu delaminace na vstupní straně. Vlivem velice vysokého zastoupení vyčnívajících vláken (delaminace typu I).

Při obrábění nástrojem γ 10 byla dosažena nejvyšší delaminace na vstupní straně $373,72 \pm 213,40 \mu\text{m}$. Na straně výstupu $288,20 \pm 102,53 \mu\text{m}$.

Pro nástroj γ 20 byla dosažena nejvyšší delaminace na vstupní straně $2\ 464,37 \pm 153,69 \mu\text{m}$, jenž je i nejvyšší naměřená ze všech měření. Na straně výstupu $1\ 489,59 \pm 370,18 \mu\text{m}$.

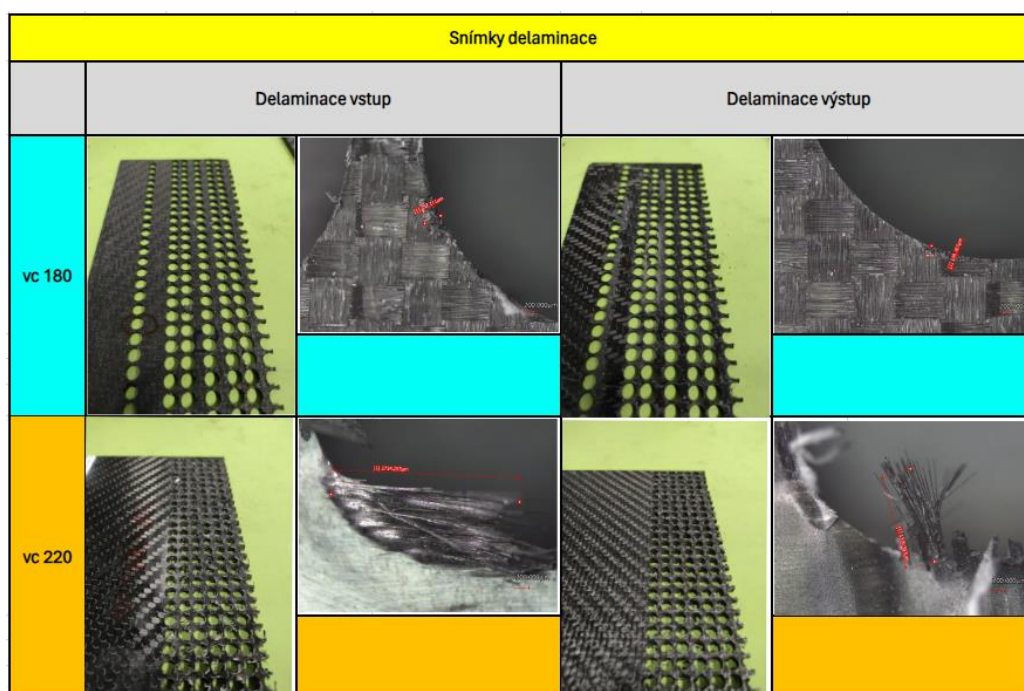
Při obrábění nástrojem γ 30 byla dosažena nejvyšší delaminace na vstupní straně $2\ 263,19 \pm 499,84 \mu\text{m}$. Nejvyšší dosažená delaminace na výstupu činí $1\ 670,39 \pm 248,45 \mu\text{m}$, jenž je i nejvyšší naměřená ze všech měření.

Stejně jako při řezné rychlosti $180 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ tak i pro $220 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ je nástroj γ 10 ideální volba.

Z perspektivy rozsahu vzniklé delaminace, jak vstupní, tak na výstupní straně, se zdá být nástroj γ 10 jednoznačně optimální volba, neboť vykazoval podstatně menší míru delaminace.

Snímky pořízené během studie rozsahu delaminace

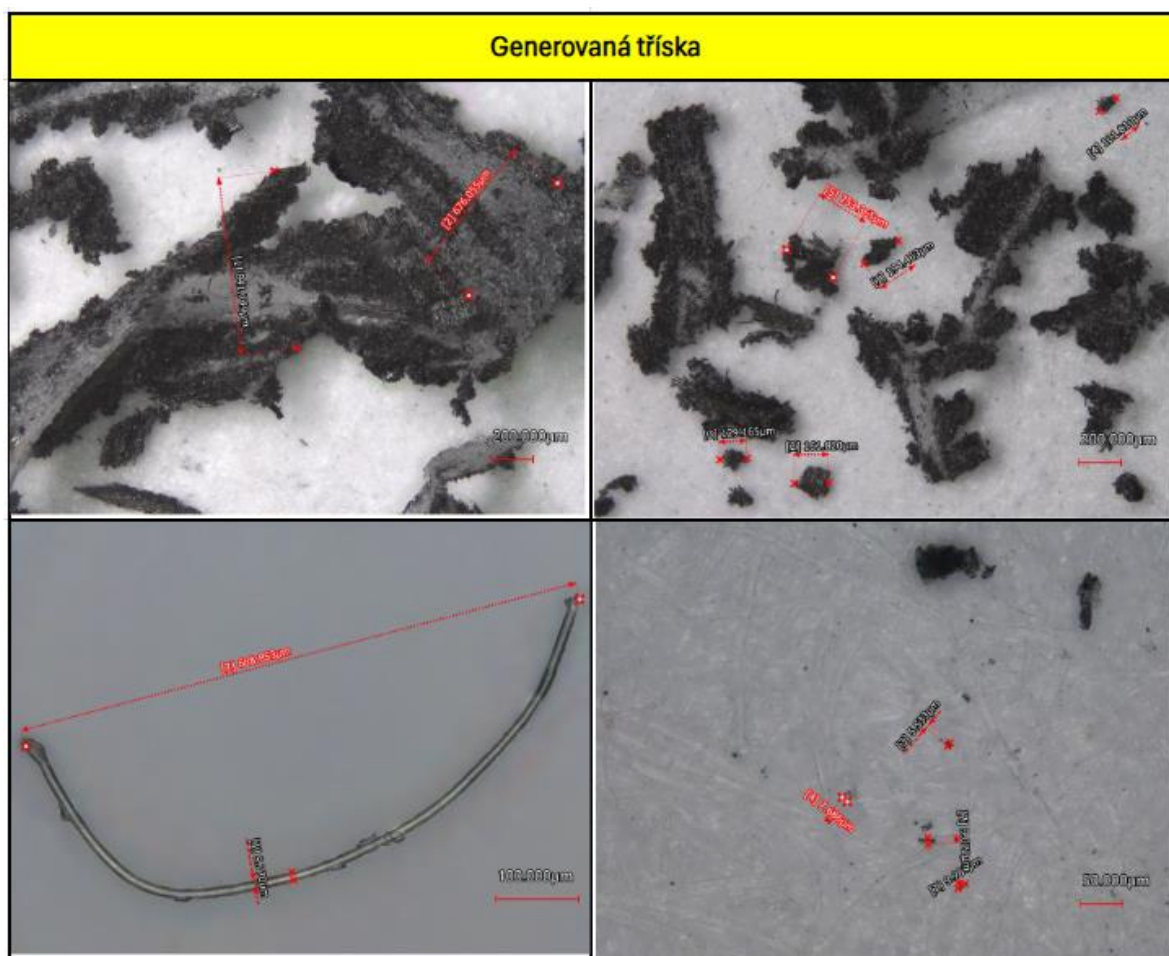
Tab. 18 Snímky pořízené ze zkoumání rozsahu vzniklé delaminace



Pro komplexní shrnutí delaminace slouží tabulka 18, obsahující snímky z procesu analýzy, a zároveň nabízí snímky celkové integrity povrchu. Při pohledu na tyto snímky lze dojít k závěru, že při použití řezné rychlosti $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo vylamování okrajů otvoru, tedy delaminace typu II, dominantním jevem, zatímco delaminace typu I, charakterizována vyčnívajícími vlákna, se vyskytovala pouze sporadicky. Nicméně žádný z těchto typů nedosáhl výrazných hodnot. Naopak při zvýšené řezné rychlosti na $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ docházelo k zcela opačnému trendu, který způsobil markantní nárůst vyčnívajících vláken. Z dostupných výsledků lze tedy usoudit, že řezná rychlost $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ není vhodná pro obrábění CFRP s použitím nástroje Trikomp, neboť klíčový ukazatel kvality integrity otvoru, tedy delaminace, přesahuje únosnou hranici. K tomuto tvrzení přispívají i zpracované tabulky a grafy.

4.4 Generovaná tříska

Tab. 18 Snímky generované třísky



Během procesu obrábění byl odebrán vzorek vzniklé třísky, jak je popsáno v kapitole 3.6, jelikož tento experiment zaměřuje svou pozornost na zkoumání jediného typu nástroje, který se liší pouze v úhlu čela. Z tohoto důvodu jeden vzorek poskytne dostatečnou vypovídající hodnotu o tvorbě třísky. Z rozboru pořízených snímků je patrné, že generovaná tříska má podobu převážně vinutého charakteru, avšak současně docházelo k tvorbě jemného prachu obsahující vlákna v rozmezí velikostí od desetin až po stovky mikrometrů. Jejich vznik byl podmíněn nedostatečnou adhezí vláken k matrici. S přibývajícím opotřebením nástroje bylo pozorováno zvýšené množství prachových částic, což bylo způsobeno otupením břitu, jenž nedokázal vlákna oddělovat smykem, a docházelo spíše k jejich drcení. Tento aspekt potvrzuje již dříve opodstatněné odsávání vzniklého prachu.

5 Vyhodnocení a diskuse výsledků

Hlavním záměrem této bakalářské práce bylo navrhnout optimální řezný nástroj z hlediska geometrie nástroje a ověřit vhodné řezné podmínky pro proces vrtání kompozitního materiálu CFRP. Konkrétně se jednalo o reaktoplast vyztužený uhlíkovými vlákny v podobě tkaniny s keprovou vazbou.

Pro získání tíženého cíle bylo nejprve nutné zvolit vhodné nástroje, které byly podrobeny experimentu k nim určit optimální řezné podmínky. Následně bylo nezbytné vytvořit komplexní metodiku, jenž měla za úkol definovat postup měření řezných sil, opotřebení břitu, vzniklé delaminace a charakteru generované třísky. Výstupem této metodiky bylo získání měřených parametrů, které následně byly podrobeny vyhodnocení, které sloužilo pro dosažení stanoveného cíle.

Pro pochopení základních návazností vrtání kompozitních materiálů typu CFRP, zejména na základu reaktoplastu vyztuženého uhlíkovými vlákny, slouží teoretická část obsažená v kapitole 2. Tato kapitola systematicky prezentuje poznatky o kompozitních materiálech (podkapitola 2.1), dále základní informace o procesu konvenčního vrtání (podkapitola 2.2). Následují informace o problematice vrtání kompozitních materiálů, včetně volby optimálních řezných podmínek a měření řezných sil (podkapitola 2.3). Nedílnou součástí teoretické části je správná volba řezného nástroje, zahrnující druh materiálu a zkoumanou vhodnou geometrii řezného nástroje (podkapitola 2.4). Poslední část se zaměřuje na defekty způsobené obráběním, jako je opotřebení nástroje a celková integrita vzniklého otvoru (podkapitoly 2.5 a 2.6).

Jak již bylo dříve zmíněno pro dosažení stanoveného cíle byla zapotřebí metodika, jenž je součástí kapitoly 3. Nezbytnou její součástí je příprava vzorků, popis použitých obráběcích potažmo měřících zařízení, včetně použitých nástrojů. Zvolené řezné podmínky a způsob provádění experimentu i jeho vyhodnocení.

Z výsledků zpracovaného měření obsaženého v kapitole 4 vzniklo následující shrnutí:

Řezná síla

Řezná síla v ose nástroje byla měřena pomocí piezoelektrického dynamometru KISTLER. Způsob měření a vyhodnocení viz kapitola 3.5.2. Presentované výsledky budou vztaženy po ukončení experimentu, což znamená pro řeznou rychlost $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ po **576 vyvrtaných otvorech** a pro řeznou rychlost $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ po **384 otvorech**, jelikož obsahují nejvyšší hodnoty zaznamenaných řezných sil. Posuv $0,15 \text{ mm/ot}$ byl u všech nástrojů stejný, lišila se pouze řezná rychlost. V druhé části vyhodnocení řezné síly byla zkoumána závislosti s opotřebením hlavního hřbetu se zmíněnou silou, proto se hodnoty opotřebení objeví též u výsledků.

Nejvyšší řezné síly v ose nástroje (ose z) při řezné rychlosti $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo dosaženo nástrojem γ 30. Hodnota síly činila $278,38 \pm 19,34 \text{ N}$, ovšem taktéž zaznamenal nejnižší opotřebením hlavního hřbetu $131,98 \pm 19,78 \mu\text{m}$.

Nejnižší řezné síly v ose nástroje (ose z) při řezné rychlosti $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo dosaženo nástrojem γ 20. Hodnota síly činila $212,22 \pm 14,87 \text{ N}$, nicméně velmi podobnou hodnotu $214,53 \pm 9,37 \text{ N}$ zaznamenal i nástroj γ 10. Tento trend pokračoval i u opotřebením hlavního hřbetu, kde u výsledných hodnot došlo taktéž k výrazné podobnosti, konkrétně $151,09 \pm 20,52 \mu\text{m}$ pro nástroj γ 20 a $156,50 \pm 39,67 \mu\text{m}$ pro nástroj γ 10.

Nejvyšší řezné síly v ose nástroje (ose z) při řezné rychlosti $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo dosaženo nástrojem γ 20. Hodnota síly činila $414,54 \pm 23,40 \text{ N}$, s příslušným opotřebením hlavního hřbetu $176,12 \pm 47,01 \mu\text{m}$.

Nejnižší řezné síly v ose nástroje (ose z) při řezné rychlosti $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo dosaženo nástrojem γ 10. Hodnota síly činila $279,92 \pm 11,64 \text{ N}$, zároveň bylo zaznamenáno **nejnižší** opotřebením hlavního hřbetu $152,22 \pm 16,11 \mu\text{m}$.

Z výše dostupných hodnot jednoznačně vyplývá, že se **zvyšující řeznou rychlostí** dochází k výraznému **navýšení řezné síly** společně se **zvýšením opotřebením nástroje**. Tento jev je možné vysvětlit zvýšením řezného odporu či tření mezi materiálem a nástrojem, jenž mohou mít tento následek. Za zmínku stojí i fakt, že nejvyšší dosažená hodnota velikosti řezné síly neznamenal ani pro jednu rychlost **nejvyšší opotřebením**. Z hlediska velikosti řezné síly vyplývá nástroj γ 10 jako nejvhodnější, jelikož dosahoval nejlepších parametrů.

Opotřebení břitu nástroje

Měření opotřebení řezného nástroje bylo převážně zaměřeno na vzniklé **abrazivní opotřebení na hlavním hřbetu**. Pro získání orientačního přehledu sloužilo měření poloměru zaoblení řezné hrany. Obě měření probíhaly na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X1000, postup měření je podrobně popsán v kapitole 3.5.2. Prezentované závěry budou též staženy na hodnoty po ukončení experimentu, stejně jako u řezné síly. Rozdílné počty vyvrtaných otvorů jsou důsledkem nastavení limitního opotřebení na **150 μm** , jehož překročení vedlo k ukončení experimentu.

Nejvyšší hodnotu opotřebení hlavního hřbetu při řezné rychlosti **180 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** znamenal nástroj γ 10. Jednalo se o hodnotu **156,50 \pm 39,67 μm** . Velmi podobná hodnota byla registrována i u nástroje γ 20, konkrétně **151,09 \pm 20,52 μm** .

Nejnižší hodnotu opotřebení hlavního hřbetu při řezné rychlosti **180 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** znamenal nástroj γ 30. Jednalo se o hodnotu **131,98 \pm 19,78 μm** .

Nejvyšší hodnotu opotřebení hlavního hřbetu při řezné rychlosti **220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** znamenal nástroj γ 30. Jednalo se o hodnotu **185,28 \pm 10,35 μm** . Za zmínku stojí i opotřebení nástroje γ 20, jenž činí **176,12 \pm 47,01 μm** a je velmi blízko nejvyššímu.

Nejnižší hodnotu opotřebení hlavního hřbetu při řezné rychlosti **220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** znamenal nástroj γ 10. Jednalo se o hodnotu **152,22 \pm 16,11 μm** .

Největší poloměr zaoblení řezné hrany **37,211 μm** bylo dosaženo nástrojem γ 10, při řezné rychlosti **220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** .

Nejmenší poloměr zaoblení řezné hrany **27,268 μm** bylo dosaženo nástrojem γ 30, při řezné rychlosti **220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** .

Závěry vyplývající z uvedených výsledků jsou následující: **Opotřebení hlavního hřbetu postupně narůstá s počtem vyvrtaných otvorů**. Dále je zaznamenáno zajímavé zjištění, že při řezné rychlosti **180 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** dochází k **poklesu** abrazivní **opotřebení** hlavního hřbetu s **rostoucím úhlem čela**. Naopak, při řezné rychlosti **220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** dochází ke **zvýšení opotřebení** s **rostoucím úhlem čela**. **Zvyšující řezná rychlost** vede k markantnímu **nárůstu opotřebení**, díky němuž bylo pro docílení limitního opotřebení již po **384 otvorech**.

Delaminace

Rozsah vzniklé delaminace byl měřen pomocí konfokálního mikroskopu Keyence VK-X1000, měření bylo prováděno po stejných cyklech, jež byly stanoveny násobky 96, k ukončení experimentu došlo dosažením hodnoty opotřebení nástroje **150 μm** , viz kapitola 3.5.2. Rozsah delaminace se vyhodnocoval na vstupní i výstupní straně otvoru, z nichž vyšly následující výsledky, které budou zastoupeny největším rozměrem delaminace pro daný nástroj z obou stran.

Během obrábění řezným nástrojem γ 10 při řezné rychlosti **180 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** , byla dosažena **nejvyšší** delaminace na **vstupní** straně **220,88 \pm 144,02 μm** , naproti tomu na **výstupní** straně **69,88 \pm 12,62 μm** .

Během obrábění řezným nástrojem γ 20 při řezné rychlosti **180 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** , byla dosažena **nejvyšší** delaminace na **vstupní** straně **381,78 \pm 87,53 μm** , naproti tomu na **výstupní** straně **488,05 \pm 321,39 μm** , jež je i nejvyšší naměřená ze všech měření.

Během obrábění řezným nástrojem γ 30 při řezné rychlosti **180 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** , byla dosažena **nejvyšší** delaminace na **vstupní** straně **408,12 \pm 48,03 μm** , což je i nejvyšší pro všechny nástroje, naproti tomu na **výstupní** straně **252,03 \pm 127,20 μm** .

Během obrábění řezným nástrojem γ 10 při řezné rychlosti **220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** , byla dosažena **nejvyšší** delaminace na **vstupní** straně **373,72 \pm 213,40 μm** , naproti tomu na **výstupní** straně **288,20 \pm 102,53 μm** .

Během obrábění řezným nástrojem γ 20 při řezné rychlosti **220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** , byla dosažena **nejvyšší** delaminace na **vstupní** straně **2 464,37 \pm 153,69 μm** , jež je i nejvyšší naměřená ze všech měření, naproti tomu na **výstupní** straně **1 489,59 \pm 370,18 μm** .

Během obrábění řezným nástrojem γ 30 při řezné rychlosti **220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$** , byla dosažena **nejvyšší** delaminace na **vstupní** straně **2 263,19 \pm 499,84 μm** , naproti tomu na **výstupní** straně **1 670,39 \pm 248,45 μm** , jež je i nejvyšší naměřená ze všech měření.

Vzhledem k tomu, že delaminace byla měřena pouze u otvorů, které vůbec nějakou delaminaci obsahovaly, není úplně relevantní připisovat k nejvyššímu rozsahu delaminace příslušné opotřebení nástroje. Prakticky se pohybovala v určitých mezích. Nicméně lze jednoznačně konstatovat, že vstupní delaminace při obou rychlostech byla

více zastoupena než delaminace na výstupní straně. Navíc zvýšení rychlosti na $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ vede k markantnímu nárůstu delaminace, kde došlo k velice vysokému zastoupení vyčnívajících vláken (delaminace typu I). Tento nárůst je spojený se zvýšením velikosti řezné síly a opotřebení, jenž mají za následek zvýšení odporu, popřípadě s tím spojené zvýšení teploty, či vibrací nástroje. Další důvod spojený s opotřebením je nedostatečná ostrost břitu. V důsledku toho nedokázal břit přerušit vlákna, která poté vyčnívaly z perimetru otvoru. Pro nástroj γ 20 při řezné rychlosti $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je důvod rozporu popsán v kapitole 4.3.1.

Z výsledků jasně vyplývá, že nástroj γ 10 představuje optimální volbu vzhledem k minimálnímu rozsahu vzniklé delaminace při obou řezných rychlostech.

Generovaná tříška

Struktura generované třísky byla zkoumána na konfokálním mikroskopu Keyence VK-X1000, dle postupu uvedeného v kapitole 3.6. Ze zmíněného zkoumání se vyvodily tyto závěry.

Z provedeného měření vyplynulo, že zkoumaný vzorek třísky vytvořené při obrábění nástrojem Trikomp má charakter vinuté struktury, ve které je zastoupen jemný prach obsahující nadrcené částice epoxidové pryskyřice s uhlíkovými vlákny. Velikost zkoumaného prachu s vlákny se pohybovala v rozmezí desetin až stovek mikrometrů. Vznik částic byl způsoben drcením materiálu pomocí nástroje, zatímco výskyt vláken byl podmíněn nedostatečnou adhezí vláken k matrici. Dále byl pozorován zvýšený výskyt prachových částic, který byl způsoben zvyšujícím se opotřebením řezného nástroje. Otupený břit nástroje nedokázal vlákna oddělovat smykem a docházel spíše k jejich drcení.

6 Závěr

Předkládaná bakalářská práce na téma **“Vliv změny řezných podmínek na průvodní jevy při vrtání kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken.** “. Přináší ucelený pohled na problematiku vrtání kompozitních materiálu na bázi CFRP. Práce byla segmentována do třech hlavních částí

V teoretické části (kapitola 2.) jsou obsaženy informace o kompozitních materiálech, základním principu vrtání, společně s poznatky o vrtání kompozitů. Dále stanovení vhodných řezných podmínek a nástrojů. Nedílnou součástí teoretické části je popis možných metod vyhodnocení řezných sil, opotřebení řezného nástroje a rozsahu vzniklé delaminace.

Druhá část neboli metodika (kapitola 3) se zabývá návrhem provedení experimentu. Nezbytnou součástí je příprava vzorků, detailní popis použitých obráběcích potažmo měřících zařízení, zvolené řezné podmínky a způsob provádění experimentu včetně vyhodnocení.

V poslední třetí části (kapitola 4) je pozornost věnována samotnému experimentu. Vyhodnocení naměřených klíčových parametrů, pomocí tabulek a příslušných grafů, které výsledné hodnoty přiblíží do přehlednější formy. Součástí třetí části je neodmyslitelně diskuze a závěr, které shrnout dosažené závěry (kapitoly 5 a 6).

1. Při obrábění kompozitního materiálu s reaktoplastickou maticí vyztuženou uhlíkovým dochází zvyšující se řeznou rychlostí k výraznému nárůstu řezné síly. Nejlepších výsledků jak pro řeznou rychlost 180, tak 220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ vykazoval nástroj γ 10. Zároveň zvýšený úhel čela vedl ke zvýšení řezných sil.
2. Opotřebení hlavního hřbetu mělo povahu abrazivního otěru. Pro řeznou rychlost 180 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ bylo nejmenší opotřebení zaznamenáno u nástroje γ 30. Naopak pro řeznou rychlost 220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ u nástroje γ 10, nicméně nejmenší zaoblené řezné hrany vykazoval opět γ 30. Rostoucí úhel čela u řezné rychlosti 180 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ vedl k poklesu opotřebení, naopak u řezné rychlosti 220 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ vedl k růstu. Dále zvýšení řezné rychlosti vedlo k markantnímu nárůstu opotřebení.

3. Z perspektivy delaminace se ve větším rozsahu vyskytovala delaminace na vstupní straně otvoru než na výstupní a to jak pro řeznou rychlost $180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, tak $220 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Při zvýšené rychlosti docházelo k markantnímu nárůstu delaminace, převážně delaminace typu I na hodnoty, které již překračují přijatelnou hranici. Z dosažených výsledků jednoznačně vykazoval nejmenší hodnoty delaminace pro obě řezné rychlosti nástroj $\gamma 10$.
4. Během procesu vrtání dochází ke vzniku velkého množství prachových částic, které mají negativní vliv na zdraví člověka, zároveň abrazivní povaha vzniklého uhlíkového prachu může vést k mechanickému opotřebení zařízení, popřípadě ke zkratu vlivem vysoké vodivosti uhlíkových vláken. Proto byla potvrzena potřeba vzniklý prach odsávat.

I přes skutečnost, že nástroj označený jako $\gamma 10$ (Trikomp s úhlem čela 10°) vykazoval nejvyšší opotřebení při řezné rychlosti 180 m/min nemění nic na faktu, že ve všech ostatních parametrech dosáhl nejlepších hodnot. Proto se nástroj $\gamma 10$ jako nejvhodnější volba. **Při doporučených řezných podmínkách pro vrtání reaktoplastů plněných uhlíkovými vlákny: $f = 0,15 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.**

Použitá literatura

- [1] Aamir, Muhammad, Majid Tolouei-Rad, Khaled Giasin, a Ataollah Nosrati. „Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: A review". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 105 (2019): 2289–2308.
- [2] KORŮNEK, Zdeněk. *Kompozity*. Webové sídlo. Online [2016]. Archivní kopie dostupná z: Internet Archive (distributor), https://web.archive.org/web/202400000000000*/https://kompozity.webnode.cz/
- [3] Havel composites. *Technologie výroby kompozitů*. Online 2024. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf>.
- [4] Xu, Jinyang, Youkang Yin, J. Paulo Davim, Linfeng Li, Min Ji, Norbert Geier, a Ming Chen. „A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites". *Composite Structures* 294 (15. srpen 2022): 115594. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115594>.
- [5] Oneindustry. *Uhlíkové vlákno*. Online [2019]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/uhlikove-vlakno/>
- [6] LeBlanc, James, Paul Cavallaro, Jahn Torres, David Ponte, Eric Warner, Irine Chenwi, a Arun Shukla. „Effects of water saturation and low temperature coupling on the mechanical behavior of carbon and E-Glass epoxy laminates". *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 4, č. 3 (1. září 2021): 358–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.05.001>.
- [7] Altin Karataş, Meltem, a Hasan Gökkaya. „A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials". *Composite Materials in Defence Technology* 14, č. 4 (1. srpen 2018): 318–26. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>.
- [8] HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění – 2. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. Online 2004. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-2cast.pdf

- [9] Sandvik Coromant. *TechnicalGuide*. Online 2011. Dostupné z https://theengineer.markallengroup.com/production/content/uploads/2011/10/MTG_E.pdf
- [10] SÝKORA, Radek. *Obrábění kompozitních materiálů*. Online, Bakalářská práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2012. Dostupné z <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/2606>
- [11] Xu, Jinyang, Norbert Geier, Jiaxin Shen, Vijayan Krishnaraj, a S. Samsudeensadham. „A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling". *Journal of Materials Research and Technology* 24 (1. květen 2023): 9677–9707. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.023>.
- [12] Geier, Norbert, Jinyang Xu, Csongor Pereszlai, Dániel István Poór, a J. Paulo Davim. „Drilling of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: Difficulties, challenges and expectations". *10th CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technologies (DET 2020) – Digital Technologies as Enablers of Industrial Competitiveness and Sustainability* 54 (1. leden 2021): 284–89. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.045>.
- [13] Raj, D. Samuel, a L. Karunamoorthy. „A new and comprehensive characterisation of tool wear in CFRP drilling using micro-geometry and topography studies on the cutting edge". *Journal of Manufacturing Processes* 32 (1. duben 2018): 839–56. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.04.014>.
- [14] Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. *Přímé měření sil a momentu*. Online 2011. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf
- [15] Marposs. Online 2024. Dostupné z: <https://www.marposs.com/ger/product/torque-and-force-contactless-sensor-system>
- [16] DVOŘÁČKOVÁ, Štěpánka. *Podklad pro výuku předmětu TECHNOLOGIE III - OBRÁBĚNÍ*. Online 2024. Liberec: Technická univerzita v Liberci. Dostupné na: <https://elearning.tul.cz/course/view.php?id=15069>
- [17] Sandvik Coromant. Online 2024. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/tools/drilling-tools/solid-carbide-drills/corodrigill-854-856>.

- [18] Iliescu, DMFD, D Gehin, ME Gutierrez, a F Girot. „Modeling and tool wear in drilling of CFRP". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50, č. 2 (2010): 204–13.
- [19] KNÁPEK, Tomáš. *Stanovení vhodných řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny z hlediska řezného nástroje a obráběného materiálu*. Diplomová práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní 2021. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/160761>.
- [20] Hrechuk, Andrew, Volodymyr Bushlya, Rachid M'Saoubi, a Jan-Eric Ståhl. „Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP". *Procedia Manufacturing* 25 (2018): 294–301.
- [21] D'Orazio, A., M. El Mehtedi, A. Forcellese, A. Nardinocchi, a M. Simoncini. „Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools". *Journal of Manufacturing Processes* 30 (1. prosinec 2017): 582–92. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.019>.
- [22] Kubher, Sagar, Suhasini Gururaja, a Redouane Zitoune. „In-situ cutting temperature and machining force measurements during conventional drilling of carbon fiber polymer composite laminates". *Journal of Composite Materials* 55, č. 20 (2021): 2807–22.
- [23] UniCut. Online 2024. Dostupné z: <https://www.unicut.cz/stopkove-frezy-ze-sli-nuteho-karbidu/trikomp-v6020-br-vrtak-na-kompozitove-desky>