



Bakalářská práce

Problematika vrtání kompozitních systémů, na bázi epoxidové pryskyřice a uhlíkových vláken, s ohledem na tvorbu třísky

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

David Morávek

Vedoucí práce:

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

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Problematika vrtání kompozitních systémů, na bázi epoxidové pryskyřice a uhlíkových vláken, s ohledem na tvorbu třísky

Jméno a příjmení:

David Morávek

Osobní číslo:

S22000325

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Zadávající katedra:

Katedra obrábění a montáže

Akademický rok:

2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o vrtání do vláknově vyztužených kompozitních systémů.
2. Volba řezných nástrojů (vrtáků) a řezných podmínek.
3. Návrh metodiky experimentů pro vrtání do kompozitních systémů, na bázi epoxidové pryskyřice a uhlíkových vláken, z hlediska opotřebení řezného nástroje, sil při obrábění a tvorby třísky.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje, sil při obrábění a tvorby třísky.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce:

Jazyk práce:

tištěná/elektronická

Čeština

Seznam odborné literatury:

1. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
2. BILÍK, O. Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění. Ostrava: Vysoká škola báňská TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.
4. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. Jakost obráběných povrchů. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.
5. Firemní podklady k nástrojům a obráběnému materiálu.

Vedoucí práce:

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

Datum zadání práce:

2. října 2022

Předpokládaný termín odevzdání: 2. dubna 2024

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

L.S.

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

Prohlášení

Prohlašuji, že svou 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

Obsahem bakalářské práce je výzkum o problematice vrtání do kompozitních systémů, na bázi uhlíkových vláken, s ohledem na tvorbu třísky.

Teoretická část se zabývá základními pojmy týkající se řešené problematiky. Do této části jsou konkrétně zahrnuty informace týkající se vrtání do kompozitních materiálů, nástrojů a poruch při vrtání.

Experimentální část obsahuje informace o použitých zařízeních a metodice pro samotný experiment. Součástí je také diskuze a závěr, kde jsou popsány naměřené hodnoty a celkové zhodnocení experimentu.

Klíčová slova: vrtání, kompozitní materiály, uhlíková vlákna

Annotation

The scope of the bachelor thesis is research on the problem of drilling into carbon fibre based composite systems with respect to chip formation.

The theoretical part deals with the basic concepts related to the problem. Specifically included in this section is information regarding drilling into composite materials, tools and drilling failures.

The experimental part contains information on the equipment used and the methodology for the experiment itself. It also includes a discussion and conclusion where the measured values and overall evaluation of the experiment are described.

Keywords: drilling, composite materials, carbon fibre

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D a konzultantům panu Bc. Martinu Váňovi a panu Ing. Arturu Knapovi za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této bakalářské práce.

OBSAH

1. ÚVOD	6
2. TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1 Kompozitní materiály	8
2.2 Dosavadní poznatky o vrtání do kompozitních materiálů	9
2.3 Typy a materiály rezných nástrojů	10
2.3.1 Geometrie nástrojů	11
2.3.2 Nástrojové materiály	13
2.4 Poruchy v kompozitu způsobené vrtáním	14
2.4.1 Delaminace.....	14
2.4.2 Kvalita obrobeného povrchu	18
2.5 Tvorba třísky.....	18
3. METODIKA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	19
3.1 Obráběný materiál – vzorky CFRP	19
3.2 Nástroje	20
3.3 Obráběcí stroje.....	21
3.3.1 Frézka FNG 32	21
3.3.2 Pásová pila ARG 300	21
3.3.3 Odsávací zařízení.....	21
3.4 Řezné podmínky.....	22
3.5 Měřicí zařízení	23
3.5.1 Mikroskop KEYENCE VK-X3000	23
3.5.2 Dynamometr KISTLER	23
3.5.3 Přípravky pro měření	24
3.6 Popis měřených parametrů.....	25
3.6.1 Opotřebení nástroje	25
3.6.2 Řezné síly.....	25

3.6.3	Delaminace.....	26
3.6.4	Tvorba třísky.....	26
4.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	28
4.1	Měření opotřebení nástrojů.....	28
4.2	Měření řezných sil	31
4.3	Měření rozsahu delaminace	34
4.3.1	Rozsah delaminace v závislosti na opotřebení vedlejšího ostří ...	34
4.3.2	Rozsah delaminace v závislosti na velikosti řezných sil	38
4.4	Měření třísky.....	41
4.5	Shrnutí výsledků experimentu	43
5.	DISKUZE.....	45
5.1	Opotřebení nástrojů.....	45
5.2	Řezné síly.....	46
5.3	Delaminace.....	47
5.4	Tvorba třísky.....	48
6.	ZÁVĚR	49
7.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Název
CFRP	[-]	Compozit s uhlíkovými vlákny
Co	[-]	Kobalt
Cr ₃ C ₂	[-]	Karbid chromu
CTF	[-]	Kritická tahová síla
f	[mm·ot ⁻¹]	Posuv
F _Z	[N]	Složka řezné síly v ose Z
HSS	[-]	Rychlořezná ocel
HSS+TiN	[-]	Rychlořezná ocel s povlak z nitridu titanu
HV	[-]	Tvrdość podle Vickerse
KHD	[μm]	Kritická hodnota delaminace
n	[ot·min ⁻¹]	Otárky
NbC	[-]	Karbid niobu
PKD	[-]	Polykrystalický diamant
s	[m]	Vrtaná vzdálenost
SK	[-]	Slinutý karbid
S-N-O	[-]	Soustava stroj - nástroj - obrobek
TaC	[-]	Karbid tantalu
Tg	[°C]	Teplota skelného přechodu
TiC	[-]	Karbid titanu
v _B	[μm]	Velikost opotřebení
v _{Bkrit}	[μm]	Kritická hodnota opotřebení
WC	[-]	Karbid wolframu
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Měrná tepelná vodivost

1. ÚVOD

Kompozity jsou trendy materiály dnešní doby. Jsou to materiály skládající se ze dvou a více fází různých vlastností jejichž kombinace nabízí velmi specifické vlastnosti. Mezi tyto materiály patří bezpochyby kompozity kombinující vláknennou výztuž ve formě uhlíkových vláken a matrici tvořenou epoxidovou pryskyřicí.

Tento typ materiálu je hojně využíván napříč různými odvětvími. Jeho využití se objevuje ve sportovním, energetickém, zdravotnickém, automobilovém, ale zejména leteckém průmyslu a kosmonautice, kde je jeho využití více než vhodné. Uhlíkové kompozity, taktéž označované zkratkou CFRP převzaté z angličtiny, totiž nabízí značnou pevnost, tuhost a odolnost proti korozi v porovnání s jejich nízkou hmotností. Proto se používá pro výrobu konstrukčních prvků křídel a trupů.

Vzhledem k jejich širokému využití v letectví, kde je zapotřebí vytvořit tisíce montážních otvorů pro spojování šrouby a nýty, je vrtání nejčastější obráběcí proces. Bohužel je vrtání z hlediska kvality obrobených povrchů a trvanlivost rezných nástrojů nejnáročnější operací. Při vrtání uhlíkových kompozitů dochází díky extrémní abrazivnosti uhlíkových vláken ke značnému tření mezi nástrojem a vrtaným materiálem. To způsobuje vznik vysokých teplot, které mají za následek jak opotřebení nástroje, tak i poškození obráběných ploch. Vrtání kompozitů je doprovázeno řadou poruch, z nichž nejdůležitější je delaminace. Porušení delaminací může ovlivnit celkovou pevnost a tuhost dílu. Z tohoto důvodu je snahou tomuto poškození předcházet.

Hlavním cílem této práce je návrh vhodného rezného nástroje pro vrtání, měření rezných sil a delaminace s ohledem na tvorbu třísky při vrtání deskového kompozitního materiálu vyztuženým uhlíkovými vlákny.

Tato bakalářská práce je rozdělena na 5 následujících základních kapitol:

Teoretická část shrnuje poznatky o současném stavu této problematiky, jsou v ní uvedeny informace o kompozitních materiálech, typech rezných nástrojů a jejich materiálech, o poruchách, ke kterým dochází během vrtání a o tvorbě třísky při vrtání kompozitních materiálů.

V části Metodika experimentální části jsou informace o plánovaném experimentu, o zvolených řezných nástrojích a řezných parametrech, o použitých strojích, měřicích zařízeních, principu měření a vyhodnocení dat.

Experimentální část se zabývá realizací plánovaného experimentu a obsahuje naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení pomocí tabulek, grafických znázornění a vyvozených závislostí.

Závěrečná část shrnuje výsledky celého realizovaného experimentu, porovnává řezné nástroje z hlediska opotřebení, řezných sil, delaminace a tvorby třísky.

Diskuze vyzdvihuje nejdůležitější poznatky této bakalářské práce.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Kompozitní materiály

Vláknově vyztužené kompozity patří mezi materiály moderní doby. Jsou to materiály, které se skládají z matrice a vyztužujících vláken. Matrice spojuje vlákna, přenáší zatížení mezi nimi a zajišťuje výsledný tvar kompozitního dílce. Vyztužující vlákna propůjčují kompozitu vysokou pevnost a tuhost. Výsledný materiál pak získává výjimečné vlastnosti. [1]

Existuje velké množství kompozitních materiálů, které se od sebe liší použitím různých typů matric a výztuží. Mezi nejčastěji používané pryskyřice patří epoxidová, polyesterová a fenolická. Co se týče vláknenné výztuže, tak převažují uhlíková, skelná a aramidová vlákna. [1]

O kompozity využívající epoxidovou pryskyřici jako matrici a uhlíková vlákna jako výztuž je velký zájem, a to kvůli jejich jedinečným vlastnostem. Jsou též známy jako kompozity CFRP – z anglického názvu Carbon Fiber Reinforced Polymers. Vyznačují se vynikajícím poměrem pevnosti a tuhosti vůči jejich hmotnosti, vysokou odolností proti korozi a poměrně dlouhou životností. Proto se v dnešní době hojně používají v mnoha odvětvích, zejména v leteckém průmyslu. Často se využívají v automobilovém, energetickém, zdravotnickém a sportovním průmyslu. [2, 3]

Je však potřeba zmínit i nevýhody těchto materiálů. Mezi které patří velmi špatná obrobitelnost, kvůli jeho anizotropním vlastnostem a extrémní abrazi uhlíkové výztuže. Dále je to nasákavost, oproti kovům vyšší teplotní roztažnost a nízká teplotní odolnost, která se uvádí v rozmezí od 100 °C do 300 °C (jedná se o teplotu skelného přechodu T_g), v závislosti na použitém typu reaktoplastové matrice. [1, 3]

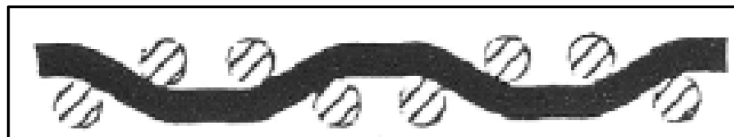
Při výrobě kompozitních dílů jsou vlákna nejčastěji používána ve formě tkanin, které se rozdělují podle typu textilní vazby (plátňová, keprová, atlasová, viz obrázek 1), plošné hustoty a typu vlákna. Všechny tyto parametry ovlivňují výsledné vlastnosti vyrobeného dílce. Díly vznikají technologií zvanou laminace. Ta spočívá v kladení tkaniny do předem připravené formy a následném prosycení vrstev pryskyřicí. Jednotlivé vrstvy tkaniny se do formy kladou pod různými úhly, což značně ovlivňuje pevnost v různých směrech. Avšak největší pevnost dílu je ve směru vláken.

Výroba laminátových dílů se ale neobejde bez sekundárních operací obrábění, to znamená frézování a vrtání. [3, 4, 5]

Protože se práce zabývá vrtáním kompozitu s uhlíkovými vlákny, kde je využita uhlíková textilie s keprovou vazbou, je na obrázku 2 znázorněn řez takto tkané textilie.



Obrázek 1 – Typy textilních vazeb [1]



Obrázek 2 – Detailní pohled na řez textilie s keprovou vazbou [6]

2.2 Dosavadní poznatky o vrtání do kompozitních materiálů

Výroba otvorů vrtáním u dílů z kompozitních systémů je neodmyslitelnou součástí výrobního procesu, zvláště pak v leteckém průmyslu, kde se hojně využívá spojení plošných dílců nýty a šrouby. Například při výrobě jednoho křídla letadla Airbus A380 je potřeba vyvrtat přes 750 000 otvorů. A z tohoto důvodu je na inovace a snížení nákladů kladen velký důraz. [7]

Výše uvedené vlastnosti mají velký dopad na procesy obrábění. Při vrtání se v místě řezu vlivem vysokého tření mezi nástrojem a obrobkem generuje značné množství tepla. Špatná tepelná vodivost kompozitů způsobuje, že vzniklé teplo nepřechází do obráběného materiálu a vzniklých třísek, ale do použitého nástroje. To způsobuje jeho značné namáhání. [8]

Nasákavost laminátu má také významný vliv na obrobitelnost. Ve spoustě případech totiž znemožňuje užití procesních kapalin, což může v konečném důsledku vlivem vysokých teplot způsobit degradaci použité matrice. [8]

Jako vhodnou variantou chladícího média se jeví stlačený vzduch, který může být do místa řezu veden přímo nástrojem s kanálkem pro vnitřní chlazení. Stlačený vzduch tak odvádí z místa řezu vzniklý prach a nedochází tak k ucpávání drážek vrtáku. [9]

Vrtání laminátových kompozitních materiálů je výrazně ovlivněno náchylností těchto materiálů k delaminaci a vytrhávání vláken z matrice působením obráběcích sil, zejména pak přítláčnou silou a kroutícím momentem. [9]

Poškození dílů delaminací při vrtání představuje obrovský problém. V leteckém průmyslu je reklamováno až 60 % kompozitních dílů z důvodu poškození delaminací. Vrtání představuje jeden z nejnákladnějších procesů, ať už kvůli častým reklamacím nebo nutnosti často měnit nástroje vlivem jejich velkého opotřebení. [9, 10]

Je potřeba konvenční způsoby obrábění přizpůsobit tak, aby bylo omezeno tepelné a mechanické poškození. Je prokázáno, že kvalita obráběných ploch je silně ovlivněna materiálem těla nástroje, geometrií břitu a použitými řeznými podmínkami. Zanedbatelný vliv na výslednou kvalitu díry nemá ani celková tuhost obráběcí soustavy S-N-O neboli soustavy stroj – nástroj – obrobek. Ta zahrnuje tuhost rámu stroje, včetně, všech pohyblivých částí stroje, způsob upnutí obrobku i jeho materiál. [9]

2.3 Typy a materiály řezných nástrojů

Vzhledem k povaze a chování kompozitních materiálů, nelze k operaci vrtání přistupovat stejným způsobem jako při vrtání kovových materiálů. [8]

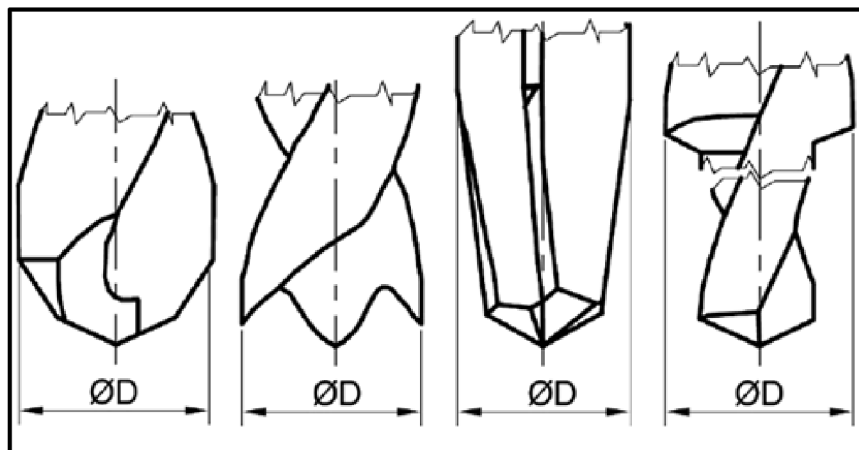
Velkým rozdílem mezi obráběním materiálů kompozitních a kovových je tvorba třísky. Zatímco u kovových materiálů je tříška plynulá a vzniká stříhem, tak u materiálů kompozitních dochází k odlamování malých částíček kompozitu ve formě prachu a jemných měkkých třísek. Takto vzniklá tříška velmi negativně působí na klín obráběcího nástroje, často dochází ke značnému abrazivnímu opotřebení, což má za následek výrazné snižování výkonnosti daného nástroje. [11]

2.3.1 Geometrie nástrojů

Je prokázáno, že geometrie nástroje má významný vliv na kvalitu výsledného povrchu obráběného otvoru. Geometrie je jedním z parametrů ovlivňující velikost řezných sil, a i jejich rozložení do složek. Má také velký význam při tvorbě třísky, jejím odvodu z místa řezu.

Vybrat správnou geometrii není jednoduché. Při vrtání CFRP mají používané nástroje často velké úhly stoupání šroubovice a dlouhé řezné hrany, které usnadňují stříh uhlíkových vláken. Je za potřebí aby nástroj vytvářel malé řezné síly, protože právě tyto síly mají za následek vylamování materiálu na straně, kde vrták vychází z obrobku. To lze ovlivnit například zmenšením příčného ostří. Dalším důležitým parametrem je úhel špičky nástroje, který má vliv na tvorbu otřepů na výstupu vrtané díry. Literatura uvádí, že nejvýhodnější vrcholový úhel je pod 90° a nad 150° . [9]

V odborné literatuře, která se zabývá popisem experimentů s vrtáním do kompozitních materiálů, bývá častou proměnnou právě geometrie vrtáků. Nejčastěji jsou používány klasické konvenční dvouhroté spirálové vrtáky, dýkové, svícnové a krokové. Zmíněné vrtáky jsou vyobrazeny na obrázku X. [8]



Obrázek 3 – Typy vrtáků; zleva – dvojhrotý spirálový, svícnový, dýkový a krokový. [4]

Pro obrábění kompozitních materiál nejsou určeny jen monolitní nástroje. Objevují se i nástroje s vyměnitelnými destičkami. Existují specializované vrtáky s vyměnitelnými hroty nebo jen vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD), které jsou na tělo nástroje připájeny. Tyto vrtáky mají vyměnitelné destičky z polykrystalického diamantu (PKD) připájeny na karbidové tělo, které zajišťuje vysokou tuhost a přesnost. PKD lze tedy použít na řezné hrany a tím snižuje pořizovací náklady nástroje. [9, 11]



Obrázek 4 – Nástroje z letáku ISCAR; zleva – s pájenými destičkami, s pájeným hrotem, s diamantovým povlakem [11]

V současné době je na vývoj různých geometrií nástrojů soustředěna značná pozornost, protože využití kompozitních materiálů je opravdu široké. Vznikají tak nástroje specializované přímo pro obrábění kompozitů. Bohužel jsou tyto nástroje značně nákladné. [11]

Aby nástrojem bylo co nejvíce potlačeno poškození delaminací, je zcela zásadní, aby byl nástroj ostrý. Nástroj musí vlákna výztuže odřezávat, aby nedocházelo k vytahování vláken, vylamování a tvorbě otřepů. Kvalita broušeného povrchu nástroje, musí splňovat nejvyšší standardy. To proto aby na rozhraní nástroj – obrobek vznikalo tření v co nejnižší míře. V důsledku tření se totiž na rozhraní zvyšuje teplota. Tato teplota nesmí překročit teplotu skelného přechodu pryskyřice, aby nedocházelo k její degradaci. [8]

Nástroj je z důvodu nízké tepelné vodivosti kompozitu značně namáhán, protože generované teplo je z místa řezu odváděno právě nástrojem. Z tohoto důvodu jsou slinuté karbidy vhodnější než nástroje z rychlořezné oceli. Slinuté karbidy mají lepší teplotní vodivost. [8, 12]

2.3.2 Nástrojové materiály

Na nástroj je kladena celá řada požadavků. Nástroj by měl disponovat vlastnostmi jako je například tvrdost, odolnost proti opotřebení, pevnost a odolnost proti tepelnému šoku. Výběr správného materiálu pro nástroje je klíčový pro dosažení optimální výrobní produktivity a kvality obráběných povrchů.

Existuje mnoho druhů nástrojových materiálů. Mezi nejznámější materiály používané pro výrobu nástrojů určených k vrtání do kompozitních materiálů patří rychlořezná ocel, slinuté karbidy a polykrystalický diamant.

Rychlořezná ocel je velice rozšířená. V porovnání s karbidovými a diamantovými nástroji je výhodou nástrojů z rychlořezné oceli cena. Bohužel ale není pro obrábění kompozitních materiálů zcela vhodná. Oproti slinutým karbidům totiž špatně vede teplo a v důsledku přehřívání dochází k velkému opotřebení. Často je nahrazována nástroji ze slinutých karbidů a polykrystalického diamantu, které nabízí významné navýšení produktivity nástroje. [11]

Slinuté karbidy se vyznačují vysokou tvrdostí (1 300 – 2 000 HV). Jsou tedy tvrdší než rychlořezné oceli, protože dosahují tvrdosti kolem 800 HV. Další výhodou jejich 2 – 3x vyšší tepelná vodivost, která se u karbidů pohybuje v rozmezí $\lambda = 50 - 105 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a menší tepelná roztažnost. [12]

Existuje velké množství slinutých karbidů, které se mezi sebou liší chemickým složením a hrubostí zrna. Karbidy se dělí podle použitých prvků. Za základní karbid určený k výrobě všech karbidových nástrojů se považuje karbid wolframu (WC), kde se jako pojiva využívá kobaltu (Co) a další složky jako je například karbid titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr_3C_2). Dále se karbidy dělí podle hrubosti. Tyto parametry mají velký vliv na výsledné vlastnosti karbidu. [12]

Polykrystalický diamant však vykazuje ve srovnání s nástroji z karbidu wolframu vyšší produktivitu. [9]

Kromě samotného výběru materiálu hraje při výrobě nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů klíčovou roli i jejich povrchová úprava. Povrchové úpravy ve formě povlaků mohou být například z nitridu titanu (TiN) nebo polykrystalického diamantu (PKD). Tyto povlaky zvyšují tvrdost povrchu nástroje, snižují tření, zvyšují odolnost proti opotřebení a tím i celkovou životnost nástroje.

2.4 Poruchy v kompozitu způsobené vrtáním

Vzhledem k jedinečným vlastnostem polymerních kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny je jejich vrtání doprovázeno celou řadou poruch, které jsou podmíněny způsobem namáhání. Lamináty CFRP, jak již bylo zmíněno výše, mají nejen velmi abrazivní chování, ale i vysokou pevnost a tuhost, a proto jsou na nástroje kladeny vysoké nároky. Vzniklé poruchy pak mají velký vliv na výsledné vlastnosti laminátových komponentů. [1]

2.4.1 Delaminace

Nejzávažnější a zároveň nejčastěji vyskytující se poruchou při vrtání je delaminace, v literatuře je též popisována jako interlaminární lom. Jedná se o oddělení jednotlivých vrstev kompozitního materiálu kolem obvodu nebo uvnitř otvoru, kde dochází k vysokému mechanickému namáhání materiálu vlivem působení řezných sil během vrtání. [1, 3]

K poškození delaminací nedochází jen při obrábění vrtáním, ale i při ostatních, jako jsou frézování, soustružení a broušení. [1, 13]

Vznik, rozsah a směr delaminace je velmi ovlivněn orientací jednotlivých vrstev kompozitního materiálu.

2.4.1.1 Vznik delaminace

Při vrtání dochází k delaminaci v důsledku působení řezných sil generovaných vrtacím nástrojem. Nástroj, který vstupuje do materiálu, působí na obrobek řeznou silou. Při vrtání je nejvýznamnější složkou této řezné síly složka v ose Z. Na začátku operace, kdy nástroj vniká do materiálu, vznikne pod nástrojem vlivem této složky řezné síly tlakové a tahové namáhání. Tahové namáhání má za následek vznik trhlin v materiálu a tahové naopak způsobuje drcení matrice.

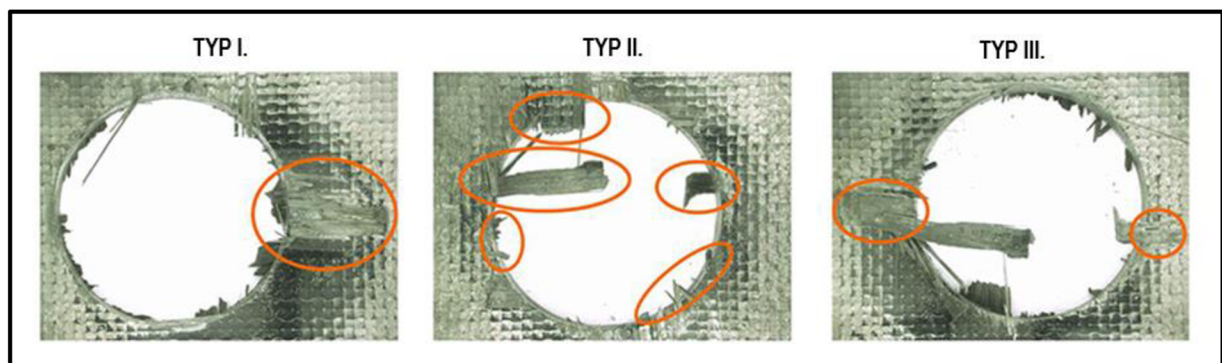
Při vzniku trhlin v matrici, vlivem tahových sil dochází k narušení soudržnosti vláken. Ta se uvolní, následně se lámou a vznikají tak na okraji díry prohlubně od vylamovaných vlákněných svazků. V odborné literatuře je tento typ delaminace označován jako „Typ I.“

Naopak při působení tlakových sil, kdy dochází k drcení matrice, jsou nepevněná vlákna namáhána na ohyb. Tato vlákna se ohýbají ve směru osy Z nebo

se vyhnou nástroji. Po skončení vrtání se vrátí do původní polohy a vyčnívají z obrobeného materiálu. V odborné literatuře je tento typ delaminace označován jako „Typ II.“.

Nebo může vzniknout poškození, které je kombinací výše popsaných typů. Toto kombinované poškození je v odborné literatuře označováno jako „Typ III.“.

Všechny tři typy delaminace, ke kterým při vrtání dochází jsou vyobrazeny na obrázku níže.



Obrázek 5 – Typy delaminace I. a II. [14]

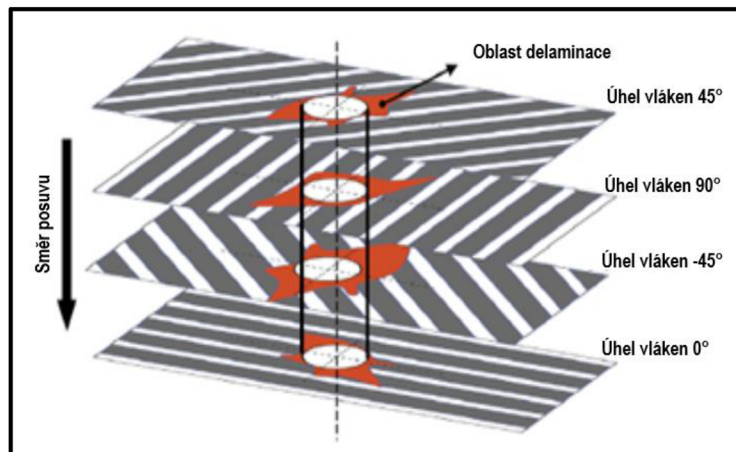
Popsané deformace nastávají tehdy, když je vyvinuta vyšší síla ve směru osy Z než jsou síly, které drží jednotlivé vrstvy laminátu pohromadě, též nazývaná kritická tahová síla (z angličtiny zkratka CTF). Aby bylo zabráněno vzniku delaminace, je potřeba snažit se o snížení rezných sil. Lze říci, že jeden z nejdůležitějších faktorů, který ovlivňuje vznik delaminace je rezná síla. [3, 5]

Výše popsané poruchy mohou nepříznivě ovlivnit strukturální integritu materiálu a životnost kompozitního dílu. Proto je důležité přesné posouzení vad, aby bylo možné těmto defektům předcházet. [3]

2.4.1.2 Delaminace podle místa vzniku

Deformace delaminací vznikají jak na vstupu vrtáku do materiálu, tak i na jeho výstupu. Na straně, kde vrták vniká do materiálu nastává tak zvaný Pull-up efekt, to znamená, že horní vrstvy laminátu jsou zvedány a odlupovány od zbytku materiálu. Příčinou tohoto jevu mohou být například vysoké řezné rychlosti při nichž vznikají v oblasti řezu vysoké teploty degradující vlastnosti materiálu. Dalším faktorem může být nevhodná geometrie nástroje [2].

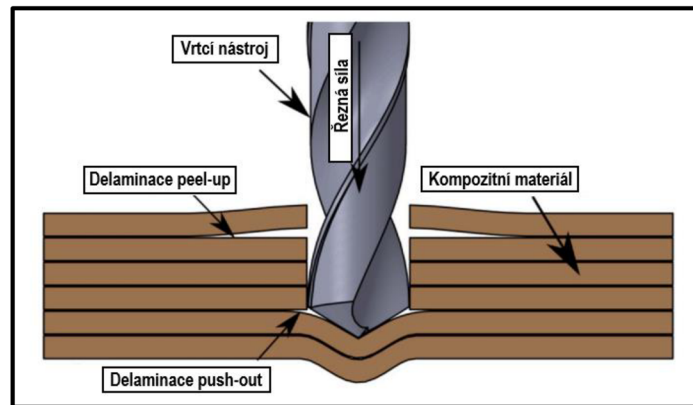
Vnitřní delaminace je rozdělení kontaktních vrstev uvnitř dílce, viz obrázek X. Představuje velký problém a to proto, že není vidět pouhým okem. Tato porucha může mít za následek významné snížení pevnosti a tuhosti celého dílu v důsledku šíření interlaminárních trhlin z místa řezu [2].



Obrázek 6 – Ukázka vnitřní delaminace (Interlaminárních trhlin) [3]

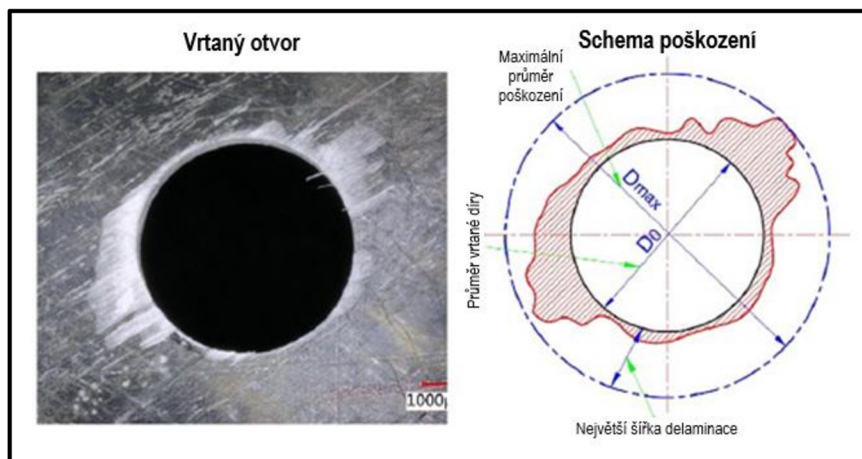
Při výstupu vrtáku z materiálu se zmenšuje zbytková tloušťka materiálu a tím pádem i počet neproříznutých podepřených vrstev. Špička vrtáku vytváří na tyto vrstvy významné tlakové síly, jež způsobují jejich elastické ohýbání. Na spodní straně obrobku poté vznikají nežádoucí nerovnosti a vyštípnutí, které přesahují průměr požadovaného otvoru a významně ovlivňují výslednou kvalitu požadovaného dílce. Tento jev je v odborné literatuře označován jako Push-out [2].

Oba typy, jak pull-up, tak push-out jsou zobrazeny na následujícím obrázku 7.



Obrázek 7 – Ukázka delaminace typu pull-up a push-out [15]

Popis rozsahu delaminace bývá celkem obtížná disciplína. Pro optimalizaci obráběcích procesů a dosažení, pokud možno, co největšího potlačení poškození, je však zcela zásadní. Pro určení rozsahu na vstupní a výstupní straně je často využíváno optické mikroskopie a v rámci vnitřních deformací ultrazvukového C-scanu. Ke specifikaci rozsahu delaminace se používá veličina zvaná Faktor delaminace, což je poměr průměru poškozené oblasti ku skutečnému průměru díry nebo může být měřena pouze největší vzdálenost poškození od okraje díry, viz obrázek 8 níže. [2, 13, 16]



Obrázek 8 – znázornění oblastí poškození delaminací [16]

Otřepy jsou neodřezané svazky vláken, které bývají zpravidla na výstupní hraně otvoru a jsou důsledkem oslabené nejspodnější vrstvy kompozitu. Během vrtání je narušena integrita matrice, což vede k elastické, nikoliv však plastické, deformaci svazků vláken, které poté vyčnívají z materiálu. Na tvorbu otřepů má velký vliv geometrie nástroje, jeho opotřebení i řezné podmínky, zejména rychlost posuvu. [3, 9, 13]

2.4.2 Kvalita obrobeného povrchu

Výsledná drsnost povrchu díry je další ze sledovaných parametrů a je na něj kladen též značný důraz. Vzhledem k povaze uhlíkových kompozitů není zcela jednoduché vždy zajistit správný odvod třísky z místa řezu. Následně dochází k ovlivnění jakosti obrobené plochy vlivem vydrolování matrice kompozitů. Kvalifikace jakosti povrchu je prováděna pomocí drsnoměrů. [4]

Na kvalitu obrobeného povrchu má významný vliv zvolený materiál nástroje, použitá procesní kapalina, obráběný materiál a řezné podmínky. [4]

2.5 Tvorba třísky

Tvorba třísky je v oblasti obrábění velmi důležitým faktorem. Bohužel není možné poznatky z problematiky tvorby třísky u kovů přenést i na kompozity. Zatímco při obrábění kovů dochází k tvorbě plynulé třísky, tak při obrábění kovů vnikají drobné úlomky kompozitu ve formě prachu. Tento prach je tvořen malými částicemi nadrcené matrice a výztužných vláken a může představovat hrozbu pro lidské zdraví. Tyto částice se vyskytují v různých velikostech a množstvích. [1]

Během procesů obrábění se tento prach dostane do kontaktu s lidským tělem zejména vdechnutím. Další možnou cestou může být požití nebo kontaktem s lidskou pokožkou. Studie ukazují, že u částic větších než 5 μm nevzniká riziko vdechnutí, protože takto velké částice se zachytí v nosní dutině. Částice menší než 5 μm jsou dostatečně malé pro vdechnutí. Mohou se tedy vdechnutím dostat přes hrtan až do plic, kde se tyto malé částice uhlíkových vláken zapichují do sliznice a mohou způsobit chronické obtíže. Největší riziko však představují částice menší než 1 μm , které se po vdechnutí mohou dostat do krevního oběhu přes plicní sklípky. [1]

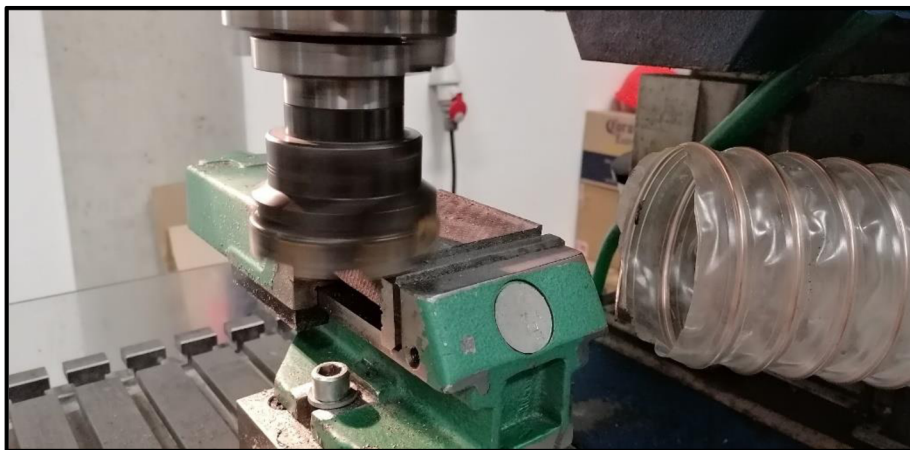
Míra nebezpečí nezáleží jen na velikosti vniklé částice, ale také na tvoru lomové plochy. Pokud je lomová plocha kolmá k ose vlákna, nebude se do lidské tkáně zabodávat tak snadno jako tříska, u které by lomová plocha nebyla kolmá k ose vlákna a tvořila tak špičku. [1]

3. METODIKA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Tato část bakalářské práce je zaměřena na popis průběhu celého experimentu. V první řadě je v této kapitole popsána výroba vzorků z uhlíkového kompozitu, použité řezné podmínky, průběh vrtání, měření řezných sil, opotřebením nástrojů a rozsah poškození vzorků vlivem delaminace. Dále je tato kapitola věnována popisu strojů, nástrojů a všech měřidel použitých během experimentu.

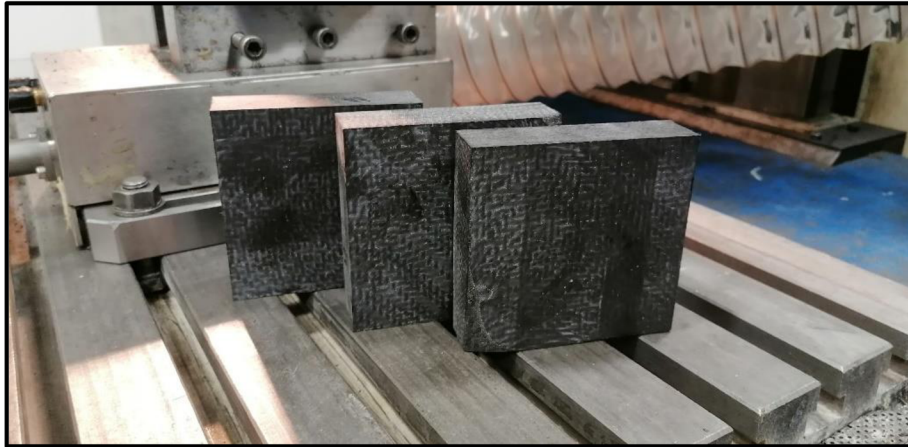
3.1 Obráběný materiál – vzorky CFRP

Vzorek byl vyroben v laboratoři třískového obrábění, jednalo se kompozit skládající se z uhlíkové tkaniny KC 160 g/m³ s keprovou vazbou a povrchem ošetřeným silanovým vazebním činidlem od firmy Havel Composites s.r.o. Celkem bylo použito 110 vrstev tkaniny, které byly prosyceny pryskyřicí. Byla použita epoxidová pryskyřice typu CHS - EPOXY 520 a pro její vytvrzení bylo použito tvrdidlo T 0492 v doporučeném hmotnostním poměru uvedeném výrobcem, konkrétně 26:100. Pro výrobu tohoto kompozitu byla použita technologie vakuového lisování. Vytvrzování vzorku probíhalo při teplotě 22°C ± 2°C kolem dvaceti hodin. Byla připravena trojice obrobků o rozměrech 80 x 80 x 23 mm pomocí pásové pily ARG 300 Plus H. F. a pro jejich zarovnání posloužila frézka FNG 32. Proces zarovnání vzorků pro plánovaný experiment je zachycen na obrázku 9.



Obrázek 9 – proces zarovnávání vzorků

Na dalším obrázku jsou vyobrazeny již obrobené vzorky připravené pro realizaci plánovaného experimentu.



Obrázek 10 – obrobené zkušební vzorky

3.2 Nástroje

Pro plánovaný experiment byly vybrány nástroje od firmy Premus. Byly vybrány na základě poznatků z odborné literatury, doporučení výrobce a s ohledem na jejich dostupnost. Všechny zvolené vrtáky mají průměr 6,8 mm, celkovou délku 109 mm, délku činné části nástroje 69 mm a jsou konvenčního spirálového typu. Nástroje jsou rozdílné v použitých nástrojových materiálech, povrchových úpravách a geometriích břitů. Údaje o jednotlivých vrtácích jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 1 – nástroje zvolené pro plánovaný experiment

Zvolené nástroje					
Označení	Materiál	Povrchová úprava	Úhel špičky	Obrázek z katalogu	Cena
HSS	HSS	Bez povlaku	118°		106 Kč
HSS+TiN	HSS	TiN	130°		187 Kč
SK	SK	Bez povlaku	118°		1 220 Kč

Nástroj s označením SK je vrták ze slinutých karbidů doporučený přímo pro vrtání do kompozitních systémů CFRP. Vzhledem k velké pořizovací ceně bylo snahou vybrat levnější alternativu v podobě vrtáků z rychlořezné oceli. Jeden bez povrchové úpravy a druhý s povlakem TiN. Pro experiment byly záměrně vybrány vrtáky s rozdílnými geometriemi.

3.3 Obráběcí stroje

3.3.1 Frézka FNG 32

Většina obráběcích operací v rámci experimentální části této bakalářské práce, tedy zarovnání vzorků a samotné vrtání, probíhaly na frézce FNG 32, viz obrázek 11, značky TOS Olomouc s.r.o. s výkonem vřetene 4 kW a maximálními dosažitelnými otáčkami $n = 3\,000\text{ min}^{-1}$.



Obrázek 11 – frézka FNG 32

3.3.2 Pásová pila ARG 300

Pro dělení vzorků na menší části byla použita pásová pila ARG 300 Plus H.F. značky Pilous. Její parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

3.3.3 Odsávací zařízení

Pro odtažení zdraví škodlivého prachu vzniklého při vrtání karbonového kompozitu bylo použito odsávací zařízení od firmy Vzduchotechnik Chrastava s.r.o. model POC 9 o výkonu 750 W. Toto odsávací zařízení je vyobrazeno na obrázku 12.



Obrázek 12 – odsávací zařízení

3.4 Řezné podmínky

Parametry vrtání byly voleny dle odborné literatury. Cílem experimentu bylo porovnat opotřebení břitů jednotlivých nástrojů v závislosti na zvoleném nástrojovém materiálu. Z tohoto důvodu byly zvolené řezné parametry upraveny tak, aby byly tyto rozdíly znatelné a bylo tedy dosaženo určitého stupně opotřebení.

Zvolené parametry byly použity jak pro měření opotřebení nástrojů, tak i pro měření řezných sil a definování rozsahu delaminace. Navržené řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 – Navržené řezné podmínky

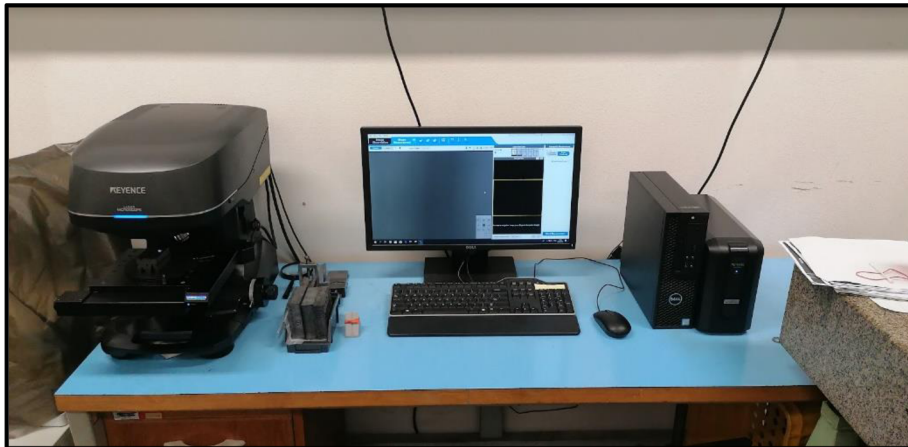
Řezné podmínky	
Otáčky [min^{-1}]	Posuv [$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$]
3 000	0,1

Je důležité poznamenat, že při experimentu nebylo využito žádného chladícího media, tudíž všechny operace probíhaly za sucha a z místa řezu byl pouze odsáván vzniklý prach výše popsaným odsávacím zařízením (Viz. kapitola 3.3.3).

3.5 Měřicí zařízení

3.5.1 Mikroskop KEYENCE VK-X3000

K měření opotřebení jednotlivých nástrojů a poté i delaminace a třísek vzniklých při obrábění byl použit konfokální mikroskop KEYENCE VK-X3000, který je vybaven 3D bezkontaktním laserovým profiloměrem. Pomocí tohoto typu mikroskopu byly také pořízeny snímky sledovaných částí nástrojů a poškození vstupních a výstupních hran vrtaných otvorů. Použitý mikroskop je vyobrazen na obrázku 13.



Obrázek 13 – mikroskop KEYENCE

3.5.2 Dynamometr KISTLER

Při měření řezných sil, byl využit dynamometr KISTLER typu 9265B. Tento typ dynamometru měří tři kolmé složky síly (směry X, Y, Z) pomocí piezoelektrických článků, které generují na svém povrchu elektrický náboj v závislosti na jejich namáhání. Tento generovaný náboj je zesilován nábojovým zesilovačem s označením 5019B a zároveň převeden na elektrický signál, který je zpracován a zobrazen v prostředí LabView6.1. Hodnoty odečtené z prostředí Labview byly následně zpracovány pomocí softwaru Excel. Dynamometr je znázorněn na obrázku 14.

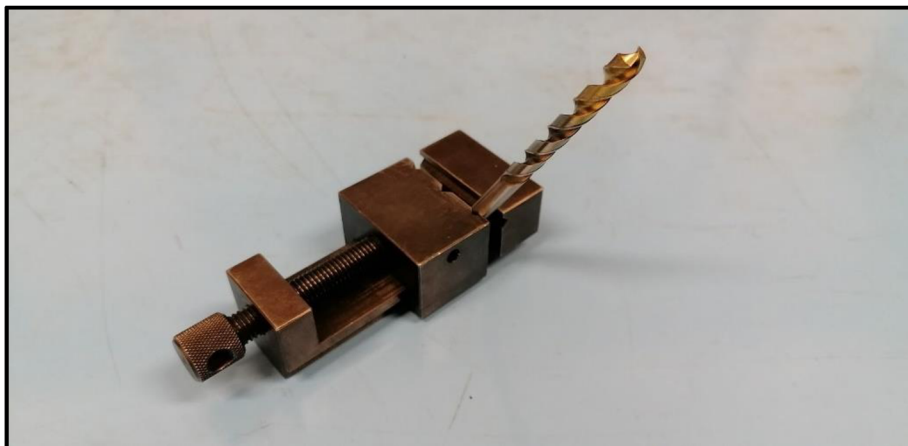


Obrázek 14 – dynamometr je vidět ve žlutém kroužku; k dynamometru je pomocí šroubů připevněn strojní svěrák, ve kterém je upnut obrobek; dynamometr je ke stolu přichycen pomocí šroubů a T-matic

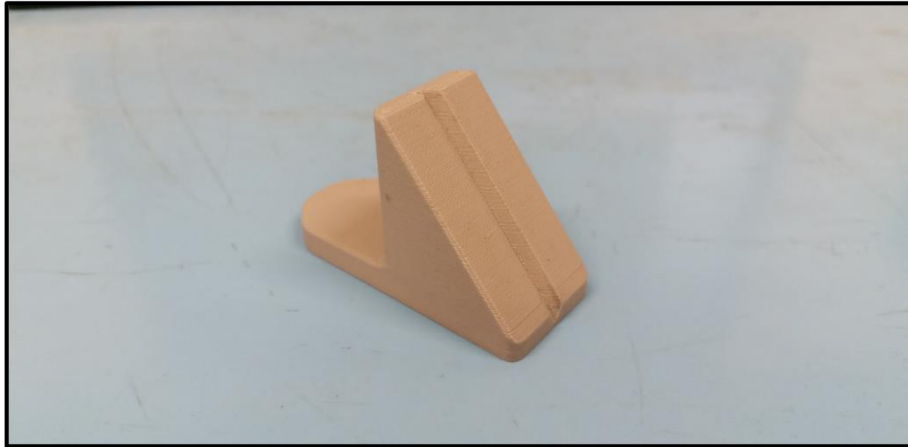
Na obrázku X je vidět dynamometr připevněný k pracovnímu stolu frézky. K dynamometru šrouby upevněn svěrák, ve kterém je upnut zkušební vzorek.

3.5.3 Přípravky pro měření

Pro co nejpřesnější ustavení nástroje, a tudíž i co nejpřesnější měření opotřebení nástrojů byly využity speciální přípravky. Byl použit malý svěrák s prismatickou drážkou (Obrázek 15) a úhlový 3D tištěný přípravek (Obrázek 16)



Obrázek 15 – miniaturní svěrák s prismatickou drážkou ve kterém je pro názornost uchycen vrták HSS+TiN



Obrázek 16 – úhlový přípravek, který byl vymodelován a vytištěn pro účely této bakalářské práce

3.6 Popis měřených parametrů

Tato kapitola obsahuje informace o měřených parametrech. Je zde uvedeno, v jakých intervalech, jakými metodami a postupy probíhalo měření sledovaných parametrů plánovaného experimentu.

U každého z měřených parametrů bylo provedeno celkem 5 měření a z naměřených hodnot byl vypočten průměr a nejistota měření.

3.6.1 Opotřebení nástroje

S každým typem vrtáku bylo vyvrtáno celkem 60 děr. Měření opotřebení bylo provedeno vždy po vyvrtání určitého počtu otvorů, a to v řadě 5, 10, 20, 40 a 60. Tato měření byla provedena pomocí mikroskopu KAYENCE.

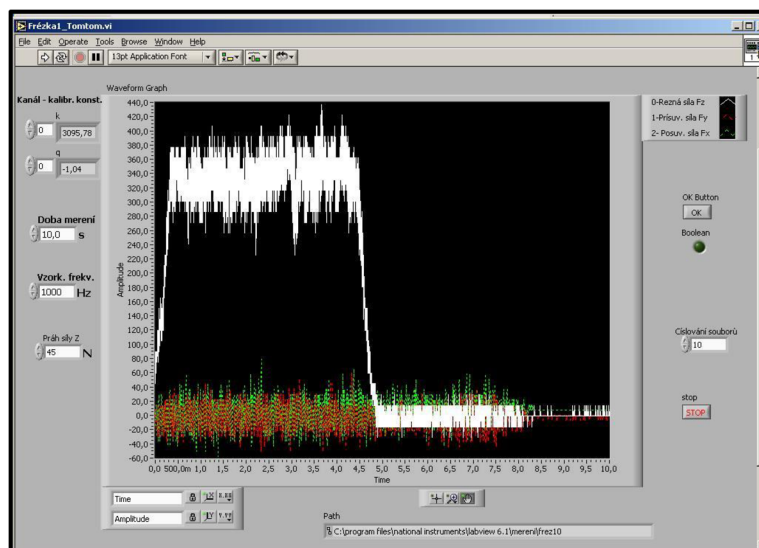
Opotřebení nástroje bylo měřeno na hlavním a vedleším ostří. Bylo sledováno opotřebení vedlejšího ostří vrtáku, protože má na kvalitu povrchu díry nejvýznamnější vliv.

3.6.2 Řezné síly

Řezné síly byly stejně jako opotřebení vedlejšího ostří nástroje měřeny pro každý nástroj a ve stejné řadě počtu děr, viz kapitola 3.6.1. U řezné síly byla měřena pouze složka řezné síly v ose Z (F_z) – tedy v ose vrtacího nástroje.

Pro měření řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER, viz kapitola 3.5.2. Záznam průběhu řezných sil ve vyhodnocovacím prostředí LabView6.1 byl rozdělen na 5 stejných úseků, z nichž byly odečteny hodnoty řezných sil. Následně

byly odečtené hodnoty zpracovány pomocí softwaru Microsoft Excel. Ukázka prostředí softwaru LabView6.1 je na obrázku 17.



Obrázek 17 – ukázka prostředí softwaru LabView6.1 se záznamem průběhu řezných sil v závislosti na čase

3.6.3 Delaminace

Delaminace byla měřena ve stejné řadě počtu děr jako u zkoumání opotřebení nástroje. Každý otvor byl rozdělen na dvě části, konkrétně vstupní a výstupní. Bylo provedeno 5 měření z každé strany otvoru. Změřené hodnoty byly zapsány do tabulky.

U poškození delaminací typu II. (vylamování) byla měřena největší vzdálenost poškození od okraje otvoru. U typu I. (vyčnívající vlákna) byla měřena délka těchto vláken.

Vyhodnocení naměřených hodnot bylo rozděleno na dvě části. V první byl rozsah delaminace vztažen opotřebení vedlejšího ostří a v té druhé k řezným silám vyvozených nástrojem v ose Z.

3.6.4 Tvorba třísky

Během vrtání kompozitních materiálů vznikají třísky různých velikostí. Třísky o velikosti větší než 10 μm nepředstavují pro člověka žádné nebezpečí, a proto byl zkoumán pouze vzniklý prach. Částice prachu vzniklého během vrtání, byly odebrány přímo z vrtáku, z drážky pro odvod třísky, kde se tyto částice usazovaly.

Zkoumání velikosti třísek probíhalo na pracovišti Katedry materiálů na Technické univerzitě v Liberci za pomoci elektronového mikroskopu TESCAN MIRA 3 od firmy Tescan Holding, Czech Republic.

Třísky pro pořízení snímků byly odebrány vždy po vyvrtání celkové vzdálenosti 0,1 m s každým použitým nástrojem.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část bakalářské práce je zaměřena na samotný experiment a je rozdělena celkem na 4 podkapitoly, ve kterých je popsáno opotřebení použitých nástrojů, řezná síla vznikající při vrtání, delaminace, a nakonec tvorba třísky.

Všechny vytvořené závislosti tohoto experimentu jsou vztaženy k opotřebení vedlejšího ostří nástroje. Je tomu tak proto, že vedlejší ostří má větší vliv na výslednou kvalitu obráběného povrchu než ostří hlavní.

Naměřené hodnoty byly zpracovány v softwaru Microsoft Excel, kde byly zhotoveny i tabulky a grafické závislosti.

4.1 Měření opotřebení nástrojů

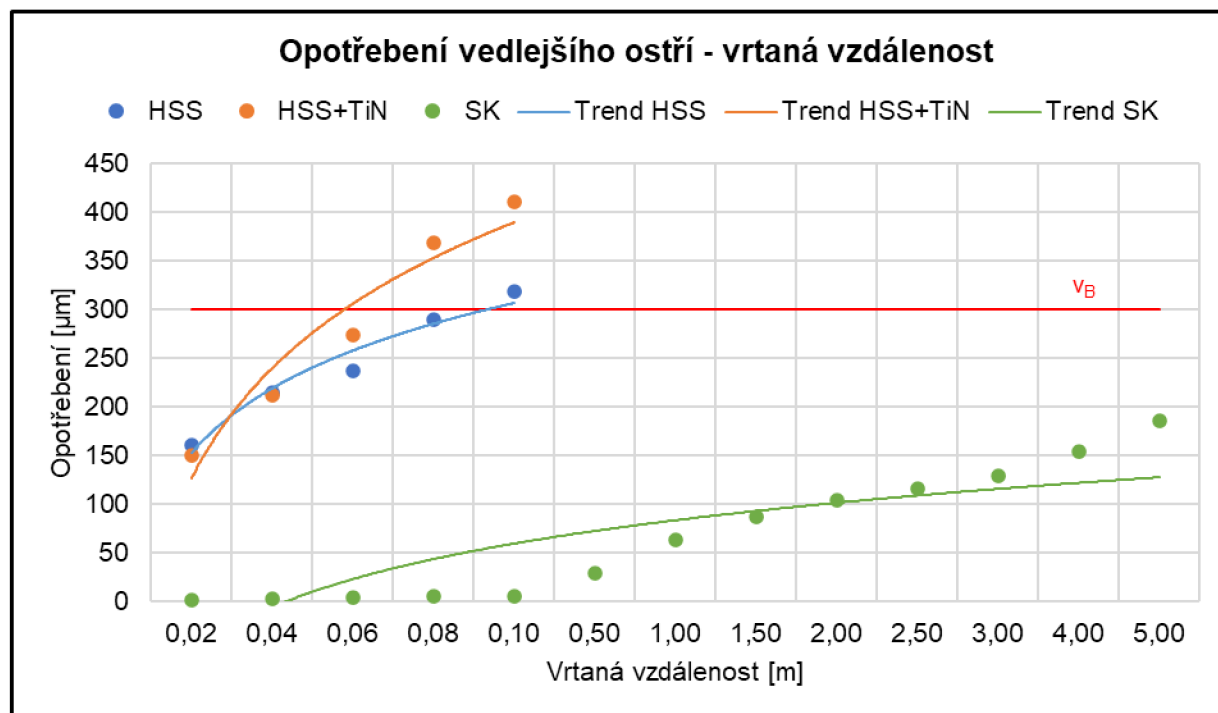
V této kapitole jsou shrnuty naměřené hodnoty opotřebení vedlejšího ostří jednotlivých vrtáků. Měření byla provedena pomocí mikroskopu KEYENCE VK-X3000. (Viz. kapitola 3.5.1)

Hodnoty opotřebení vedlejšího ostří všech 3 vrtáků v závislosti na vrtané vzdálenosti jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3 – opotřebení vedlejšího ostří v závislosti na vrtané vzdálenosti

Opotřebení jednotlivých nástrojů v závislosti na vrtané dráze		
Nástroj	Vzdálenost [m]	Vedlejší ostří [μm] \pm Nejistota měření [μm]
HSS	0,02	160,8 \pm 1,4
	0,04	215,2 \pm 1,5
	0,06	237,2 \pm 1,4
	0,08	289,2 \pm 1,4
	0,10	319,2 \pm 1,9
HSS+TiN	0,02	150,2 \pm 1,8
	0,04	212,2 \pm 1,5
	0,06	273,4 \pm 1,9
	0,08	368,4 \pm 1,5
	0,10	410,4 \pm 1,5
SK	0,02	2,2 \pm 1,2
	0,04	3,1 \pm 1,3
	0,06	4,7 \pm 1,2
	0,08	5,5 \pm 1,2
	0,10	6,2 \pm 1,3
	0,50	29,6 \pm 1,3
	1,00	63,2 \pm 1,7
	1,50	86,8 \pm 1,6
	2,00	104,6 \pm 1,7
	2,50	116,2 \pm 1,9
	3,00	129,2 \pm 1,8
4,00	153,8 \pm 1,5	
5,00	185,6 \pm 1,5	

Hodnoty opotřebení vedlejšího ostří v závislosti na vrtané vzdálenosti jsou graficky znázorněny na grafu 1.



Graf 1 – grafická závislost opotřebení vedlejšího ostří na vrtané vzdálenosti

Z výše realizovaného měření lze poukázat na následující. U nástrojového materiálu HSS a HSS+TiN docházelo k výraznému nárůstu opotřebení s vrtanou vzdáleností. Naopak u vrtáku z nástrojového materiálu SK bylo opotřebení do 0,1 m minimální a nárůst opotřebení v závislosti na vrtané vzdálenosti pozvolnější než u vrtáku HSS a HSS+TiN. Z toho vyplývá, že mezi vrtanou vzdáleností a opotřebením nástroje existuje silná závislost. S vrtanou vzdáleností, roste opotřebení nástroje.

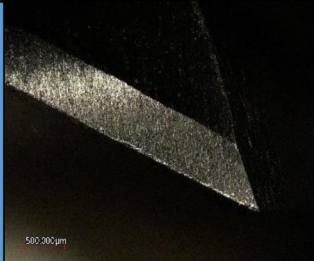
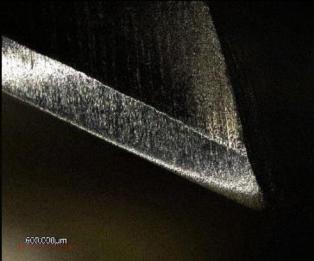

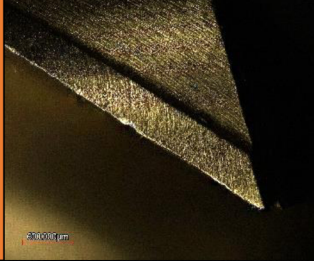





Během experimentu bylo dosaženo kritického opotřebení $v_{Bkrit} = 300 \mu m$ s vrtákem HSS při vrtané vzdálenosti mezi 0,08 a 0,1 m (odpovídá 5. díře). S vrtákem HSS+TiN bylo kritického opotřebení dosaženo už ve vzdálenosti mezi 0,06 a 0,08 m (vzdálenost odpovídá 4. díře), tedy dříve než s vrtákem HSS. S vrtákem SK této hranice nebylo dosaženo vůbec. Nástroje z HSS a HSS+TiN vykazují významně vyšší opotřebení než nástroj SK. Nejvyššího opotřebení bylo dosaženo s nástrojem HSS+TiN.

Z důvodu extrémního opotřebení vrtáků s označením HSS a HSS+TiN, které překročilo stanovenou hranici kritického opotřebení $v_{Bkrit} = 300 \mu m$ nebylo s těmito

nástroji pokračováno ve vrtání. Naopak s vrtákem s označením SK bylo vyvrtáno až do vzdálenosti 5 m. Po vyvrtání této vzdálenosti byl experiment ukončen.

V následující tabulce jsou zobrazeny snímky vedlejšího ostří jednotlivých nástrojů po vyvrtání určité vzdálenosti. Snímky byly pořízeny pomocí konfokálního mikroskopu KEYENCE (Viz. kapitola 3.5.1)

Tabulka 4 – snímky opotřebení vedlejšího ostří jednotlivých nástrojů v závislosti na vrtané vzdálenosti.

Snímky opotřebení vedlejšího ostří jednotlivých nástrojů			
Vrtaná vzdálenost [m]	0	0,06	0,1
HSS			
HSS+TiN			
SK			

Na snímcích je viditelné značné opotřebení vrtáků HSS a HSS+TiN. Jedná se o opotřebení otěrem, které je způsobeno extrémní abrazivností uhlíkových vláken. Poškození nástroje otěrem je nejčastěji objevujícím se typem opotřebení při vrtání kompozitů CFRP. Naopak na snímcích nástroje z SK je vidět, že po vyvrtání stejné vzdálenosti 0,1 m jako s vrtáky HSS a HSS+TiN nedošlo k téměř žádnému opotřebení.

4.2 Měření řezných sil

Tato kapitola se věnuje měření řezných sil. Řezné síly byly měřeny ve stejných intervalech jako bylo měřeno opotřebení a jsou vztaženy k opotřebení vedlejšího ostří nástroje. Byla zkoumána složka řezné síly v ose Z. Měření probíhalo dle vypracované metodiky, viz kapitola 3.6.2.

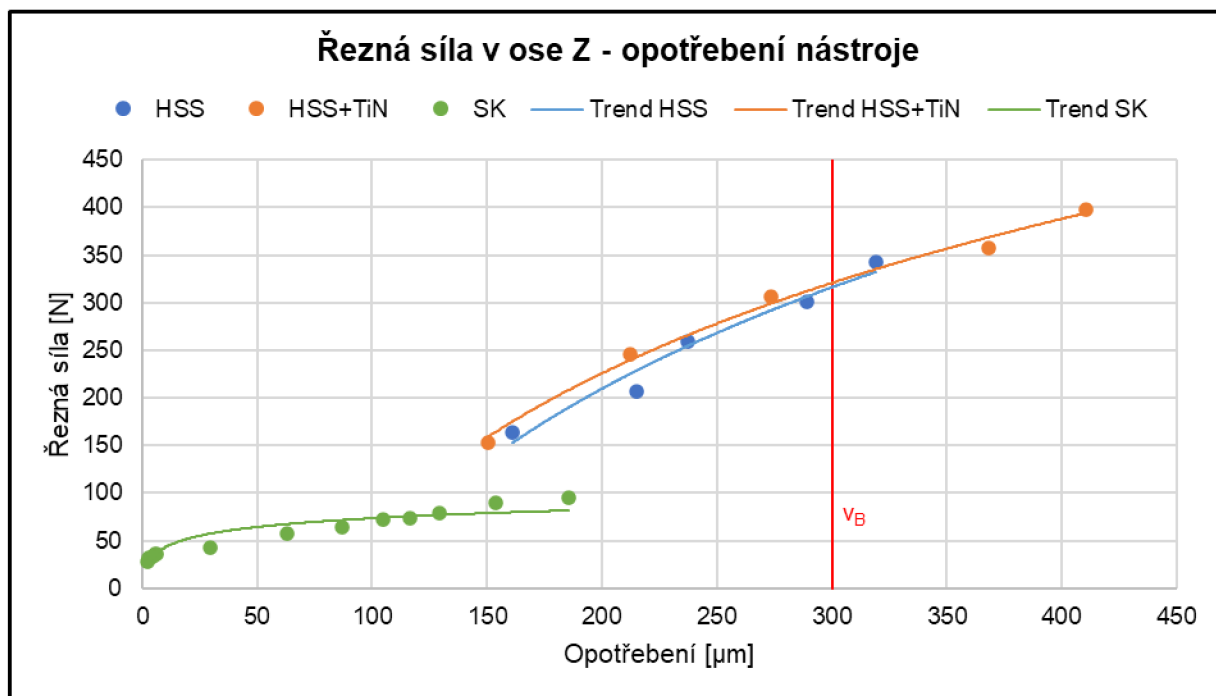
I při měření sil bylo zaznamenáno 5 hodnot, ze kterých byla vypočtena průměrná hodnota a nejistota měření.

V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty řezných sil v závislosti na opotřebení vedlejšího ostří zkoumaných nástrojů. Pro lepší představu a porovnání byl vypracován graf 2.

Tabulka 5 – závislost řezných sil na opotřebení vedlejšího ostří nástroje.

Řezná síla v závislosti na opotřebení vedlejšího ostří		
Nástroj	Opotřebení [μm] \pm Nejistota měření [μm]	Řezná síla v ose Z [N] \pm Nejistota měření [μm]
HSS	160,8 \pm 1,4	163,4 \pm 1,5
	215,2 \pm 1,5	207,4 \pm 1,6
	237,2 \pm 1,4	259,2 \pm 1,5
	289,2 \pm 1,4	301,4 \pm 1,5
	319,2 \pm 1,9	343,2 \pm 1,6
HSS-TiN	150,2 \pm 1,8	153,6 \pm 1,5
	212,2 \pm 1,5	245,2 \pm 1,5
	273,4 \pm 1,9	306,2 \pm 1,6
	368,4 \pm 1,5	357,2 \pm 1,6
	410,4 \pm 1,5	398,4 \pm 1,7
SK	2,2 \pm 1,2	27,4 \pm 1,5
	3,1 \pm 1,3	31,8 \pm 1,5
	4,7 \pm 1,2	33,4 \pm 1,6
	5,5 \pm 1,2	36,2 \pm 1,6
	6,2 \pm 1,3	36,4 \pm 1,7
	29,6 \pm 1,3	43,2 \pm 1,5
	63,2 \pm 1,7	57,2 \pm 1,6
	86,8 \pm 1,6	63,8 \pm 1,8
	104,6 \pm 1,7	71,8 \pm 1,5
	116,2 \pm 1,9	73,4 \pm 1,6
	129,2 \pm 1,8	78,4 \pm 1,4
	153,8 \pm 1,5	90,2 \pm 1,8
	185,6 \pm 1,5	95,2 \pm 1,6

Na grafu 2 je graficky znázorněna závislost řezných sil generovaných jednotlivými nástroji v závislosti na jejich opotřebení. V grafu je vyznačena limitní hodnota opotřebení vedlejšího ostří $v_B = 300 \mu\text{m}$.



Graf 2 – grafická závislost řezných sil na opotřebení vedlejšího ostří nástroje

Z výše realizovaného měření lze vyvodit, že řezná síla generovaná při vrtání roste s opotřebením nástroje. Je vidět, že při vrtání nástrojem HSS byla rychlost zvětšování řezných sil v závislosti na opotřebení podobná jako s nástrojem HSS+TiN. Při vrtání s nástrojem SK byl tento trend mírnější než u vrtáků HSS a HSS+TiN.

Při vyvrtané vzdálenosti 0,1 m dosáhla řezná síla při vrtání nástrojem HSS maximální hodnoty $343,4 \pm 3,9 \text{ N}$ při opotřebení vedlejšího ostří $319,2 \pm 1,9 \mu\text{m}$. U nástroje HSS+TiN bylo při stejné vzdálenosti dosaženo řezné síly $398,4 \pm 6,7 \text{ N}$ při opotřebení $410,4 \pm 1,5 \mu\text{m}$. Naopak s nástrojem SK při stejné vyvrtané vzdálenosti byly zaznamenány výrazně menší hodnoty řezných, konkrétně $36,4 \pm 1,5 \text{ N}$ při opotřebení $6,2 \pm 0,2 \mu\text{m}$. Tyto hodnoty jsou přehledně zobrazeny v tabulce 6.

Tabulka 6 – Shrnutí naměřených hodnot.

Shrnutí naměřených hodnot			
Nástroj	Vrtaná vzdálenost [m]	Opotřebení [μm]	Řezná síla [N]
HSS	0,1	$319,2 \pm 1,9$	$343,2 \pm 3,9$
HSS+TiN		$410,4 \pm 1,5$	$398,4 \pm 6,7$
SK		$6,2 \pm 0,2$	$36,4 \pm 1,5$

Z naměřených hodnot je možné porovnat nástroje z hlediska hodnoty řezných sil při stejném opotřebení. Pro toto zhodnocení bylo vybráno opotřebení 185 μm . Při této hodnotě opotřebení vedlejšího ostří vrtáku HSS odpovídá hodnota řezné síly 182,5 N. Pro vrták HSS+TiN je řezná síla při stejném opotřebení vyšší – 210 N. Vrták SK vykazuje i v porovnání řezných sil při stejném opotřebení menší hodnotu řezné síly, konkrétně 95,2 N. Je třeba uvažovat, že tyto hodnoty jsou pouze orientační, protože nebylo technicky možné změřit hodnoty řezných sil při tomto konkrétním opotřebení a určit nejistotu měření. Hodnoty byly odečteny z grafu naměřených sil a pro toto porovnání jsou dostačující. Toto porovnání je shrnuto v následující tabulce 7.

Tabulka 7 – porovnání řezných sil při stejném opotřebení

Porovnání řezných sil při stejném opotřebení			
Nástroj	Opotřebení [μm]	Řezná síla v ose Z [N]	Vrtaná vzdálenost [m]
HSS	185	182,5	0,3
HSS+TiN		210,0	0,3
SK		95,2	5,0

Z výše popsaných výsledků lze vyvodit, že řezná síla je výrazně ovlivněna opotřebením nástroje, nástrojovým materiálem a geometrií nástroje. Řezná síla roste s rostoucím opotřebením nástroje. Materiál nástroje silně ovlivňuje míru jeho opotřebení a spolu s geometrií břitu (uvažovány známé úhly špičky – viz. kapitola 3.2) také určuje velikost řezných sil. Z pohledu velikostí řezných sil v závislosti na opotřebení se jako nejhorší jeví nástroj HSS+TiN a naopak jako nejlepší nástroj SK.

Naměřené hodnoty provedeného experimentu a vyvozené závislosti odpovídají poznatkům z odborné literatury.

4.3 Měření rozsahu delaminace

V této podkapitole jsou shrnuty naměřené hodnoty rozsahu delaminace. Měření probíhalo dle vytvořené metodiky, to znamená, že delaminace byla měřena z obou stran obrobku a byla měřena největší vzdálenost poškození od okraje díry. Bylo vždy provedeno 5 měření. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná hodnota a určena nejistota měření. Měření rozsahu delaminace bylo rozdělené na dvě části. V první části je delaminace vztažena k opotřebení vedlejšího ostří nástroje a v té druhé velikosti řezných sil. Měření probíhalo dle vypracované metodiky, viz kapitola 3.6.3.

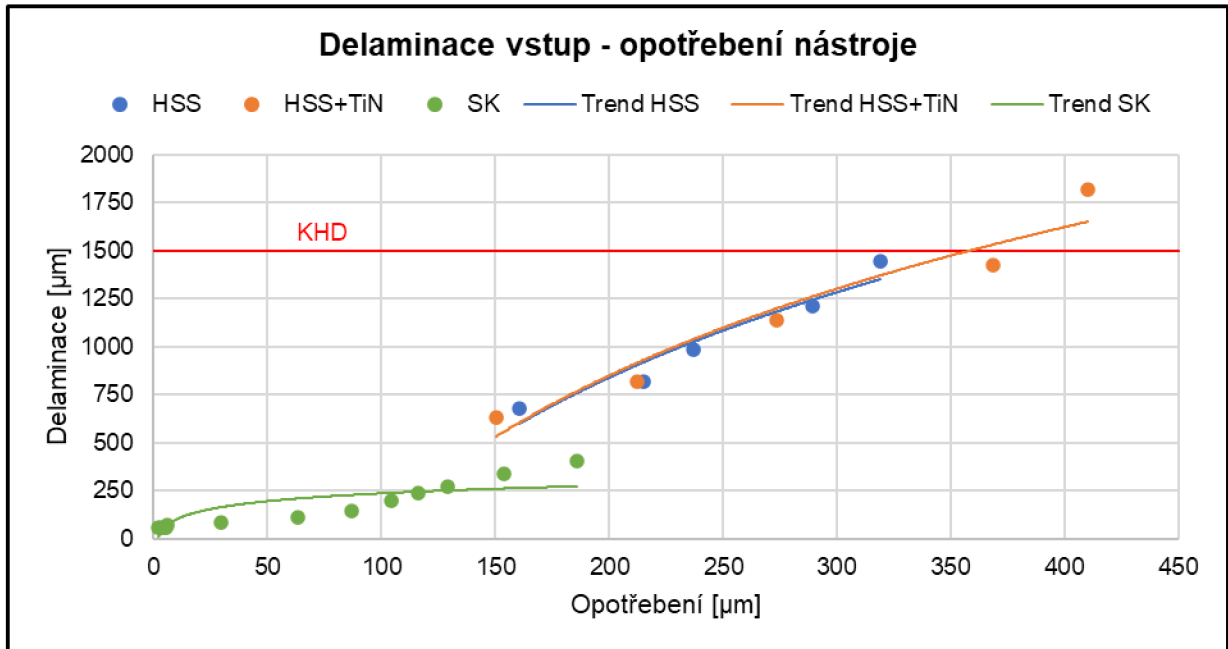
4.3.1 Rozsah delaminace v závislosti na opotřebení vedlejšího ostří

Zpracované hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce 8. Delaminace na straně, kde vrták vstupuje do materiálu je v tabulce 8. označena jako „Delaminace vstup“ a na straně kde vrták z materiálu vystupuje jako „Delaminace výstup“. Závislosti rozsahu poškozené oblasti delaminací jsou vztaženy k opotřebení vedlejšího ostří daného nástroje.

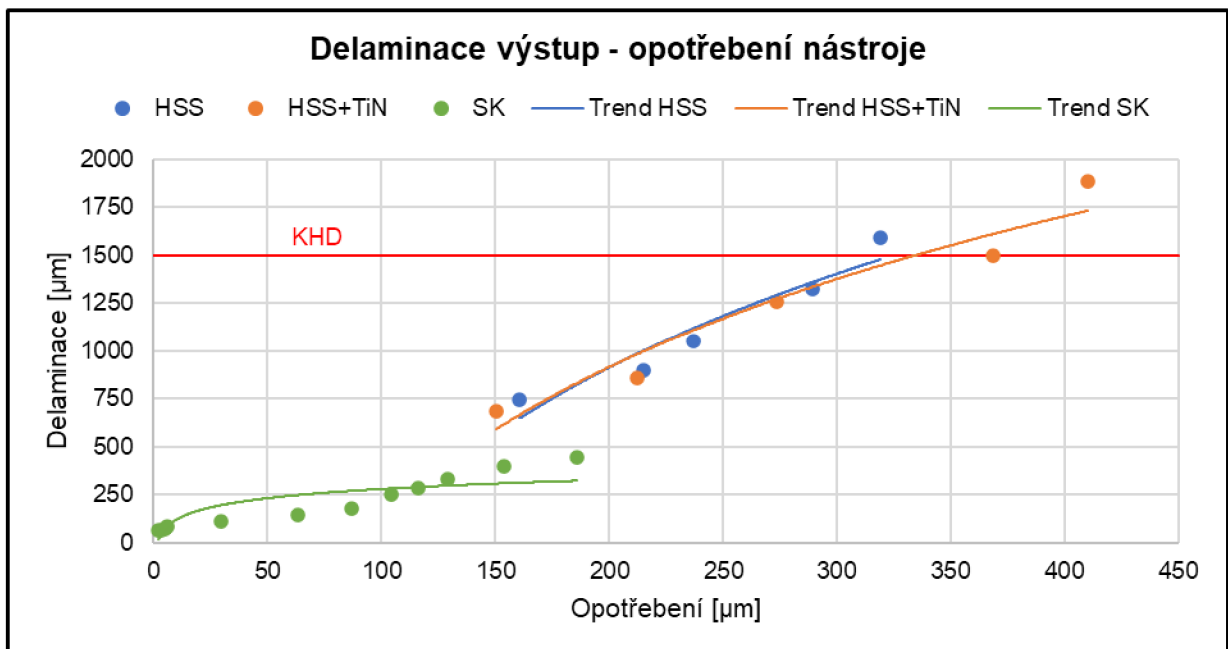
Tabulka 8 – naměřené hodnoty delaminace z obou stran obrobku v závislosti na opotřebení nástroje.

Rozsah delaminace v závislosti na opotřebení nástroje			
Nástroj	Opotřebení [μm] \pm Nejistota měření [μm]	Delaminace vstup [μm] \pm Nejistota měření [μm]	Delaminace výstup [μm] \pm Nejistota měření [μm]
HSS	160,8 \pm 1,4	681 \pm 1,7	742 \pm 1,7
	215,2 \pm 1,5	819 \pm 1,7	898 \pm 1,8
	237,2 \pm 1,4	986 \pm 1,6	1052 \pm 1,7
	289,2 \pm 1,4	1210 \pm 1,8	1325 \pm 1,7
	319,2 \pm 1,9	1446 \pm 1,8	1589 \pm 1,9
HSS-TiN	150,2 \pm 1,8	632 \pm 1,6	688 \pm 1,6
	212,2 \pm 1,5	817 \pm 1,6	860 \pm 1,7
	273,4 \pm 1,9	1138 \pm 1,7	1255 \pm 1,7
	368,4 \pm 1,5	1425 \pm 1,8	1498 \pm 1,8
	410,4 \pm 1,5	1816 \pm 1,7	1883 \pm 1,6
SK	2,2 \pm 1,2	57 \pm 1,5	64 \pm 1,6
	3,1 \pm 1,3	61 \pm 1,6	68 \pm 1,6
	4,7 \pm 1,2	61 \pm 1,5	75 \pm 1,7
	5,5 \pm 1,2	59 \pm 1,5	81 \pm 1,8
	6,2 \pm 1,3	74 \pm 1,5	82 \pm 1,6
	29,6 \pm 1,3	88 \pm 1,7	109 \pm 1,6
	63,2 \pm 1,7	110 \pm 1,8	142 \pm 1,7
	86,8 \pm 1,6	148 \pm 1,8	177 \pm 1,8
	104,6 \pm 1,7	198 \pm 1,7	249 \pm 1,9
	116,2 \pm 1,9	239 \pm 1,7	284 \pm 1,9
	129,2 \pm 1,8	273 \pm 1,8	333 \pm 1,8
	153,8 \pm 1,5	341 \pm 1,9	399 \pm 1,7
	185,6 \pm 1,5	406 \pm 1,8	445 \pm 1,9

Při měření delaminace byla uvažována kritická hodnota delaminace 1 500 μm , která byla stanovena na základě dohody mezi zástupci místních výrobců letadel. Na grafu 3, kde jsou hodnoty graficky znázorněny, je tato hranice znázorněna jako „KHD“ (Kritická hodnota delaminace).



Graf 3 – závislost rozsahu delaminace na výstupní straně obrobku na opotřebení vedlejšího ostří jednotlivých nástrojů



Graf 4 – závislost rozsahu delaminace na výstupní straně obrobku na opotřebení vedlejšího ostří jednotlivých nástrojů.

Z výše realizovaného měření lze popsat určitou závislost rozsahu delaminace na opotřebením nástroje. Rozsah delaminace rostl společně s rostoucím opotřebením nástroje. Při vrtání s vrtákem HSS je vidět, že rozsah delaminace rostl poměrně strmě. Podobně tomu bylo při vrtání s vrtákem HSS+TiN. Naopak při vrtání s nástrojem SK byl tento trend zvyšování rozsahu delaminace s opotřebením nástroje výrazně pozvolnější.





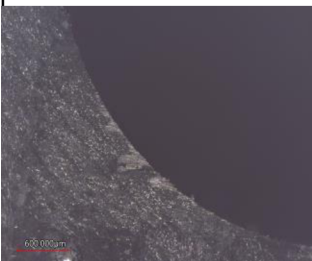
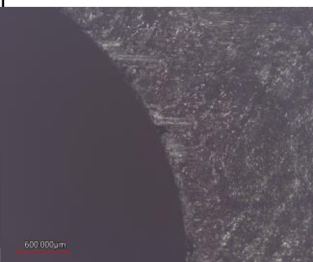
Nejvyšších hodnot delaminace bylo dosaženo s vrtákem HSS+TiN což bylo způsobeno největším opotřebením vedlejšího ostří. Na straně vstupu delaminace dosáhla hodnoty $1\,816 \pm 6 \mu\text{m}$ a na straně výstupu $1\,883 \pm 5 \mu\text{m}$. Obě tyto hodnoty převyšují stanovenou kritickou hodnotu delaminace více než o 20 %. Z toho lze vyvodit, že použití takto opotřebeného nástroje je nevhodné.

Při vrtání s vrtákem HSS bylo dosaženo na straně vstupu hodnoty delaminace $1\,446 \pm 3 \mu\text{m}$ a na straně výstupu hodnoty $1\,589 \pm 4 \mu\text{m}$. Tyto hodnoty neodpovídají předepsaným standardům, a proto je tento vrták s tímto opotřebením také nevhodný.

Naopak při vrtání s nástrojem SK bylo na straně vstupu dosaženo hodnoty $406 \pm 6 \mu\text{m}$ a na straně výstupu hodnoty $445 \pm 4 \mu\text{m}$ při opotřebením vedlejšího ostří $185,6 \pm 1,5 \mu\text{m}$. Tyto hodnoty zdaleka nedosahují hodnot kritické delaminace, a proto by bylo možné s tímto nástrojem pokračovat ve vrtání.

Konečné hodnoty a snímky poškození delaminací jsou přehledně zobrazeny v následující tabulce 9, kde hodnoty přesahující kritickou hodnotu delaminace jsou zvýrazněny červeně.

Tabulka 9 – shrnutí naměřených hodnot na konci experimentu v závislosti na opotřebení vedlejšího ostří jednotlivých nástrojů

Shrnutí naměřených hodnot na konci experimentu			
Nástroj	Opotřebení [μm] \pm Nejistota měření [μm]	Delaminace vstup [μm] \pm Nejistota měření [μm]	Delaminace výstup [μm] \pm Nejistota měření [μm]
HSS	319,2 \pm 1,9	1446 \pm 3 	1589 \pm 4 
HSS+TiN	410,4 \pm 1,5	1816 \pm 6 	1883 \pm 5 
SK	185,6 \pm 1,5	406 \pm 6 	445 \pm 4 

Z výše pořízených snímků je patrné, že se jednalo zejména o vylamování vláken, tedy o delaminaci typu I. (viz. kapitola 2.4.1.1). Vyčnívající vlákna, tedy delaminace typu II., se objevovala také, ale ne tak často jako typ I., který byl měřen.

Dále lze z naměřených hodnot vyvodit, že k většímu rozsahu delaminace dochází při výstupu vrtáku z materiálu.

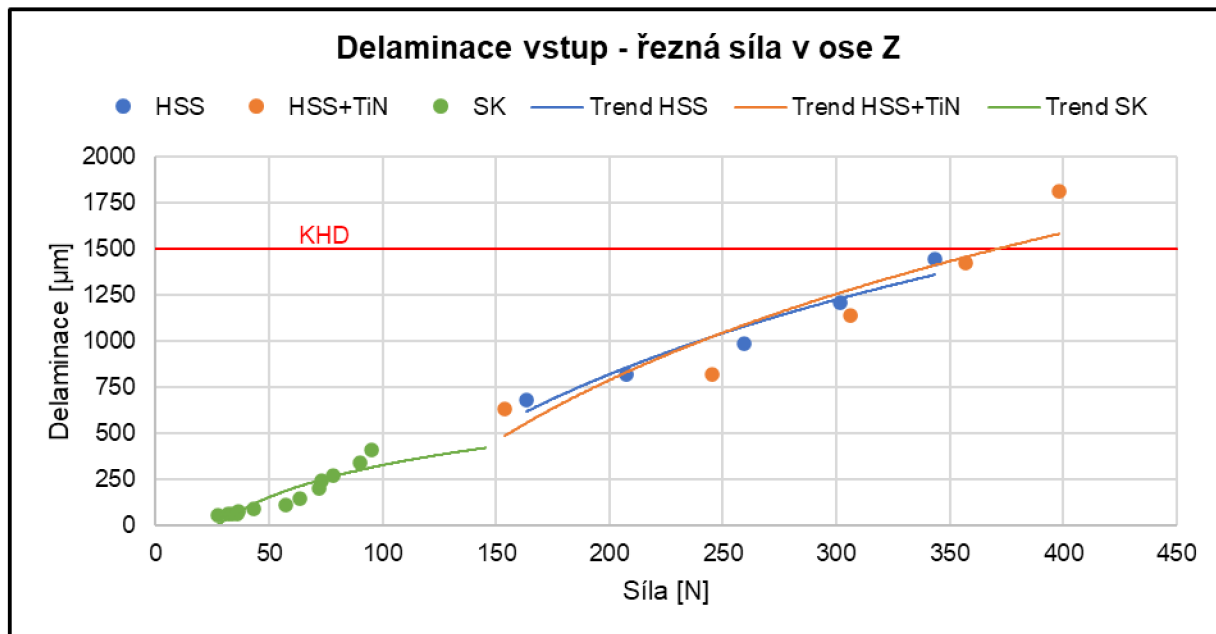
4.3.2 Rozsah delaminace v závislosti na velikosti řezných sil

Níže v tabulce 10 jsou hodnoty rozsahu delaminace v závislosti na velikosti řezných sil.

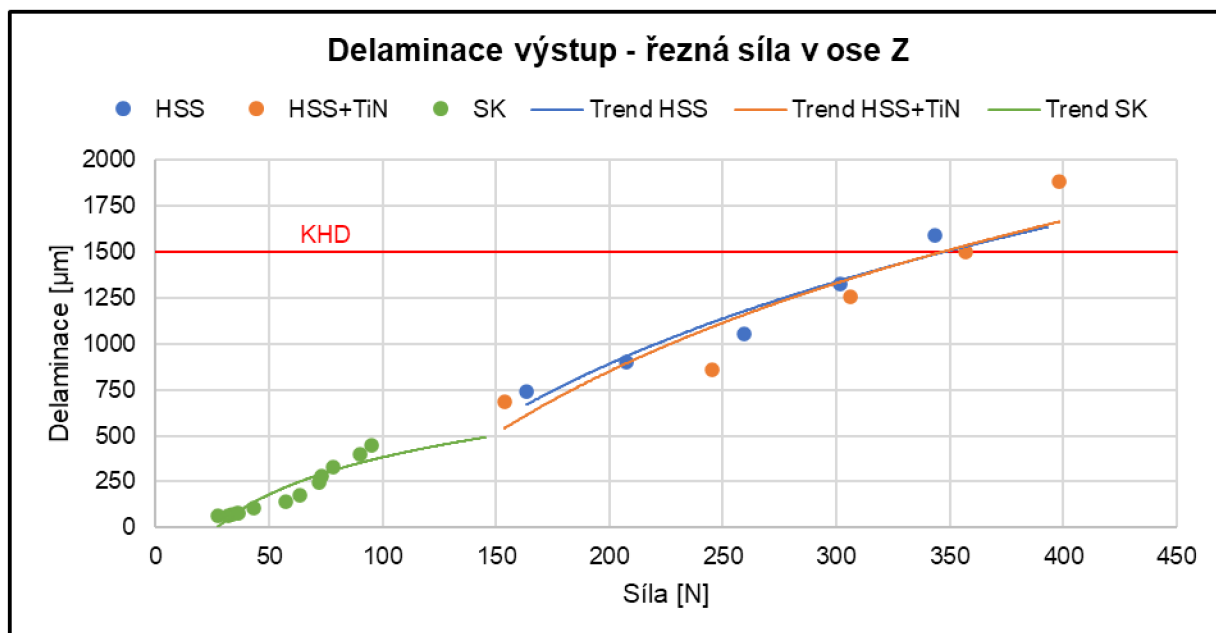
Tabulka 10 – závislost rozsahu delaminace na obou stranách obrobku v závislosti na velikosti řezných sil generovaných jednotlivými nástroji

Rozsah delaminace v závislosti na řezné síle			
Nástroj	Řezná síla v ose Z [N] ± Nejistota měření [N]	Delaminace vstup [μm] ± Nejistota měření [μm]	Delaminace výstup [μm] ± Nejistota měření [μm]
HSS	163,4 ± 1,5	681 ± 1,7	742 ± 1,7
	207,4 ± 1,6	819 ± 1,7	898 ± 1,8
	259,2 ± 1,5	986 ± 1,6	1052 ± 1,7
	301,4 ± 1,5	1210 ± 1,8	1325 ± 1,7
	343,2 ± 1,6	1446 ± 1,8	1589 ± 1,9
HSS-TiN	153,6 ± 1,5	632 ± 1,6	688 ± 1,6
	245,2 ± 1,5	817 ± 1,6	860 ± 1,7
	306,2 ± 1,6	1138 ± 1,7	1255 ± 1,7
	357,2 ± 1,6	1425 ± 1,8	1498 ± 1,8
	398,4 ± 1,7	1816 ± 1,7	1883 ± 1,6
SK	27,4 ± 1,5	57 ± 1,5	64 ± 1,6
	31,8 ± 1,5	61 ± 1,6	68 ± 1,6
	33,4 ± 1,6	61 ± 1,5	75 ± 1,7
	36,2 ± 1,6	59 ± 1,5	81 ± 1,8
	36,4 ± 1,7	74 ± 1,5	82 ± 1,6
	43,2 ± 1,5	88 ± 1,7	109 ± 1,6
	57,2 ± 1,6	110 ± 1,8	142 ± 1,7
	63,8 ± 1,8	148 ± 1,8	177 ± 1,8
	71,8 ± 1,5	198 ± 1,7	249 ± 1,9
	73,4 ± 1,6	239 ± 1,7	284 ± 1,9
	78,4 ± 1,4	273 ± 1,8	333 ± 1,8
	90,2 ± 1,8	341 ± 1,9	399 ± 1,7
	95,2 ± 1,6	406 ± 1,8	445 ± 1,9

Pro lepší představu byly vytvořeny grafické závislosti. Na grafu 5 – delaminace kde vrták vstupuje do materiálu a na grafu 6 – delaminace kde vrták vystupuje z materiálu. V obou grafech je vyznačena stanovená kritická hodnota delaminace KHD.



Graf 5 – grafické znázornění závislosti rozsahu delaminace na vstupu do vrtaného materiálu na velikosti řezných sil jednotlivých nástrojů



Graf 6 – grafické znázornění závislosti rozsahu delaminace na výstupu z vrtaného materiálu na velikosti řezných sil jednotlivých nástrojů

Z výše realizovaného měření lze vyvodit, že existuje určitá závislost mezi rozsahem delaminace a velikostí řezných sil vyvozených nástrojem, a to taková, že rozsah delaminace roste společně s rostoucí řeznou silou v ose Z.

Z grafů lze vyčíst, že trend závislosti rozsahu delaminace na velikosti řezné síly byl nejstrmější s nástrojem HSS+TiN. Tento poznatek platí jak pro stranu, kde nástroj vstupuje do materiálu, tak i pro stranu kde nástroj z materiálu vystupuje.

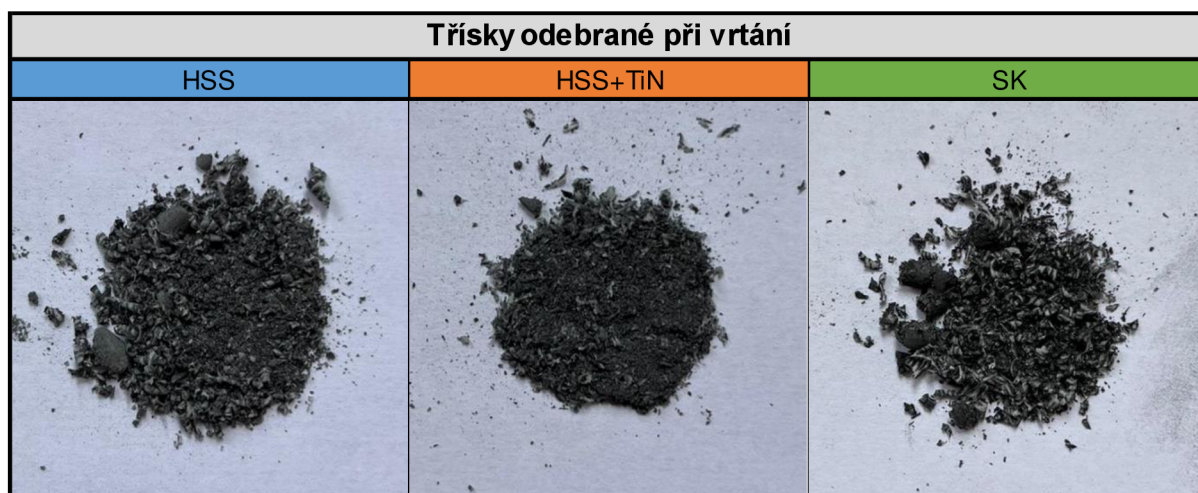
Při vrtání s vrtákem HSS lze tyto trendy přirovnat k trendům, které byly odvozeny z výsledků po vrtání s nástrojem HSS+TiN. Tyto trendy však nestoupaly tak strmě jako s vrtákem HSS+TiN.

Nejmírnějšího stoupání trendu závislosti mezi rozsahem delaminace a velikostí řezné síly si lze povšimnout u vrtání s nástrojem SK. Tento trend je podobný na obou stranách obráběného vzorku.

4.4 Měření třísky

Během vrtání byly odebírány třísky. Třísky byly odebrány přímo z nástroje a blízkého okolí vrtaného otvoru po vyvrtání celkové vzdálenosti 0,1 m. Dle vytvořené metodiky, viz kapitola 3.6.4. Snímky odebraných třísek vzniklých při vrtání s jednotlivými nástroji jsou zobrazeny v tabulce 11.

Tabulka 11 – třísky odebrané při vyvrtané vzdálenosti 0,1 m

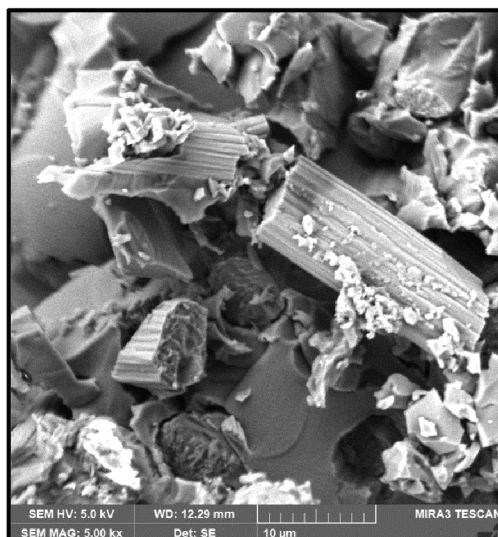


Z výše pořízených snímků lze vyvodit, že nejvíce prachových částic obsažených v odebrané tříске vzniklo při vrtání s nástrojem HSS+TiN. Naopak nejméně prachových částic vzniklo při vrtání s nástrojem SK. Tudíž lze poznamenat, že při obrábění s nástrojem HSS+TiN vzniká vyšší pravděpodobnost vdechnutí nebezpečných prachových částic.

Dále lze z výše realizovaného měření opotřebení nástroje a porovnání vzniklých třísek vyvodit, že existuje závislost mezi velikostí třísek a opotřebením nástroje. Nástroj HSS+TiN, ze kterého byla odebrána tříska s větším obsahem prachových částic dosáhl opotřebení $410,4 \pm 1,5 \mu\text{m}$. Zatímco při vrtání s nástrojem SK, kde vzniklo viditelně méně prachových částic, bylo s nástrojem dosaženo výrazně menšího opotřebení než s nástrojem HSS+TiN, konkrétně $6,2 \pm 1,2 \mu\text{m}$.

Vzhledem k finanční nákladnosti technologie měření, byly pořízeny snímky pouze třísek z vrtání nástrojem SK a nástrojem HSS+TiN. Při vrtání nástrojem HSS byly pozorovány podobné výsledky jako s nástrojem HSS+TiN.

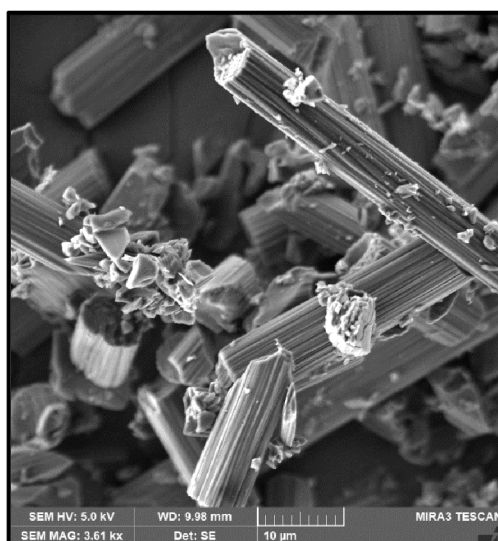
Snímky třísek z vrtání s nástrojem SK jsou na obrázku 18 a z vrtání s HSS+TiN na obrázku 19.



Obrázek 18 – snímek částic uhlíkových vláken v epoxidové pryskyřici vzniklých při vrtání nástrojem SK.

V rámci provedeného měření bylo zjištěno, že při vrtání s nástrojem SK vznikala vlákna v rozmezí délek 0,13 – 55 μm . Docházelo k lomům kolmým k ose vlákna a k vylamování vláken z matrice z důvodu slabé adheze vlákna k matrici, viz obrázek 18.

Při měření délek částice vláken z vrtání nástrojem HSS+TiN byly naměřeny délky vláken v rozmezí 0,21 – 70 μm . Docházelo k lomům ne zcela kolmých k ose vlákna a vlákna byla vytrhávána stejně jako při vrtání s nástrojem SK. Snímek částic z vrtání s HSS+TiN je na obrázku 19.




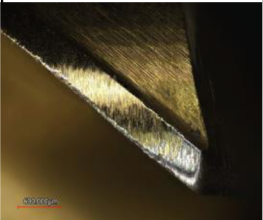




Obrázek 19 - snímek částic uhlíkových vláken v epoxidové pryskyřici vzniklých při vrtání nástrojem HSS+TiN.

4.5 Shrnutí výsledků experimentu

V následující tabulce 12 jsou shrnuty výsledky naměřených hodnot řezných sil v ose Z, opotřebení vedlejšího ostří, delaminace na vstupu do materiálu, delaminace na výstupu z materiálu a cena nástroje při jednotné vrtané dráze.

Tabulka 12 – celkové porovnání naměřených hodnot na konci experimentu

Celkové porovnání na konci experimentu						
Nástroj	Vrtaná dráha [m]	Řezná síla v ose Z [N] ± Nejistota měření [μm]	Opotřebení vedlejšího ostří [μm] ± Nejistota měření [μm]	Delaminace vstup [μm] ± Nejistota měření [μm]	Delaminace výstup [μm] ± Nejistota měření [μm]	Cena [Kč]
HSS	 0,1	343,2 ± 1,6	319.2 ± 1.9	1 446 ± 1,8	1 589 ± 1,9	106,-
						
HSS+TiN	 0,1	398,4 ± 1,7	410.4 ± 1.5	1 816 ± 1,7	1 883 ± 1,6	187,-
						
SK	 0,1	36,4 ± 1,7	6.2 ± 0.2	74 ± 1,5	82 ± 1,6	1 220,-
						

V tabulce jsou jednoduše znázorněny výsledky experimentu. Je vidět, že při hodnotě vyvrtané vzdálenosti 0,1 m dosáhly vrtáky z HSS a HSS+TiN podobných hodnot.

Při sledování řezných sil jednotlivých nástrojů bylo s nástrojem HSS+TiN dosaženo nejvyšší hodnoty, čemuž odpovídalo i opotřebení vedlejšího ostří a poškození okraje díry delaminací z obou stran.

Naopak vrták SK dosáhl ve všech ohledech lepších hodnot. Vykazoval výrazně menší hodnoty generovaných řezných sil, opotřebení i rozsahu poškození delaminací. Nástroj je sice finančně nákladnější, ale v porovnání s nástroji HSS a HSS+TiN

mnohonásobně výkonnější. Z těchto důvodů je nástroj SK výhodnější pro danou operaci.

5. DISKUZE

Hlavním cílem předkládané práce bylo navrhnout vhodný řezný nástroj pro vrtání deskového kompozitního materiálu vyztuženým uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny keprové vazby s orientací vláken pod úhlem 90°.

K dosažení stanoveného cíle bakalářské práce bylo nutné nejprve zvolit řezné nástroje pro tuto aplikaci, navrhnout řezné parametry pro vrtání, metodiku pro provedení experimentu a následně pro měření sledovaných parametrů.

Dále byla pozornost v rámci plánovaného cíle zaměřena na opotřebení nástroje, řezné síly generované nástrojem a poškození delaminací obráběného povrchu.

Základní informace týkající se problematiky vrtání do kompozitních materiálů jsou shrnuty v kapitole 2. Tato kapitola obsahuje informace o kompozitních materiálech na bázi epoxidové pryskyřice a uhlíkových vláken, viz kapitola 2.1. V další kapitole, tedy kapitole 2.2, jsou obsaženy poznatky týkající se problematiky vrtání těchto kompozitních materiálů. Kapitola 2.3 popisuje typy řezných nástrojů a jejich materiály. Je nutné shrnout defekty ke kterým dochází při vrtání, ty jsou popsány v kapitole 2.4. A konec teoretické části pojednává o tvorbě třísky při vrtání, viz kapitola 2.5.

Dosažení požadovaného cíle předkládané práce je věnována celá kapitola 3. Ta obsahuje veškeré informace o průběhu experimentu. Od přípravy zkoumaných vzorků materiálu CFRP, přes použité nástroje, stroje a přípravky až po použitá měřidla a způsob vyhodnocení všech naměřených výsledků.

Z výše provedených měření, kterým je věnována kapitola 4. lze poukázat na následující poznatky:

5.1 Opotřebení nástrojů

Opotřebení nástrojů bylo měřeno pomocí konfokálního mikroskopu KEYENCE VK-X3000, viz kapitola 3.5.1. Princip měření je popsán v kapitole 3.6.1. Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí softwaru Excel.

Z výše realizovaného experimentu a naměřených hodnot lze vyvodit, že opotřebení nástroje roste společně s rostoucí vrtanou vzdáleností.

Hodnoty opotřebení vedlejšího ostří jednotlivých nástrojů po ukončení experimentu v závislosti na celkové vyvrtané vzdálenosti jsou uvedeny v tabulce 13. Naměřené hodnoty, které překročily hodnotu kritického opotřebení $v_B = 300 \mu\text{m}$, jsou v tabulce znázorněny červeně.

Tabulka 13 – výsledné opotřebení nástrojů v závislosti na celkové vyvrtané vzdálenosti

Výsledné opotřebení nástrojů v závislosti na celkové vyvrtané vzdálenosti		
Nástroj	Vzdálenost [m]	Opotřebení vedlejšího ostří [μm] \pm Nejistota měření [μm]
HSS	0,1	319,2 \pm 1,9
HSS+TiN	0,1	410,4 \pm 1,5
SK	5,0	185,6 \pm 1,5

Z výše uvedených hodnot je patrné, že nejvyššího opotřebení došlo při vrtání s nástrojem HSS+TiN. Podobného opotřebení bylo dosaženo s nástrojem HSS, u kterého bylo naměřeno o 22 % menší opotřebení než u nástroje HSS+TiN, ale oba nástroje HSS a HSS+TiN překročily stanovenou hodnotu kritického opotřebení. Nejlepších výsledků, tedy nejmenšího opotřebení, bylo dosaženo s nástrojem SK, u kterého bylo naměřeno opotřebení o 54 % menší než u nástroje HSS+TiN a navíc při 50x vyšší vrtané vzdálenosti.

5.2 Řezné síly

Řezné síly generované vrtacím nástrojem byly měřeny pomocí dynamometru KISTLER a vyhodnoceny pomocí softwaru LabView6.1, viz kapitola 3.5.2. Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí softwaru Microsoft Excel.

Z výše realizovaného experimentu a naměřených hodnot lze vyvodit, že velikost řezných sil generovaných nástrojem během vrtání roste s opotřebením použitého nástroje.

Hodnoty naměřených sil při vrtání s jednotlivými nástroji na konci experimentu v závislosti na opotřebením vedlejšího ostří použitého nástroje jsou zobrazeny v následující tabulce 14.

Tabulka 14 – hodnoty řezných sil na při vrtání na konci experimentu v závislosti na opotřebení vedlejšího ostří použitého nástroje.

Porovnání řezných sil, opotřebení a vrtaných vzdáleností			
Nástroj	Vrtaná vzdálenost [m]	Opotřebení [μm] \pm Nejistota měření [μm]	Řezná síla [N] \pm Nejistota měření [μm]
HSS	0,1	319,2 \pm 1,9	343,2 \pm 3,9
HSS+TiN	0,1	410,4 \pm 1,5	398,4 \pm 6,7
SK	5,0	185,6 \pm 1,5	95,2 \pm 4,9

Z výše zobrazené tabulky X. lze vyčíst, že nejvyšších řezných sil během vrtání bylo dosaženo s nástrojem HSS+TiN. Nástroj HSS vykazoval podobné hodnoty řezných sil, avšak konečná hodnota byla o téměř 14 % nižší než při vrtání s nástrojem HSS+TiN. Zároveň je potřeba uvést, že této hodnoty bylo dosaženo při menším opotřebení, konkrétně o 22 % viz kapitola 5.1. Nejnižších řezných sil bylo dosaženo při vrtání s nástrojem SK, kde bylo dosaženo o 76 % nižší hodnoty než s HSS+TiN.

5.3 Delaminace

Měření delaminace bylo provedeno pomocí konfokálního mikroskopu KEYENCE VK-X3000, viz kapitola 3.5.1. Princip měření popisuje kapitola 3.6.3. Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí softwaru Microsoft Excel.

Z výše realizovaného experimentu a naměřených hodnot lze vyvodit, že rozsah delaminace roste společně s opotřebením nástroje a že rozsah delaminace je na výstupní straně z materiálu vyšší než na straně vstupní.

Hodnoty naměřené delaminace na obou stranách obrobku na konci experimentu v závislosti na opotřebení nástroje jsou zobrazeny v tabulce X. Hodnoty delaminace, které překročily kritickou hodnotu delaminace $KHD = 1\,500\ \mu\text{m}$ jsou vyznačeny červeně.

Tabulka 15 – výsledné hodnoty delaminace na konci experimentu v závislosti na opotřebení vedlejšího ostří jednotlivých nástrojů.

Hodnoty řezných sil na konci experimentu v závislosti na opotřebení vedlejšího ostří			
Nástroj	Opotřebení [μm]	Delaminace A [μm]	Delaminace B [μm]
HSS	319,2 \pm 1,9	1446 \pm 3	1589 \pm 4
HSS+TiN	410,4 \pm 1,5	1816 \pm 6	1883 \pm 5
SK	185,6 \pm 1,5	406 \pm 6	445 \pm 4

Z výše zobrazené tabulky lze vyčíst, že nejhorsích výsledků delaminace na obou stranách obrobku došlo během vrtání s nástrojem HSS+TiN. Obě hodnoty překročily kritickou hodnotu delaminace. Lepších výsledků bylo dosaženo s nástrojem HSS, kde na straně vstupu byla hodnota delaminace nižší 20 % a na straně výstupu o více než 15 %. Nejlepších výsledků bylo dosaženo s vrtákem SK, na straně vstupu byla hodnota delaminace nižší o necelých 78 % a na straně výstupu z materiálu o téměř 77 %.

5.4 Tvorba třísky

Tvar třísek vzniklých při vrtání s jednotlivými nástroji byl zkoumán na pracovišti Katedry materiálů na Technické univerzitě v Liberci a to pomocí elektronového mikroskopu TESCAN MIRA 3 od firmy Tescan Holding, Czech Republic, viz kapitola 3.6.4.

Z výše provedeného experimentu a pořízených snímků lze vyvodit, že při vrtání s nástrojem HSS+TiN vznikaly třísky, kde velikost uhlíkových vláken odpovídala délkovému rozsahu 0,210 – 70 μm , tudíž jsou v tomto rozpětí obsaženy i částice vláken, které jsou snadno vdechnutelné. Při tvorbě třísky docházelo k ostrým lomům, což usnadňuje zabodávání třísek do lidské tkáně.

Při vrtání s nástrojem SK, docházelo ke vzniku třísek, kde velikost uhlíkových vláken odpovídala délkovému rozsahu 0,130 – 55 μm , což znamená, že ve vzniklém prachu jsou i částice menší než 5 μm a hrozí vdechnutí. Hlavním rozdílem mezi vlákny v prachu vzniklém při vrtání s nástrojem SK a HSS+TiN je ten, že při vrtání s SK, docházelo při lámání vláken k lomu kolmému k ose vlákna.

Dále lze vyvodit, že při vrtání s nástrojem HSS+TiN vznikalo výrazně více nebezpečných prachových částic než při vrtání s nástrojem SK.

6. ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce na téma Problematika vrtání do kompozitních materiálů na bázi epoxidové pryskyřice a uhlíkových vláken s ohledem na tvorbu třísky přispívá k rozšíření poznatků o obrábění tohoto typu kompozitních materiálů. Práce byla členěna do 3 hlavních částí.

Teoretická část, tedy kapitola 2, shrnuje poznatky o těchto materiálech, problematice vrtání uhlíkových kompozitů, používaných řezných nástrojích, poruchách, ke kterým dochází při vrtání a teorii tvorby třísky.

Kapitola 3 – Metodika experimentální části popisuje přípravu vzorků materiálu CFRP, volbu nástrojů pro jeho vrtání, stroje použité pro tento experiment, měřidla pro sledování určených parametrů, postup experimentu a principy měření.

Samotný experiment je popsán v kapitole 4. V této části jsou shrnuty všechny naměřené hodnoty, určené nejistoty měření, vypracované přehledné tabulky a grafické závislosti a detailně popsány poznatky ze zaznamenaných hodnot.

Diskuze – kapitola 5, se věnuje shrnutí všech konečných hodnot měření a zpřehlednění poznatků z provedeného experimentu.

A v poslední řadě je potřeba v závěru práce vyzdvihnout nejdůležitější poznatky z realizovaných měření. Lze tedy poukázat na následující:

1. Materiál řezného nástroje má významný vliv na všechny zkoumané parametry v této práci – opotřebení, velikost řezných sil, delaminace a tvar třísky. Jako nejlepší se jeví SK.
2. Hlavním typem opotřebení při vrtání kompozitu je opotřebení otěrem, kterému nejlépe odolával vrták z SK.
3. Během experimentu docházelo nejčastěji k delaminaci typu I., ale objevil se i typ II. a III. Nejmenší rozsah delaminace na obou stranách obrobku byl po vrtání s nástrojem SK
4. I při vrtání vznikají dostatečně malé třísky, které mohou být hrozbou pro lidský organismus. Vhodnější tvaru úlomků vláken obsažených v prachu vzniklém při vrtání bylo dosaženo s vrtákem SK.

5. Vyplatí se investovat do finančně nákladnějšího nástroje z SK, protože je v porovnání s ostatními výrazně výkonnější. Byla s ním během experimentu vyvrtaná 50x větší vzdálenost s polovičním opotřebením.

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FLEK, Jakub. DESTRUKCE VLÁKENNÝCH STRUKTUR PŘI OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S UHLÍKOVOU VÝZTUŽÍ. Diplomová práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2022. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/166697>
- [2] AHMAD, Jamal. Machining of Polymer Composites. online. Boston, MA: Springer US, 2009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68619-6>.
- [3] XU, Jinyang; Chao LI; Sipei MI; Qinglong AN a Ming CHEN. Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria. online. Composite Structures, roč. 201 (2018), s. 1076–1087. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.051>.
- [4] KNAP, Artur. Problematika vrtání do kompozitních materiálů. Diplomová práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2022. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/163470>
- [5] TSAO, C.C. a H. HOCHENG. Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials. online. International Journal of Mechanical Sciences, roč. 49 (2007), č. 8, s. 983–988. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.01.001>.
- [6] DAVIM, J.P a Pedro REIS. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. online. Composite Structures, roč. 59 (2003), č. 4, s. 481–487. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00257-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00257-X).
- [7] GIASIN, Khaled a Sabino AYVAR-SOBERANIS. An Investigation of burrs, chip formation, hole size, circularity and delamination during drilling operation of GLARE using ANOVA. online. Composite Structures, roč. 159 (2017), s. 745–760. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.015>.
- [08] NEJMAN, Dominik. Studie vhodných řezných nástrojů pro vrtání do kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny. Diplomová práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2018. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/152193>

- [9] Kennametal. Pokročilé vrtání kompozitů diamantovými nástroji. Online © 2001. In: *MM spektrum*. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-vrtani-kompozitu-diamantovymi-nastroji>. [citováno 2023-05-25]
- [10] PHAPALE, Kamlesh; Ramesh SINGH a Rkp SINGH. Comparative Assessment of Delamination control techniques in Conventional drilling of CFRP. online. *Procedia Manufacturing*, roč. 48 (2020), s. 123–130. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.028>.
- [11] Iscar. OBRÁBĚNÍ EXOTICKÝCH MATERIÁLŮ. Online © 2020. In: *Iscar*. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/newarticles.aspx/countryid/6/newarticleid/10378>. [citováno 2023-05-25]
- [12] HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [13] VOSS, Robert; Marcel HENERICHS; Stephan RUPP; Friedrich KUSTER a Konrad WEGENER. Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres. online. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, roč. 12 (2016), s. 56–66. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.09.003>.
- [14] FRAUNHOFER IPT. Challenges for drilling. Online © 2023 In: *Project VibroCool*. Dostupné z: <https://www.vibrocool-project.eu/en/overview/challenges.html>
- [15] LI, YuanXiao; Feng JIAO; ZiQiang ZHANG; ZhiBin FENG a Ying NIU. Research on entrance delamination characteristics and damage suppression strategy in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks. online. *Journal of Manufacturing Processes*, roč. 76 (2022), s. 518–531. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.018>.
- [16] YAZMAN, Şakir. The effects of back-up on drilling machinability of filament wound GFRP composite pipes: Mechanical characterization and drilling tests. online. *Journal of Manufacturing Processes*, roč. 68 (2021), s. 1535–1552. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.054>