



## **Diplomová práce**

# **Problematika poškození povrchu při vrtání biokompozitů**

*Studijní program:*

N0715A270015 Materiály a technologie

*Autor práce:*

**Bc. Alois Běla**

*Vedoucí práce:*

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

Liberec 2024



## Zadání diplomové práce

# Problematika poškození povrchu při vrtání biokompozitů

*Jméno a příjmení:*

**Bc. Alois Běla**

*Osobní číslo:*

S22000211

*Studijní program:*

N0715A270015 Materiály a technologie

*Zadávací katedra:*

Katedra obrábění a montáže

*Akademický rok:*

2023/2024

### Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o obrábění (zejména vrtání) biokompozitů vyztužených Iněnými a jinými vlákny. Problematika delaminace, praskání, degradace matrice a tvorby otřepů po obrábění biokompozitů.
2. Volba vhodných řezných nástrojů (geometrie, materiál nástroje) a řezných podmínek bez procesního média.
3. Návrh metodiky experimentů pro vrtání biokompozitních materiálů vyztužených Iněnými vlákny se zaměřením na opotřebení nástroje, delaminaci a tvorby otřepů u obrobeného povrchu biokompozitu.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje, delaminace a tvorby otřepů u obrobeného povrchu biokompozitu.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

*Rozsah grafických prací:*

*Rozsah pracovní zprávy:*

*Forma zpracování práce:*

tištěná/elektronická

*Jazyk práce:*

čeština

### **Seznam odborné literatury:**

1. SHYHA, Islam; HUO, Dehong. Advances in Machining of Composite Materials. Springer International Publishing, 2021.
2. CAMPBELL, Flake C. Structural composite materials. ASM international, 2010.
3. CHRISTENSEN, R. M. Mechanics of composite materials: Courier Corporation. Massachusetts: USA, 2012.
4. KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. Technologie obrábění. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
5. Firemní podklady.

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.  
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 diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

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

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

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si 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 diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

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

# Anotace

Diplomová práce se věnuje studiu a výzkumu problematiky vrtání kompozitních materiálů vyztužených přírodními vlákny.

Hlavní cíl diplomové práce je zkoumání vlivů procesních parametrů na velikost opotřebení řezného nástroje, delaminace a na velikosti prachových částic při procesu vrtání.

Práce se skládá ze čtyř hlavních částí.

Teoretická část této práce se věnuje aktuální charakterizaci biokompozitních materiálů a jejich problémům spojených se zpracováním technologií vrtání.

Metodická část této práce se zabývá návrhem a přípravou experimentu a jeho vyhodnocením. Předepisuje přípravu zkušebních vzorků, použité stroje, řezné nástroje a měřicí přístroje.

Experimentální část této práce se zabývá provedením experimentu a zpracováním získaných výsledků měření.

Závěrečná část této práce se věnuje vyhodnocení a diskusi výsledků.

## Klíčová slova

Vrtání, kompozitní materiály vyztužené přírodními vlákny, opotřebení, delaminace, prachové částice a procesní parametry.

# Annotation

The diploma thesis is devoted to the study and research of drilling of composite materials reinforced with natural fibres.

The main objective of the thesis is to investigate the effects of process parameters on the amount of cutting tool wear, delamination and dust particle size during the drilling process.

The thesis consists of four main parts.

The theoretical part of this thesis is devoted to the current characterization of biocomposite materials and their problems associated with drilling.

The methodological part of this thesis deals with the design and preparation of the experiment and its evaluation. It prescribes the preparation of test specimens, the machines used, cutting tools and measuring instruments.

The experimental part of this work deals with the execution of the experiment and the processing of the obtained measurement results.

The final part of this thesis deals with the evaluation and discussion of the results.

# Keywords

Drilling, natural fibre reinforced composites, wear, delamination, dust chips and process parameters.

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucí této práce paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořákové, Ph.D. za její cenné rady, ochotu, čas a úsilí, které mi při tvorbě této práce věnovala. Dále bych rád poděkoval paní doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D. a pánům Ing. Martinovi Váňovi a Ing. Tomášovi Knápkovi, za jejich ochotu, rady a vstřícnost v praktické části této práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval i své rodině a přátelům, kteří mě při studiu vždy plně podporovali.

# Obsah

<b>Seznam zkratk a symbolů .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2 Teoretická část .....</b>	<b>13</b>
2.1 Biokompozitní materiály .....	13
2.1.1 Typy matrice .....	14
2.1.2 Materiály výztuže .....	15
2.1.3 Aplikace biokompozitních materiálů .....	16
2.2 Současný stav v oblasti vrtání biokompozitních materiálů .....	17
2.2.1 Nástroje pro vrtání .....	19
2.2.2 Řezné podmínky .....	20
2.2.3 Úprava vláken a nasákavost .....	21
2.2.4 Vrtání s podpěrnými deskami .....	23
2.2.5 Delaminace .....	23
2.2.6 Opotřebení nástroje .....	25
2.2.7 Ulpívání kompozitního materiálu na řezném nástroji .....	26
2.2.8 Prachové částice .....	26
<b>3 Metodická část .....</b>	<b>28</b>
3.1 Zkušební vzorky .....	28
3.2 Použité řezné nástroje .....	31
3.3 Řezné podmínky .....	33
3.4 Použitý stroj .....	34
3.5 Vrtací přípravek .....	35
3.6 Podpěrné desky .....	35
3.7 Použité měřicí zařízení a software .....	36
3.8 Měření opotřebení řezného nástroje .....	37
3.9 Měření delaminace .....	37



3.10	Měření prachových částic .....	38
3.11	Postup měření .....	38
<b>4</b>	<b>Experimentální část.....</b>	<b>39</b>
4.1	Hodnocení opotřebení nástroje.....	39
4.2	Hodnocení delaminace obrobeného materiálu .....	48
4.2.1	Hodnocení delaminace s podpěrnými deskami .....	63
4.3	Hodnocení prachových částic .....	68
<b>5</b>	<b>Diskuse výsledků.....</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>80</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>82</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>83</b>
	<b>Seznam grafů .....</b>	<b>85</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>86</b>

## Seznam zkratek a symbolů

3D	[-]	třírozměrný prostor
BKM	[-]	biokompozitní materiál
CFPR	[-]	polymerní kompozit vyztužená uhlíkovými vlákny
$F_D$	[ $\mu\text{m}$ ]	parametr delaminace
$F_{D\text{krit}}$	[ $\mu\text{m}$ ]	limitní hodnota velikosti delaminace
$F_{D\text{vstup}}$	[ $\mu\text{m}$ ]	velikost delaminace na vstupu vyvrtané díry
$F_{D\text{výstup}}$	[ $\mu\text{m}$ ]	velikost delaminace na výstupu vyvrtané díry
$f_n$	[mm/ot]	posuv na otáčku
GFPR	[-]	polymerní kompozit vyztužená skelnými vlákny
HSS	[-]	rychlořezná ocel
HSS-C	[-]	rychlořezná ocel s povlakem karbidu
HSS-Co	[-]	rychlořezná ocel s povlakem kobaltu
HSS-TiN	[-]	rychlořezná ocel s povlakem karbidu titanu
KOM	[-]	Katedra obrábění a montáže
n	[ot/min]	otáčky vřetena
NFPR	[-]	polymerní kompozit vyztužená přírodními vlákny
PČ	[-]	prachové částice
Peel-up	[-]	delaminace vznikající na vstupní straně díry
Push-out	[-]	delaminace vznikající na výstupu z díry
PVC	[-]	polyvinylchlorid
ŘP	[-]	řezné podmínky
SK	[-]	slinutý karbid
V-HSS	[-]	označení vrtáku z HSS použitého v této práci
V-SK	[-]	označení vrtáku z SK použitého v této práci

# 1 Úvod

Kvůli rostoucím obavám o životní prostředí se svět obrací k obnovitelným zdrojům, které mají jasný úkol, a to snížit či úplně zrušit naši závislost na neobnovitelných zdrojích. Jinak tomu není ani v oblasti materiálového inženýrství, kde se inženýři a výzkumní pracovníci snaží neustále vyvíjet nové a nové „zelené materiály“, které by svými vlastnostmi dokázaly nahradit neobnovitelné konvenční materiály, jako jsou kovy a syntetická vlákna. Mezi tyto materiály patří i kompozitní materiály vyztužené přírodními vlákny.

Tyto polymerní kompozitní materiály vyztužené přírodními vlákny velice rychle rostou na popularitě díky svým dobrým vlastnostem a schopnostem nahradit konvekční materiály a kompozitní materiály vyztužené syntetickými vlákny.

Biokompozitní materiály mohou být obrobeny konvekčními i nekonvekčními technologiemi pro získání konečného tvaru. Aktuálně nejvíce používaná technologie při obrábění biokompozitů je vrtání.

Hlavní problém při vrtání biokompozitních materiálů spočívá v jejich anizotropii, která vede k delaminaci, vytahování vláken, vypalování matrice, mikrotrhlinám atd. Mezi další problémy spojené s vrtáním těchto materiálů patří jejich vysoká nasákavost, která zamezuje využití kapalin v procesu.

Předkládaná diplomová práce se zabývá výzkumem problematiky vrtání do kompozitních materiálů vyztužených lněnými vlákny.

Diplomová práce se věnuje výzkumu vlivů procesních parametrů na velikost opotřebení řezného nástroje, delaminace (na vstupu a výstupu vyvrtané díry) a na velikosti škodlivých prachových částic při vrtání kompozitního materiálu vyztuženého lněnými přírodními vlákny s tkaninou keprové vazby 2/2 s orientací vláken 90°. Sledované procesní parametry byly materiál, geometrie řezného nástroje a řezné podmínky.

Diplomová práce je rozdělena do čtyř hlavních částí.

Teoretická část této práce se věnuje aktuálním otázkám problematiky vrtání biokompozitních materiálů. Charakterizuje biokompozitní materiály a jejich problémy spojené se zpracováním technologií vrtání.

Metodická část této práce se zabývá návrhem a přípravou experimentu. Předepisuje přípravu zkušebních vzorků, použité stroje a zařízení, řezné nástroje a měřicí přístroje. Dále definuje postup vyhodnocení získaných výsledků měření.

Experimentální část této práce se zabývá realizací navrhnutého experimentu, zpracováním získaných výsledků měření a vyvozením závěrů.

Závěr práce je věnován celkovému vyhodnocení a diskusi získaných výsledků z realizovaného experimentu.

## 2 Teoretická část

Teoretická část této práce se zabývá dosavadními poznatky o biokompozitních materiálech. Dále obsahuje informace o současném stavu problematiky vrtání do biokompozitních materiálů a procesních parametrech, které ovlivňují tento proces. Dosavadní poznatky o biokompozitních materiálech se nacházejí v podkapitole 2.1 a problematika vrtání do těchto materiálů a procesní parametry v podkapitole 2.2.

### 2.1 Biokompozitní materiály

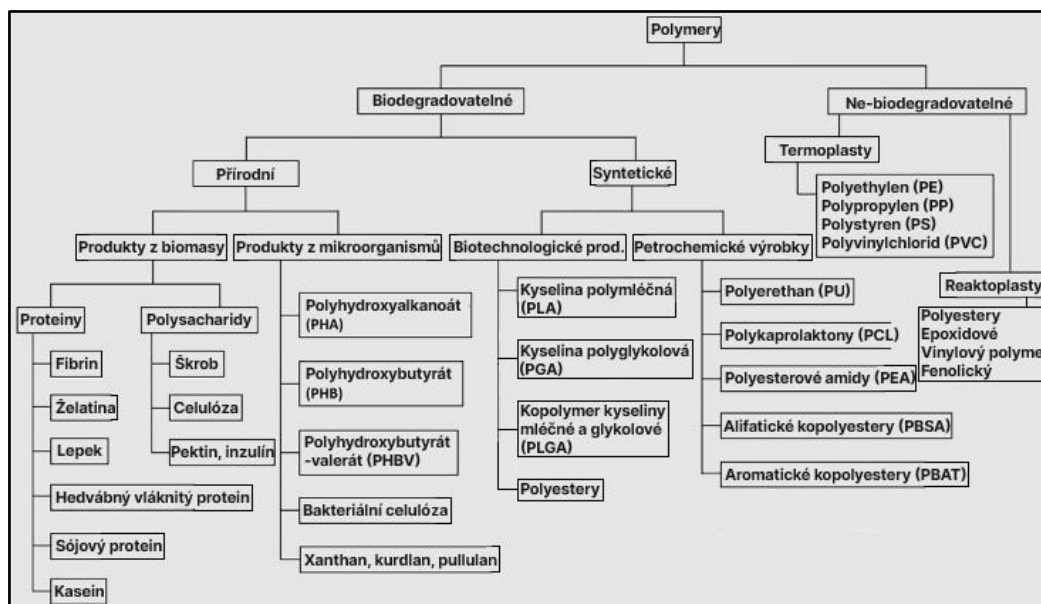
Biokompozitní materiály (dále jen BKM) se jako všechny kompozitní materiály dle definice skládají ze dvou nebo více fází (složek) rozdílných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností. Spojitou fází tvoří matrice a nespojitou fází tvoří výztuž (v literatuře též pod názvem disperze). Výztuž kompozitů drží a spojuje dohromady materiál matrice. Úlohou matrice je vzájemně spojovat vyztužující fázi, přenášet do ní zatížení a chránit ji před vlivy okolí. [1]

BKM můžeme dělit na částečné, nebo úplné. Částečné BKM jsou tvořeny alespoň jednou „bio“ složkou, např. matrice na bázi ropy v kombinaci s přírodními vlákny, nebo bio-matrice v kombinaci se syntetickými vlákny. Vzhledem k ochraně životního prostředí je však kladen velký důraz na úplné BKM, tzv. zelené kompozity, které se skládají z bio-matrice a přírodních vláken a jsou biologicky degradovatelné.

Kladnými vlastnostmi BKM jsou relativně dobré specifické mechanické vlastnosti, izolační vlastnosti (tepelné i akustické), CO<sub>2</sub> neutralita, dobré tlumicí vlastnosti, vysoká zdravotní nezávadnost, dobrá odolnost proti únavě, otěru a korozi, nízká hustota a nízká hmotnost. Mezi nevýhody řadíme nízkou odolnost proti vlhkosti (hydrofilnost), možnou nekompatibilitu vláken a matrice, hořlavost, špatné elektrické vlastnosti, problémy spojené s výrobou a zpracováním a vysoce anizotropní vlastnosti. [2]

## 2.1.1 Typy matrice

Matrice BKM jsou tvořeny z polymerů. Polymerní matrice můžeme dělit na biologicky degradovatelné a nedegradovatelné, viz. obr. 1. Termoplasty a reaktoplasty se řadí mezi biologicky nedegradovatelné. Biologicky degradovatelné polymery lze obecně dělit na dva typy, a to na polymery získané z přírodních zdrojů a synteticky vytvořené.



**Obr. 1** – Rozdělení polymerních matric BKM [2]

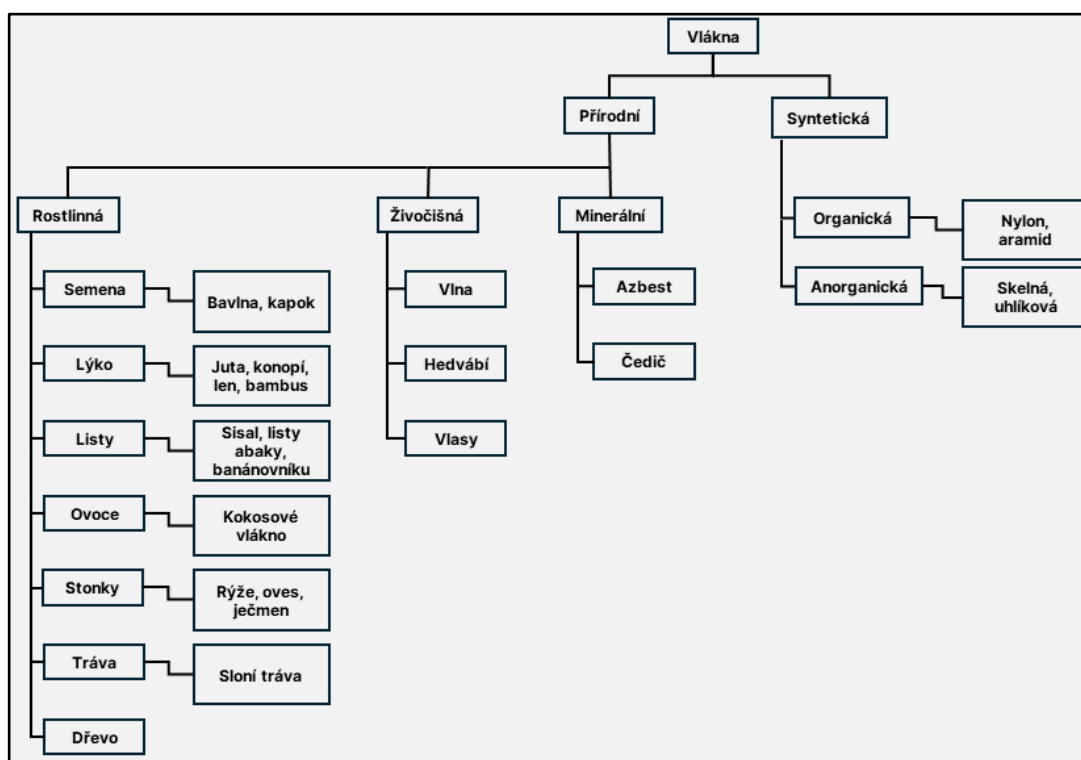
Termoplastické a reaktoplastické polymerní matrice jsou nejčastěji používané při výrobě BKM. Zejména jsou využívány reaktoplastické polymerní matrice, a to díky svým poměrně vysokým mechanickým vlastnostem a nízké ceně výroby. [2] [3] V budoucnu však můžeme očekávat zvýšení poptávky a vědecký pokrok v oblasti biologicky degradovatelných polymerních matric, jelikož v kombinaci s přírodními vlákny nabízejí slibné vlastnosti, udržitelnost, nízkou hustotu vs. pevnost, levné suroviny pro výrobu a nízkou spotřebou energie na jejich vývoj (4 GJ/t ve srovnání např. se skleněnými vlákny 30 GJ/t). [4]

Povahu polymerní matrice daného biokompozitu může být volena na základě její tepelné, mechanické a aplikační oblasti. Dále též např. v závislosti na hmotnosti. [3]

## 2.1.2 Materiály výztuže

Výztuž, též disperze, BKM mohou tvořit přírodní, nebo syntetická vlákna, viz obr. 2. Přírodní vlákna se dělí na rostlinná, živočišná a minerální. Syntetická vlákna jsou pak dělena na organická a anorganická. V praxi se podoba výztuže vyskytuje ve formě krátkých a dlouhých vláken, desek a částic. [5]

Materiál výztuže určuje mechanické vlastnosti BKM, modul pružnosti v tahu a mechanickou odolnost. [3]



*Obr. 2 – Rozdělení výztuže BKM [2]*

Přírodní vlákna mají tendenci vykazovat nízkou adhezi ke standardně využívaným pryskyřicím. Tato skutečnost může vést k různým problémům, jako je zvýšená porozita, neprosycení nebo delaminace jednotlivých vrstev či dokonce vláken ve svazcích. Abychom zvýšili adhezi, je nutné upravit vlákna pomocí různých metod, např: fyzikální nebo chemické úpravy. Tyto úpravy jsou klíčové pro použitelnost běžných vláken v kompozitech. Uživatel by měl ověřit vhodnost těchto vláken pro konkrétní systém matrice u výrobce vláken. Je také nutné poznamenat, že tento problém může nastat jak u termoplastických, tak u reaktoplastických maticí. [25]

### 2.1.3 Aplikace biokompozitních materiálů

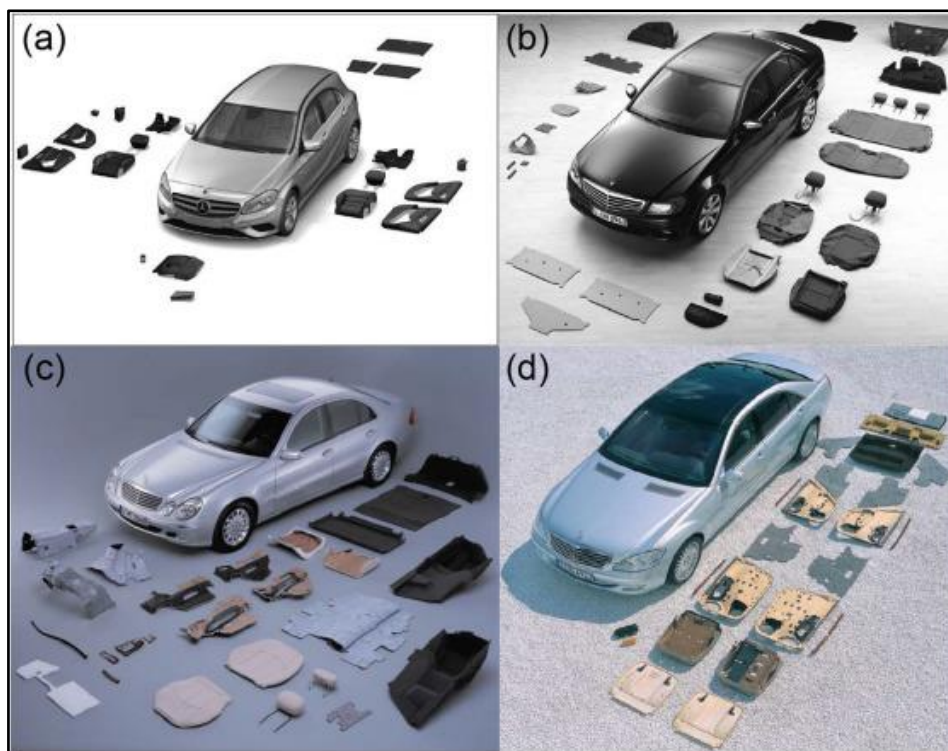
Kompozitní materiály vyztužené přírodními vlákny se široce uplatňují v automobilovém průmyslu, viz. tab. 1. Odhaduje se, že 75 % spotřeby paliva přímo souvisí s hmotností vozidla, přičemž každé 10% snížení hmotnosti vozidla vede k 6-8% nárůstu úspory paliva a každých 100 kg úspory hmotnosti v automobilovém průmyslu vede ke snížení emisí CO<sub>2</sub> u běžně používaných pohonných jednotek přibližně o 20 g/km. [6]

BKM však nejsou úplnou novinkou v automobilovém průmyslu, již v roce 1930 se automobilka Ford pustila do vývoje těchto materiálů pro automobilové využití. Od roku 1990 používá automobilka BMW tyto materiály ve svých vozech M3, M5 a M7. Mercedes-Benz poté v modelech třídy-A, třídy-C, třídy-E a třídy-S, viz. obr 3. V roce 2019 oznámila automobilka Porsche, že jejich vůz 718 Cayman GT4 Clubsport je vůbec prvním sériově vyráběným závodním vozem, který má panely karoserie vyrobené z kompozitního materiálu z přírodních vláken. [6]

**Tab. 1** – Ukázka využití BKM v automobilovém průmyslu [6]

<b>Automobilka</b>	<b>Druh použitých vláken</b>	<b>Aplikace</b>
<b>Volkswagen</b>	len, sisal	Výplně dveří, opěradla sedadel, výplně víka pátých dveří atd...
<b>BMW</b>	len, sisal, dřevo, bavlna	Výplně dveří, výplně stropu, obložení zavazadlového prostoru, opěradla sedadel, protihlukové panely atd...
<b>Ford</b>	kenaf, konopí, rýžové slupky	výplně dveří, vložky zavazadlového prostoru, držáky kabeláže, úložné prostory atd...
<b>Mercedes-Benz</b>	konopí, sisal, len, bavlna	Vnitřní výplně dveří, výplně dveří, zapouzdření motoru, kryty zavazadlového prostoru





*Obr. 3 – Využití BKM ve vozech značky Mercedes-Benz [6]*

Na obr. 3 můžeme vidět využití BKM na vozech značky Mercedes-Benz, a to konkrétně na modelech (a) třídy-A, (b) třídy-C, (c) třídy-E a (d) třídy-S.

Další aplikace BKM se nalézají v oblastech leteckého průmyslu, biomedicínského inženýrství, námořnictví, sportu, balení, elektronice, zdravotnictví atd. [2]

## 2.2 Současný stav v oblasti vrtání biokompozitních materiálů

BKM nacházejí uplatnění v rozsáhlých odvětvích průmyslu a služeb. Z tohoto důvodu musí být zpracovány a opracovány tak, aby vyhovovaly požadavkům aplikace. Při výrobě dílu z BKM je velmi složité vytvářet otvory, výřezy, drážky atd., aniž by nedošlo k ovlivnění systému vláken. [2]

V kompozitních materiálech ovlivňuje výkonnost při obrábění profil výztuže. Profil představuje uspořádání vláken, objemový podíl vláken a architektura vláken. Kompozitní materiály díky anizotropní odezvě vykazují značný rozdíl v obrábění ve srovnání s homogenními materiály, a to z důvodu, že dochází k obrábění minimálně dvou materiálů najednou (matrice a výztuž). Z těchto důvodů je složité zkoumat odezvy BKM na obrábění.

Při obrábění BKM se objevuje řada problémů, jako například: [2]

- výztuže mají obvykle vysokou pevnost, což způsobuje, že se systém složitě obrábí, a to vede k opotřebení sestavy řezného nástroje,
- biokompozitní lamináty jsou vyrobeny z mnoha vrstev, což může vést k delaminaci,
- vysoká nasákavost těchto materiálů brání ve využití kapalin v procesu obrábění. [2]

Je velice důležité zaměřit se právě na problémy spojené s obráběním BKM. Odhaduje se, že až 60 % všech vyřazených dílů je způsobeno špatnou kvalitou dřer, a protože se díry vrtají v poslední fázi výroby, vede vyřazení dílů kvůli špatné kvalitě dřer k velkým ekonomickým ztrátám. [9] Tyto defekty, vznikající v procesu obrábění, lze eliminovat přímým sledováním a kontrolou vyvolaných poškození (delaminace, drsnost povrchu, mikrotrhliny, vypalování matrice nebo vláken atd.) nebo nepřímým sledováním obráběcích sil a teplot. [12]

Kvalita obrobeného povrchu BKM závisí na procesních parametrech, jako je rychlost posuvu, řezná rychlost, materiál a geometrie řezného nástroje atd. Volba optimálních procesních parametrů je velice důležitá pro získání výsledného obrobku vysoké jakosti. Z tohoto důvodu je nezbytné studovat jejich odezvy (delaminace, drsnost povrchu, opotřebení řezného nástroje apod.).

Práce BELAADI a spol. [32] se zabývala zkoumáním faktoru delaminaci při vrtání BKM (juta / polyester; vrták do dřeva o průměrech 5, 7 a 10 mm) a následnou optimalizací procesu pro snížení výsledné delaminace. Bylo zjištěno, že faktor delaminace nejvíce ovlivňuje rychlost posuvu, délka vláken výztuže a průměr vrtáku. Faktor delaminace se zvětšoval s vyšší délkou vláken, vyšší rychlostí posuvu a větším průměrem vrtáku. Dalším zjištěným ovlivňujícím faktorem je způsob výroby kompozitního laminátu. Vyšší míra pórovitosti vede k vyšší delaminaci.

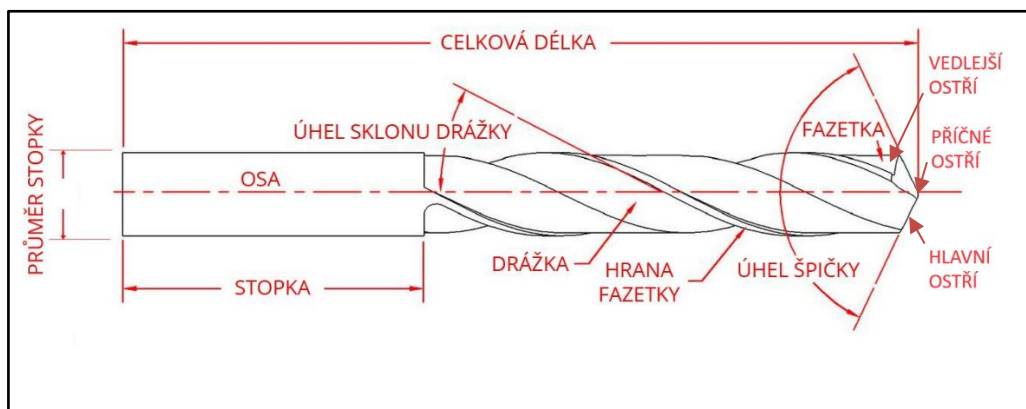
Tato práce se dále zabývá pouze delaminací, opotřebením a velikostí prachových částic („třísek“), které vznikají v procesu obrábění BKM.

### 2.2.1 Nástroje pro vrtání

V průmyslu se používá velké množství vrtáků, které lze dělit dle mnoha různých parametrů (geometrie, materiálu, oblasti použití atd.). [7] Pro kompozitní materiály se obecně doporučují vrtáky se speciálními geometriemi (vícehrotý šroubovitý vrták, stupňovitý vrták atp.). Při použití klasické geometrie šroubovitého vrtáku se doporučuje co nejmenší velikost příčného ostří. Velikost příčného ostří může mít za následek negativní vliv na proces řezání, který vede vlivem negativního úhlu čela ke zvýšení odporu materiálu proti vniknutí řezného nástroje. Dále kvůli nízké řezné rychlosti se materiál spíše vytlačuje než řeže. Negativní úhel čela a nízká rychlost může vést až ke vzniku delaminace materiálu. [8] Podle práce LOFTI a spol. [9] je k vrtání optimální využívat vrtáky menších průměrů s úhlem špičky  $118^\circ$  k docílení dobré jakosti vyvrtaných děr.

Materiál řezného nástroje má společně s jeho geometrií velký vliv na výslednou kvalitu děr. Různé řezné materiály nebo povlaky mohou vést k rozdílným výsledkům pro daný obráběný materiál. Práce BENYETTOU [10] sledovala chování BKM (datlové palmové vlákno / polyester), který byl vrtán šroubovitými HSS vrtáky s povlaky (HSS-TiN, HSS-C a HSS-Co). Nejlepší kvality díry s ohledem na delaminaci bylo dosaženo vrtákem z HSS-Co. Naopak optimální kruhovitosti bylo dosaženo vrtákem HSS-TiN. Nejlepší válcovitosti poté vrtákem HSS-C.

Pro tuto práci byly zvoleny šroubovité vrtáky z HSS a SK bez povrchové úpravy, viz. obr. 4.



**Obr. 4** – Technické názvosloví jednotlivých částí vrtáku [11]

## 2.2.2 Řezné podmínky

### Posuv na otáčku $f_n$

Posuv na otáčku  $f_n$  je velice důležitým procesním parametrem při vrtání BKM. Volbou optimálního nastavení posuvu na otáčku lze získat obrobek bez poškození. Z nepřímého posuzování působících sil v procesu vrtání bylo zjištěno, že se zvyšujícím se posuvem na otáčku roste i velikost působících sil v procesu. Vrták je se zvyšujícím se posuvem na otáčku vystaven větší tloušťce nebo ploše průřezu neobrobeného nebo nedeformovaného materiálu. Tloušťka třísky má také tendenci se zvětšovat se zvyšujícím se posuvem na otáčku. Poškození vyplývající z vyšších působících sil se tedy také zvyšuje se zvýšením posuvu na otáčku. Pro BKM se doporučuje nižší posuv na otáčku během vrtání, aby se získal povrch bez poškození. Při nižším posuvu na otáčku je interakce řezného nástroje s kompozitním laminátem větší. Tření vlákna nástrojem vede k vyšší teplotě procesu. Procesní teplota v rámci teploty skelného přechodu má za následek snadné opracování kompozitů změkčením polymerní matrice. [12]

## Řezná rychlost $v_c$

Řezná rychlost  $v_c$  je oproti vlivu posuvu na otáčku a řeznému nástroji obecně brána jako méně významný parametr, který přispívá k poškození způsobené vrtáním. Vyšší otáčky vřetena se doporučují pro generování nižší řezné síly a snížení poškození při obrábění biokompozitů. Důvodem je nižší odolnost proti proříznutí v důsledku měknutí polymerní matrice v důsledku vyšší procesní teploty. Aby bylo dosaženo nepoškozeného a kvalitně obrobeneho povrchu, je nezbytné vyhodnotit optimální nastavení otáček vřetena. [12]

Práce TABETA a spol. [13] zkoumala vliv a optimalizaci procesních parametrů na BKM (obousměrné jutové vlákno a polymer vyztužený korkem) při vrtání (šroubovitý vrták HSS-TiN a vrták do dřeva HSS; oba vrtáky  $d = 5, 7$  a  $10$  mm). Zjistili, že význam materiálu a rychlosti posuvu ve vztahu k průměru vrtáku má na faktor delaminace převažující vliv. Dále bylo zjištěno, že otáčky vřetena nemají na tento faktor žádný vliv. Podíl jednotlivých prvků na optimálních podmínkách vrtání je následující: rychlost posuvu (66,04 %), průměr vrtáku (10,54 %) a následně otáčky vřetena.

## 2.2.3 Úprava vláken a nasákavost

### Úprava vláken

Přírodní vlákna (výztuž) mohou před výrobou kompozitního laminátu projít různými úpravami, viz. bod 2.1.2. Tyto úpravy mají za následek zvýšení adheze mezi výztuží a matricí, což také vede ke zvýšení mechanických vlastností výsledného kompozitu. [12] [25] Práce SARIKANATA a spol [26] zjistila, že ošetření lněných vláken vzduchovou plazmou při výkonu plazmatu 300 W po dobu 2 minut vedlo k významnému zlepšení mechanických vlastností polyesterových kompozitů vyztužených lněnými vlákny. Konkrétně se pevnost v tahu, pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu a mezilamelová pevnost ve smyku zvýšily o 34 %, 31 %, 66 % a 39 %, a to především díky lepší adhezi mezi ošetřenými vlákny a polyesterovou matricí.

## Nasákavost

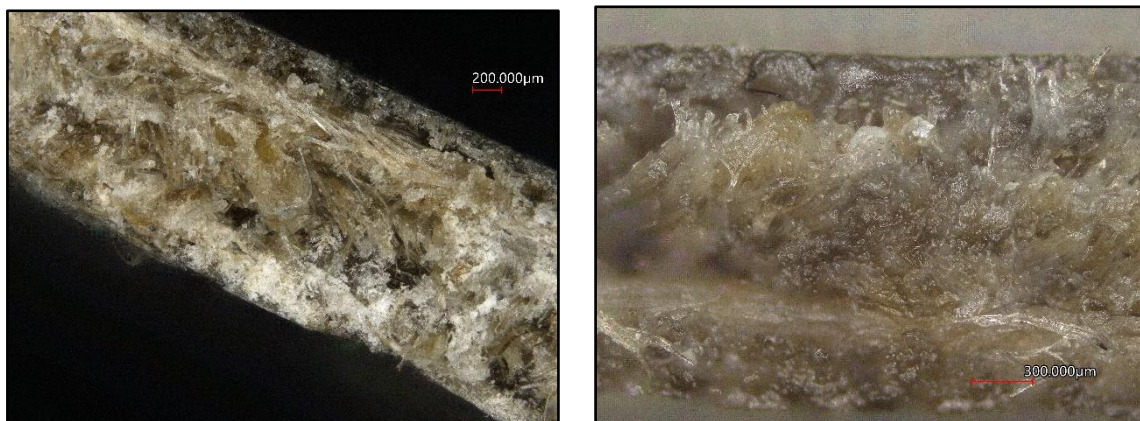
Vysoká nasákavost kompozitních materiálů s přírodními vlákny představuje jejich nejvíce limitující vlastnost. Hlavní problém nasákavosti spočívá v oslabení rozhraní mezi výztuží a matricí. Toto oslabení má za následek snížení schopnosti přenosu zatížení z matrice na výztužná vlákna a výrazné zhoršení celkových mechanických vlastností. Podle DKALA a spol. [27] dochází k absorpci vody podél rozhraní mezi vlákny a matricí, což může vést k bobtnání vláken nebo k hydrolytickému rozpadu vláken či chemické vazbě mezi vláknem a matricí. Bobtnání vláken může mít za následek napětí na rozhraní, což vede ke vzniku mikrotrhlin, které mohou podporovat další transport vody v kompozitu. Práce PRASANNA VENKATESHA a spol. [28] studuje nasákavost na různá složení BKM a hybridních BKM (sisal/bambus; nenasyčená polyesterová pryskyřice). Zjistili, že čistě bambusová a sisalová výztuž má nasákavost vody 16,8 % a 20,9 %. Nejlepší výsledek pak nabízí hybridní kompozit 50/50 bambus/sisal s chemicky upravenými vlákny o hodnotě 9,3 %.

Z důvodu výše popsaných je tedy nemožné pro obrábění BKM využití chladicího média. Obrábění musí probíhat tzv. na sucho, aby nedošlo k ovlivnění struktury a vlastností finálního kompozitu.

Obrázky 5 a 6 ukazují nasákavost BKM (použitého v této práci). Na vzorek byla nanesena emulze v podobě kapek. Obrázky byly vytvořeny po jedné minutě působení.



**Obr. 5** – Ukázka nasákavosti spodní strany BKM, vlevo před a vpravo po



*Obr. 6 – Ukázka nasákavosti spodní strany BKM, vlevo před a vpravo po*

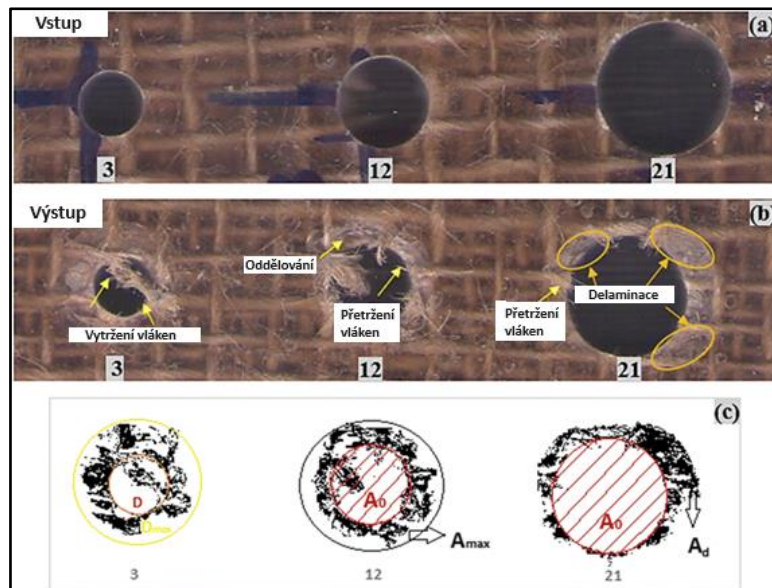
## 2.2.4 Vrtání s podpěrnými deskami

Podpěrné desky lze v průmyslové praxi použít ke snížení poškození způsobeného vrtáním a k zajištění dobré kvality výsledného otvoru. Podpěrné desky se občas označují jako "vstupní desky" a "opěrné desky" pro přední, resp. zadní část. [14]

Materiál podpěrných desek volíme dle daného obráběného materiálu. Při správné volbě bude docházet ke snížení poškození, např. delaminaci. Při jejich špatné volbě může být účinek opačný, tedy vést k většímu či jinému poškození, např. poškrábání povrchu obrobku. Dále je důležité dbát na materiál podpěrných desek z pohledu opotřebení řezného nástroje a na přípravu samotných podpěrných desek. Desky, které budou přispívat k vyššímu opotřebení řezného nástroje, povedou k nižší efektivnosti a zvyšování nákladů. Příprava desek vede k vyšším výrobním časům a nákladům. [14]

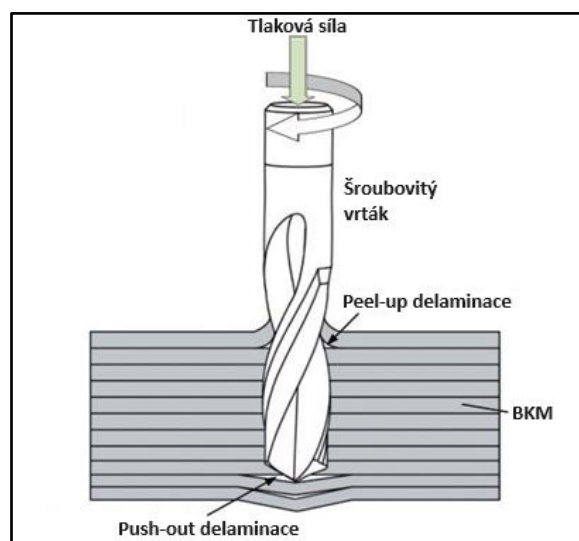
## 2.2.5 Delaminace

Delaminace je nejviditelnější defekt, který vzniká při obrábění BKM. K delaminaci obecně dochází oddělováním vrstev kompozitního laminátu. Při operaci vrtání se delaminace rozlišuje na delaminaci, která vznikne na začátku a konci díry, tedy vstupu a výstupu vrtáku. Delaminace na začátku díry je výsledkem kroutícího momentu a nemusí být vždy přítomna. Delaminace na konci díry je výsledkem tahové síly a na rozdíl delaminace na vstupu je mnohem více znatelná a nebezpečná (snižuje jakost díry, a tím i celkovou pevnost kompozitu), viz. obr. 7. [12]



**Obr. 7 – Poškození BKM při vrtání – delaminace [15]**

Jakmile vrták začne pronikat do kompozitního laminátu, nejvrchnější vrstva laminátu se odře a působením šroubovitého vrtáku se posune nahoru. Jak řezný nástroj postupuje s posuvem směrem dolů, obroušená vrstva se šroubovitě stáčí spolu s drážkou vrtáku, což vede k oddělení jedné vrstvy laminátu od druhé. Když příčné ostří řezného nástroje dosáhne nejspodnější vrstvy kompozitního laminátu, tlačí na spodní vrstvu působením tlakové síly. V důsledku tohoto působení klesá pevnost spodních vrstev mezilaminárního spoje, a nakonec se odtahuje. Následným působením hlavního ostří se delaminace zvětšuje, viz. obr. 8. [12]



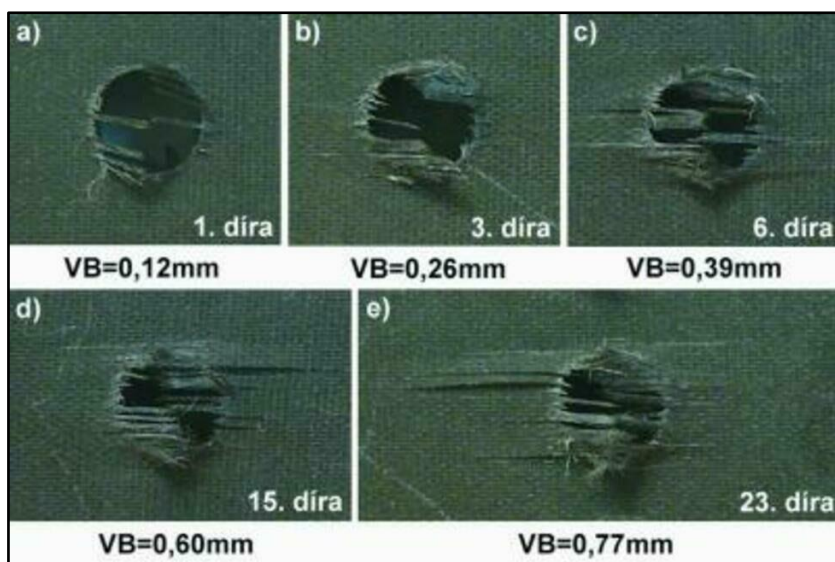
**Obr. 8 – Princip vzniku delaminace při vrtání [16]**



## 2.2.6 Opatření nástroje

Opatření řezného nástroje je přímo závislé na silách, které v procesu obrábění vznikají. Při vrtání se hlavní působící síla nazývá tlaková a působí v ose řezného nástroje, viz. obr. 8. Čím vyšší tato síla bude, tím rychleji se bude řezný nástroj – vrták opotřebovávat. Tato tlaková síla je přímo úměrná procesním parametrům, mezi které patří materiál obrobku, materiál a geometrie řezného nástroje, řezné podmínky atd.

Vliv opotřebení řezného nástroje je velice důležité sledovat z důvodu jakosti výsledného produktu. Opatřebovaný řezný nástroj ztrácí svoji původní geometrii, což vede ke zvyšování řezných sil, teploty v místě řezu, zhoršení jakosti obrobku (rozměrová přesnost, drsnost povrchu atd...) a jeho poškození (delaminace atd...), viz. obr. 9.



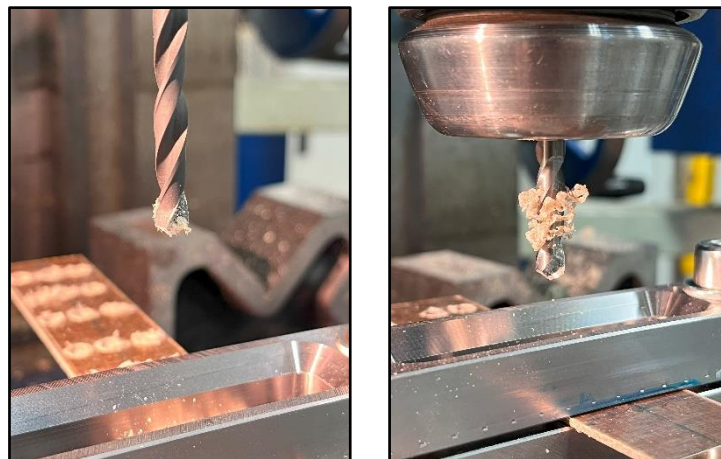
*Obr. 9 – Ukázka vlivu opotřebení na kompozitní materiál [17]*

Kompozitní materiály, např. s uhlíkovými vlákny, jsou známy svou vysokou abrazivitou, která např. u vrtáků z HSS vede k velice krátké životnosti i se správně zvolenými řeznými podmínkami. Je tedy nutné použití tvrdších materiálů nebo povrchových úprav řezného nástroje. Naopak BKM se díky přírodním vláknům a polymerní matici vyznačují nižší tvrdostí a abrazivitou, která dovoluje využití HSS vrtáků.

JAYABAL a spol. [24] se ve své práci zabývali výkonem při vrtání otvorů (HSS šroubovitě vrtáky) v kompozitním materiálu (kokosové vlákno/polyester). Bylo zjištěno, že výkon vrtáku o průměru 6 mm je pozoruhodný, protože vytváří minimální síly a opotřebení řezného nástroje ve srovnání s vyššími průměry vrtáků. Práce REZGHI MALEKA a spol. [29] vrtala BKM (lén/epoxidová pryskyřice), za použití šroubovitých vrtáků (HSS a SK). Zjistili, že na rozdíl od CFRP a GFRP kompozitů, jejichž předností je vysoká abrazivita a způsobují opotřebení řezného nástroje, jsou kompozity NFRP měkké a neabrazivní, proto nezpůsobují opotřebení řezného nástroje a velmi dobře se s nimi pracuje i se šroubovitými vrtáky z HSS.

### 2.2.7 Ulpívání kompozitního materiálu na řezném nástroji

Mezi další negativní vlivy při obrábění BKM patří ulpívání materiálů obrobku na řezném nástroji, viz. obr. 10. Materiál, který takto ulpí na řezném nástroji, může následně přebírat jeho řeznou funkci, např. jako nárůstek při obrábění kovových materiálů. Z tohoto důvodu je nutné řezný nástroj správně očistit před každým obráběním.



*Obr. 10 – Ukázka ulpívání BKM na vrtáku z HSS (vlevo) a SK (vpravo)*

### 2.2.8 Prachové částice

Prachové částice – třísky (dále jen PČ; v literatuře též jako pevné částice) se z kompozitních materiálů uvolňují během obráběcích operací. Tyto částice mohou nabývat různých tvarů, velikostí a chemického složení. Obecně se za zdraví škodlivé PČ berou částice, které mají aerodynamický průměr menší nebo roven 10  $\mu\text{m}$ , a to z důvodu, že takto malé částice již dokáží proniknout do dýchacích cest a popř. i do krevního oběhu. [18] [19] [20]

**Tab. 2** – Ukázka značení a obecných vlastností prachových částic [18]

<b>Značí</b>	<b>Aerodynamický průměr [μm]</b>	<b>Vlastnosti</b>
<b>hrubé částice</b>	10 – 2,5	Klesají k zemského povrchu v řádu hodin, max. dnů.
<b>Jemné částice</b>	2,5 – 1	V atmosféře zůstávají i několik týdnů. Možný přenos na dlouhé vzdálenosti.
<b>Ultrajemné částice</b>	1 a menší	Částice jsou schopny pronikat do krevního oběhu

Aerodynamický průměr představuje průměr koule s hustotou  $1000 \text{ kg/m}^3$  se stejnou rychlostí usazování, jakou má příslušná částice za obvyklých podmínek teploty, tlaku a relativní vlhkosti. [18]

Zdravotní dopady inhalovaných částic závisí na jejich velikosti, tvaru a chemickém složení. Pokud se zaměříme pouze na velikost částic v souvislosti s jejich potenciálními negativními účinky na lidské zdraví, je dobře známo, že jemné částice mají tendenci pronikat hlouběji do dýchacího systému a zůstávat tam déle v porovnání s hrubými částicemi. Hrubé částice jsou obvykle zachyceny v horních dýchacích cestách. Tento jev může vést od podráždění dýchacího systému až po vážná onemocnění. PČ kompozitních materiálů také mohou způsobovat zdravotní problémy při styku s lidskou kůží. [18] [19]

Na PČ kompozitních materiálů si musíme dávat pozor i z pohledu údržby a funkčnosti daného obráběcího stroje. Elektrostatické PČ (zejména u uhlíkových vláken) mohou zapříčinit zkrat. PČ se mohou dále usazovat např. na manipulačních částech stroje, což může vést ke snižování výkonosti stroje. [20]

## 3 Metodická část

Metodická část této práce pojednává o přípravě a realizaci experimentů pro hodnocení opotřebení rezných nástrojů, delaminace a prachových částic při vrtání BKM dle zadání diplomové práce. Tato část je rozdělena na několik bodů, které popisují přípravu vzorků, použité rezné nástroje a stroje, měřicí zařízení, pomůcky a samotnou metodikou měřených veličin.

Všechny experimenty a měření byla provedena v Laboratoři třískových technologií a procesů, Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci. Laboratoř třískových technologií a procesů se nachází v budově L, areálu TUL.

### 3.1 Zkušební vzorky

Pro tuto práci byly dodány dvě biokompozitní desky o rozměrech 300x300x2 mm z VUT Brno. Desky jsou tvořeny vrstvami tkaniny ze lnu (výztuž) a z epoxidové pryskyřice (matrice). Materiál výztuže tvoří ampliTex™ 200, twill 2/2 od společnosti Bcomp. Tkanina je vyrobena z dlouhých lněných vláken s keprovou vazbou 2/2. [5] Technické parametry jsou uvedeny v tab. 3. Materiál matrice tvoří epoxidová pryskyřice s označením LG 700. Mezi přednosti této pryskyřice patří extrémně nízká viskozita, která umožňuje vytváření laminátů s velmi nízkou hmotností, vysoká reaktivita, doba zpracovatelnosti (25 minut až 180 minut), dobrá teplotní odolnost i po vytvrzení při pokojové teplotě a vysoká flexibilita, která se udržuje při zachování vynikající teplotní odolnosti. [21] Technické parametry a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4 a 5.

**Tab. 3** – Technické parametry výztuže ampliTex™ 200, twill 2/2 [21]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Plošná hmotnost tkaniny	200	g/m <sup>2</sup>
Hustota vlákna	1,47	kg/dm <sup>3</sup>
Modul pružnosti v tahu	62±1	GPa
Prodloužení při přetržení	1,3–1,4	%
Obsah vody	5–6	% (22 °C)
Vazba	Keprova vazba 2/2	



*Obr. 11 – Ukázka tkaniny ampliTex™ 200 s vazbou twill 2/2 [33]*

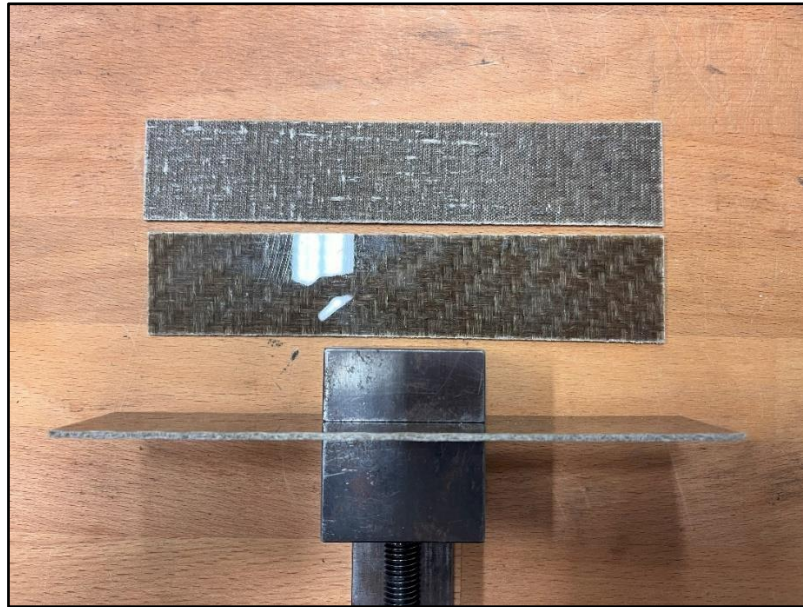
*Tab. 4 – Technické parametry pryskyřice LG 700 [22]*

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>
<b>Hustota</b>	1,18–1,23	g/cm <sup>3</sup> (25 °C)
<b>Viskozita</b>	500–700	mPa.s (25 °C)
<b>Ekvivalent epoxidu</b>	156–165	mol/kg <sup>1</sup>
<b>Index epoxidu</b>	0,60–0,64	–

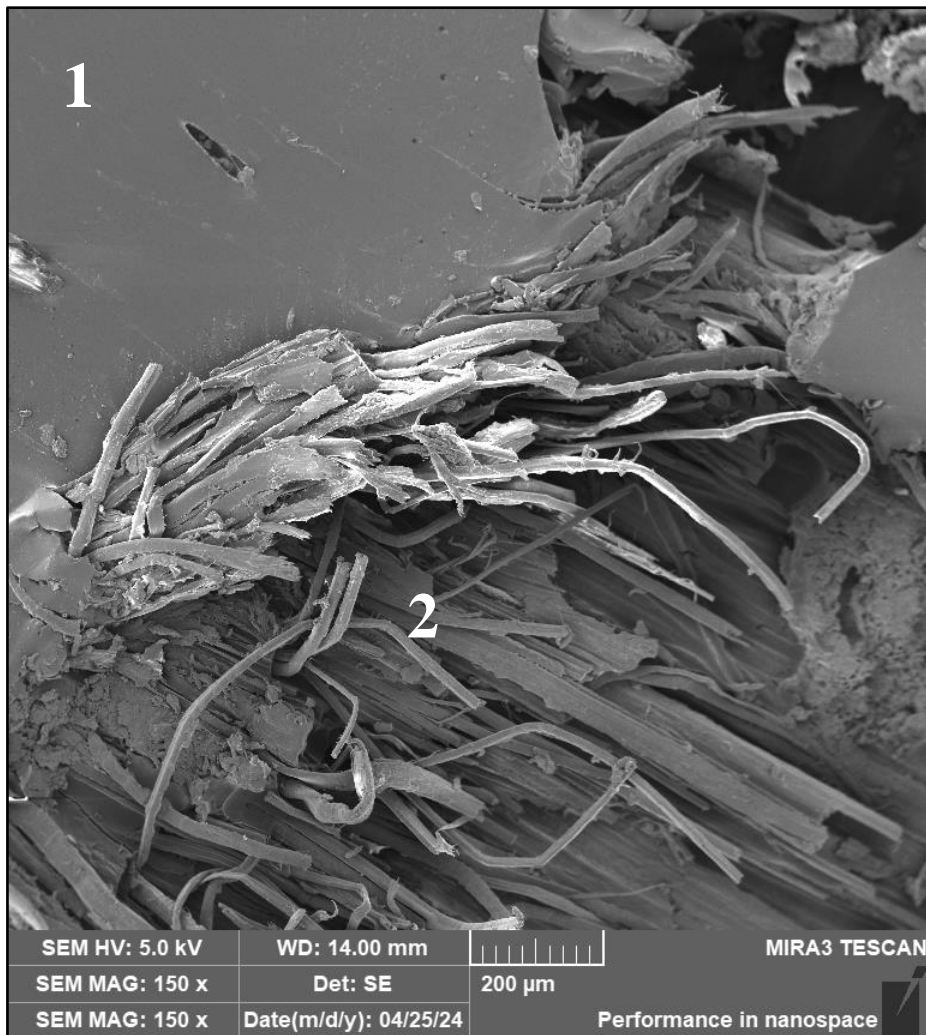
*Tab. 5 – Mechanické vlastnosti vytvrzené LG 700 bez výztuže [22]*

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>
<b>Mez pevnost</b>	110–120	MPa
<b>E modul</b>	2700–3300	MPa
<b>Mez pevnosti v tahu</b>	65–75	MPa
<b>Mez pevnosti v tlaku</b>	120–140	MPa
<b>Tažnost</b>	6–8	%
<b>Rázová houževnatost</b>	38–48	kJ/m <sup>2</sup>

Biokompozitní desky byly nastříhány na požadované rozměry zkušebních vzorků 30x150x2 mm, viz. obr. 12. K nastříhání vzorků na daný rozměr byly použity tabulové nůžky.



*Obr. 12 – Zkušební vzorek*



*Obr. 13 – Ukázka lomu biokompozitního vzorku*

Na obrázku 13 je možné pozorovat vnější i vnitřní strukturu BKM použitého v této práci. Vrchní hladký povrch (1) představuje matrici (pryskyřici). Pod matricí můžeme pozorovat jednotlivá lněná vlákna (2). Na obr. 13 můžeme dále pozorovat matrici přilnutou k výztuži, což značí dobré adhezni síly, a tedy spojení obou typů materiálů.

### 3.2 Použité řezné nástroje

Pro tuto práci byly zvoleny dva druhy vrtáků stejné geometrie, ale rozdílného materiálového složení. Řezné nástroje byly šroubovité vrtáky o průměru 6 mm s úhlem špičky 118°. Materiály vrtáků byly HSS a SK bez povrchové úpravy. Obecně se pro kompozitní materiály doporučují řezné nástroje ze SK. Důvodem je jejich vyšší odolnost vůči abrazivitě. U BKM je však možné využití i řezných nástrojů z HSS, a to z důvodu, že tyto materiály vykazují nižší tvrdost a jsou méně abrazivní. Vrtáky byly zvoleny za účelem porovnání rozdílů v opotřebení řezného nástroje, delaminaci obrobeneho mat. a tvorbě prachových částic mezi odlišnými řeznými materiály nástroje. Řezné podmínky byly pro oba vrtáky stejné.

*Tab. 6 – Technické informace o zvolených vrtácích*

Parametr	Vrták 1	Vrták 2
Označení v DP	V-HSS	V-SK
Materiál nástroje	HSS	SK
Typ povlaku	Bez povlaku	Bez povlaku
Průměr nástroje [mm]	6	6
Pracovní délka nástroje [mm]	57	28
Úhel špičky nástroje [°]	118	118
Úhel šroubovice [°]	30	30
Počet břitů	2	2
Cena ± [Kč]	50	500



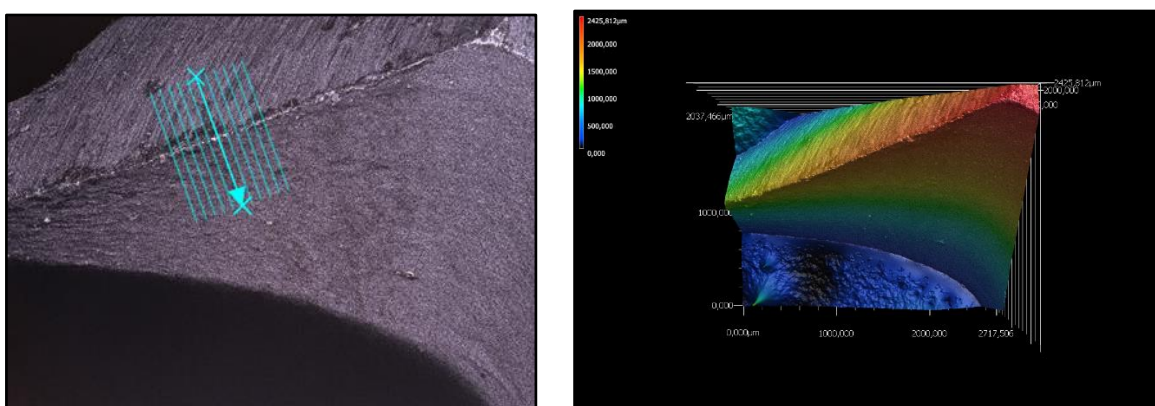
*Obr. 13 – Šroubovitý vrták z HSS [30]*



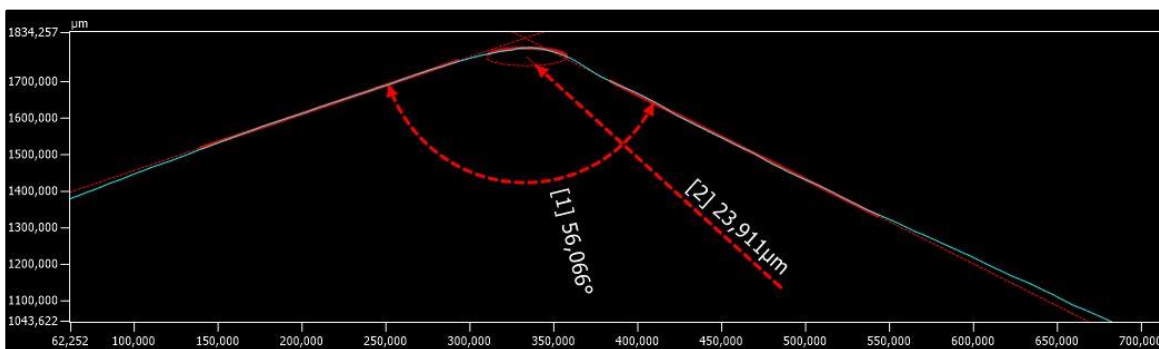
**Obr. 14** – Šroubovitý vrták z SK [31]

U vrtáku však byla zjištěna rozdílnost v geometrii. Přesněji byly nalezeny rozdíly v úhlu mezi hřbetem a čelem nástroje (úhel břitů), a tedy jeho poloměru, viz. obr. 15 a 16. Stejný rozdíl lze pozorovat i u vedlejšího ostří.

Úhel břitů rezných nástrojů se liší o cca  $15^\circ$  a v poloměru o cca  $13\ \mu\text{m}$ .

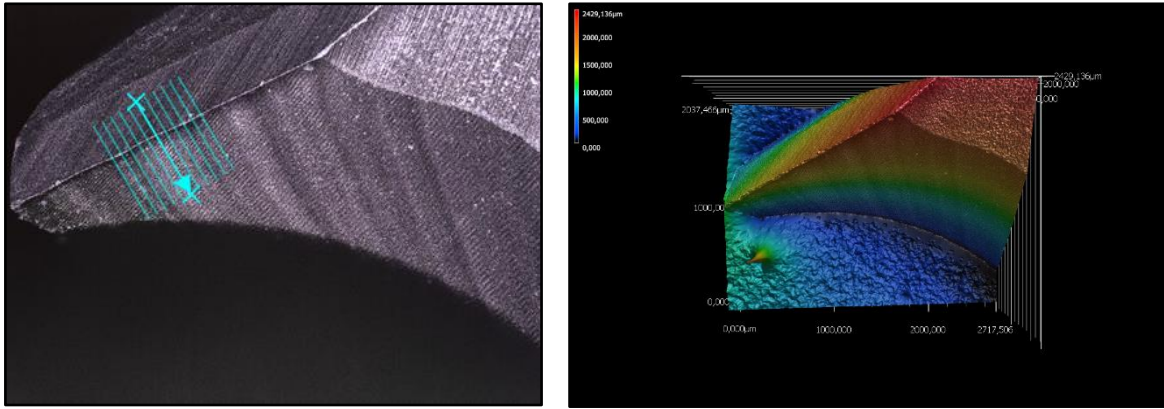


**Obr. 15** – 3D sken V-HSS

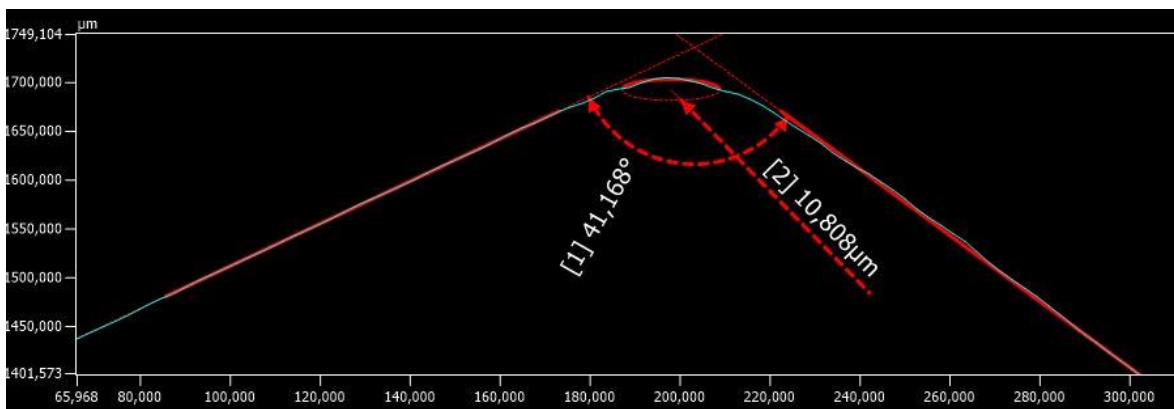


**Obr. 16** – Geometrie V-HSS





Obr. 17 – 3D sken V-SK



Obr. 16 – Geometrie V-SK

### 3.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky (dále jen ŘP) pro tuto práci byly voleny dle vědeckých článků, odborné literatury a s ohledem na malou tloušťku vzorků. Pro experiment byly navrženy dvojce různé hodnoty otáček vřetena (500 a 1500 ot/min) a dva různé posuvy na otáčku (0,05 a 0,15 mm/ot). Dále pak jejich kombinace. ŘP byly pro oba nástroje stejné a jsou uvedeny v tab. 7 včetně jejich kombinací (ŘP 1–4).

Tab. 7 – Řezné podmínky

Parametr	Kombinace				Jednotka
	1	2	3	4	
Otáčky vřetena $n$	500	1500	500	1500	ot/min
Posuv na otáčku $f_n$	0,05	0,10	0,10	0,05	mm/ot

### 3.4 Použitý stroj

Veškeré obráběcí operace, týkající se experimentální části této práce, byly provedeny na frézce FNG 32, viz. obr. 17. Frézka byla vyrobena firmou TOS Olomouc s.r.o. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 8.

*Tab. 8 – Technické parametry frézky FNG 32 [23]*

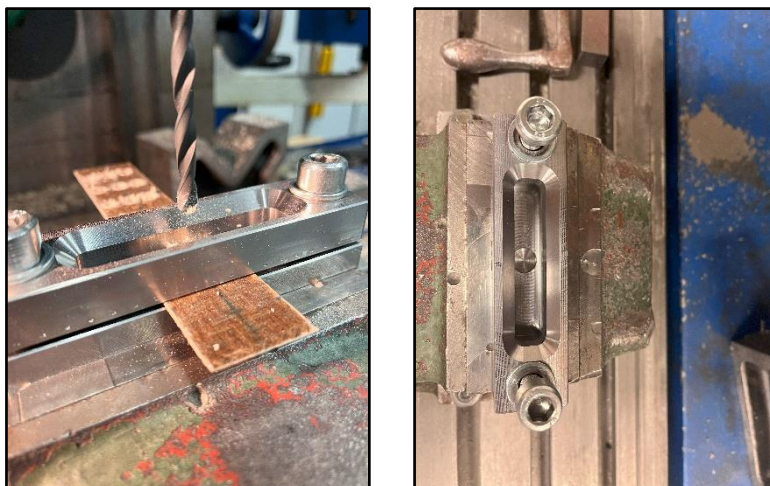
Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozměr pracovní plochy	800 x 400	mm
Počet upínacích drážek	7	–
Výkon hlavního motoru	4	kW
Výkon posuvového motoru	1,1	kW
Rozsah otáček	50–4000	ot/min
Posuv – rozsah (osa X a Y)	15–1000	mm/min
Posuv – rozsah (osa Z)	6–400	mm/min
Pracovní zdvih podélný (osa X)	600	mm
Pracovní zdvih podélný (osa Y)	400	mm
Pracovní zdvih podélný (osa Z)	400	mm
Maximální zatížení stolu	350	kg



*Obr. 17 – Frézka FNG 32*

### 3.5 Vrtací přípravek

Vzorky byly upínány do vrtacího přípravku. Tento přípravek byl navržen přímo pro tuto práci, viz. obr. 18. Přípravek byl navržen z důvodu malé tloušťky BKM (cca 2 mm), který nelze upínat do klasického strojního svěráku. Samotný strojní svěrák by při utahování mohl lehce způsobit deformaci vzorku ve směru jeho ohybu, což by mohlo při styku s nástrojem vést k jeho destrukci. Další důvod představuje tlaková síla, kterou působí vrták na vzorek, což může vést průhybu a destrukci vzorku.



*Obr. 18 – Vrtací přípravek*

### 3.6 Podpěrné desky

Podpěrné desky byly pro experiment zvoleny ze dvou různých materiálů. První materiál představuje dřevovláknitá deska (deska využívající se jako zadní stěna skříní), viz. obr 19. Jako druhý materiál byl vybrán plast, přesněji PVC, viz. obr. 20. Podpěrné desky byly rozměrově přizpůsobeny zkušebními vzorkům za pomoci kotoučové pily a nůžek.



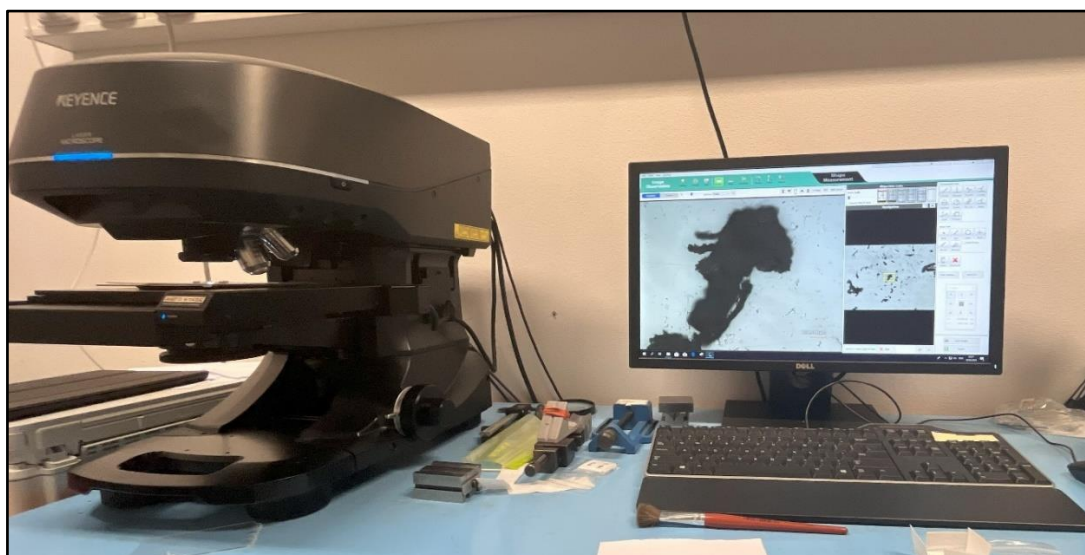
*Obr. 19 – Podpěrná deska ze dřeva*



*Obr. 20 – Podpěrná deska z plastu*

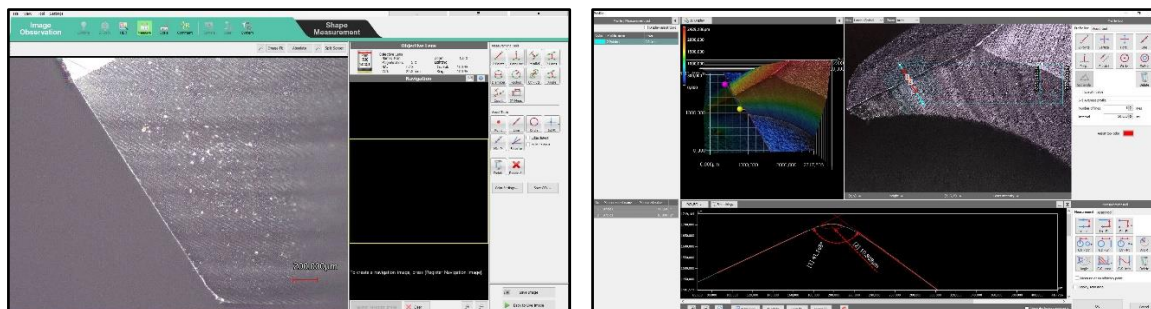
### 3.7 Použité měřicí zařízení a software

Měření velikosti opotřebených řezných nástrojů, delaminace obrobeneho materiálu a prachových částic probíhalo na 3D laserovém skenovacím konfokálním mikroskopu KAYENCE VK-X1000, viz. obr. 21. Mikroskop pracuje s bílým světlem a fialovým laserem o vlnové délce  $\lambda$  404 nm a je schopen dosáhnout maximálního rozlišení 0,01 nm.



*Obr. 21 – Mikroskop KAYENCE VK-X1000*

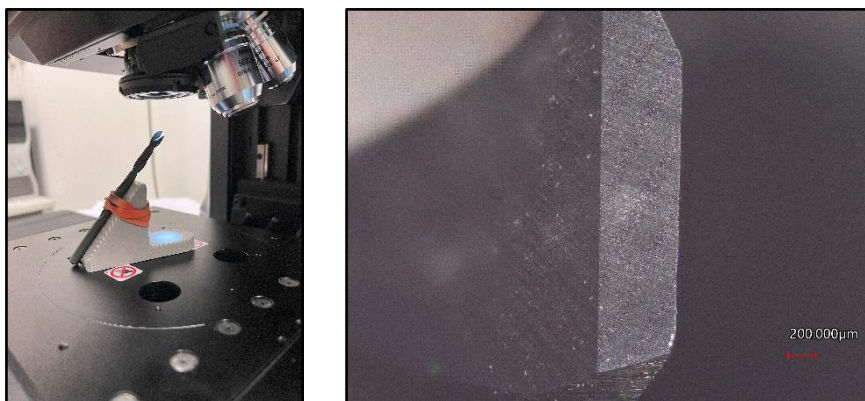
Měření daných veličin dle zadání diplomové práce bylo realizováno v softwaru VK Viewer a VK Analyzer, který byl dodán k mikroskopu, viz. obr. 22.



*Obr. 22 – VK Viewer a Analyzer*

### 3.8 Měření opotřebení řezného nástroje

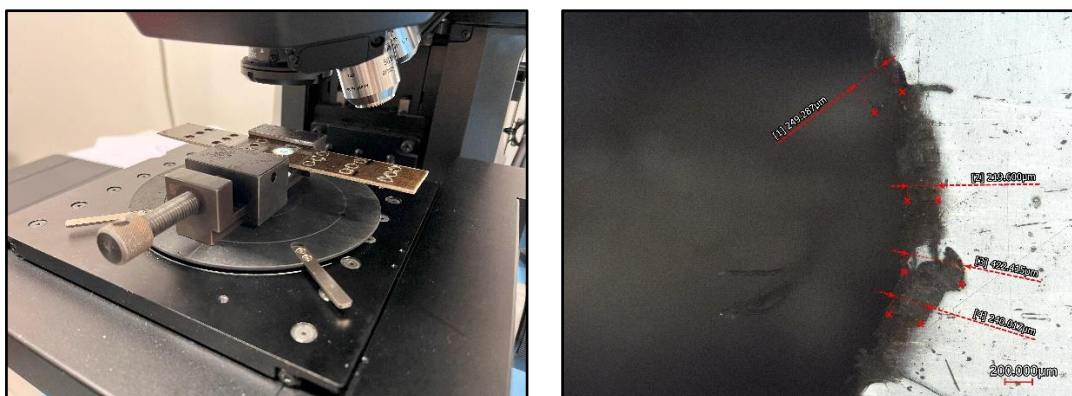
Měření opotřebení každého z řezných nástrojů probíhalo na 3D laserovém skenovacím konfokálním mikroskopu KAYENCE VK-X1000. Opotřebení bylo měřeno na hlavním a vedlejší ostří. Vyhodnoceno bylo v softwaru VK Viewer, který byl dodán k mikroskopu, viz. obr. 23. Interval měření velikosti opotřebení nástroje byl zvolen dle počtu vyvrtaných děr – po 10, 30, 40 a 50ti vyvrtaných dírách.



*Obr. 23 – Ukázka měření opotřebení nástroje*

### 3.9 Měření delaminace

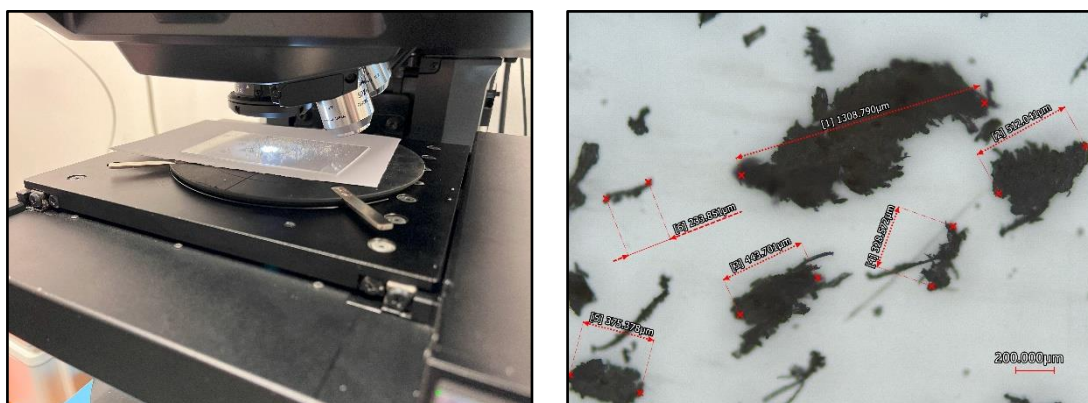
Velikost delaminace byla měřena u každé vyvrtané díry jak na vstupu, tak výstupu. Pro vyhodnocení velikosti delaminace byl použit software VK Viewer, který byl k mikroskopu dodán, viz. obr. 24. Velikost delaminace byla měřena u 1, 10, 30, 40 a 50té vyvrtané díry.



*Obr. 24 – Ukázka měření delaminace*

### 3.10 Měření prachových částic

Pro jednotlivé kombinace řezných podmínek byly vždy ze vzorku odebrány prachové částice – třísky (PČ). Velikost PČ byla vyhodnocena za pomoci mikroskopu KAYENCE VK-X1000 a softwaru VK Analyzer k němu dodanému, viz. obr 25. Měřila se velikost prachových částic v závislosti na řezných podmínkách a opotřebování řezného nástroje. Interval měření byl zvolen u 1 díry a následně u 50té díry.



*Obr. 25 – Ukázka měření třísky a PČ*

### 3.11 Postup měření

Měření všech potřebných parametrů, stanovených pro vyhodnocení cílů této práce, bylo provedeno v Laboratoři třískových technologií a procesů, v budově L, areálu Technické univerzity v Liberci. Veškerá měření byla provedena 5x. Následně byl vypočítány aritmetické průměry naměřených hodnot a k tomu odpovídající nejistota měření dle dokumentu EA – 4/02 M:2013.

## 4 Experimentální část

Experimentální část této práce popisuje veškeré provedené experimenty v rámci problematiky řešení zadané v diplomové práci a shrnutí získaných výsledků. Experimenty se týkaly měření opotřebení rezných nástrojů na hlavním a vedlejším ostří, měření velikosti delaminace na vstupu a výstupu díry obráběného materiálu a měření velikosti prachových částic. Výstupy měření jsou popsány v příslušných podkapitolách. Veškerá měření byla provedena pro každou kombinaci ŘP, viz. podkapitola 2.2.2.

### 4.1 Hodnocení opotřebení nástroje

Měření opotřebení rezného nástroje bylo provedeno vždy po stanovém počtu vyvrtaných děr. Tento interval byl stanoven po 10, 30, 40 a 50ti vyvrtaných dírách. U každého rezného nástroje byla měřena velikost opotřebení jak na hlavním, tak vedlejším ostří, respektive na hřebu nástroje a fazetce, viz. obr. 26. Všechna měření byla provedena 5x.

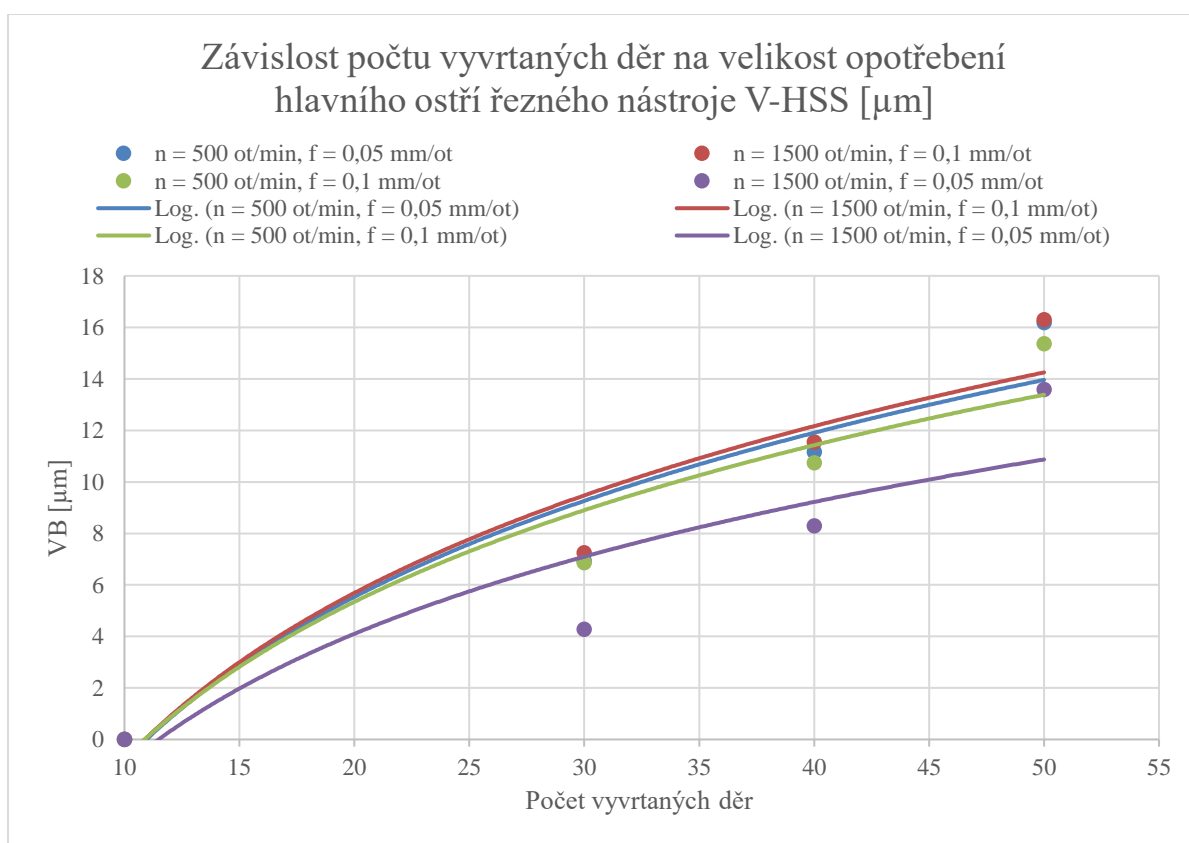
Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulkách 9, 10, 11 a 12. Grafické znázornění výsledků se nachází v grafech 1, 2, 3 a 4. Ukázka opotřebení rezných nástrojů se nachází v tabulce 13.

**Tab. 9** – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení hlavního ostří rezného nástroje V-HSS [ $\mu\text{m}$ ]

HLAVNÍ OSTŘÍ rezného nástroje V-HSS				
Opotřebení VB [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota měření U [ $\mu\text{m}$ ]				
Nástroj V-HSS	Počet děr			
Řezné podmínky	10	30	40	50
n = 500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,05 mm/ot	0	6,94 $\pm$ 0,68	11,16 $\pm$ 0,72	16,19 $\pm$ 0,65
n = 1500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,1 mm/ot	0	7,25 $\pm$ 0,88	11,55 $\pm$ 0,83	16,30 $\pm$ 0,90
n = 500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,1 mm/ot	0	6,86 $\pm$ 0,67	10,75 $\pm$ 0,61	15,36 $\pm$ 0,65
n = 1500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,05mm/ot	0	4,28 $\pm$ 0,71	8,30 $\pm$ 0,74	13,59 $\pm$ 0,68

**Tab. 10** – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení vedlejšího ostří řezného nástroje V-HSS [ $\mu\text{m}$ ]

VEDLEJŠÍ OSTŘÍ řezného nástroje V-HSS				
Opotřebení VB [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota měření U [ $\mu\text{m}$ ]				
Nástroj V-HSS	Počet děr			
Řezné podmínky	10	30	40	50
n = 500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,05 mm/ot	0	11,43 $\pm$ 0,94	14,49 $\pm$ 0,95	17,36 $\pm$ 0,90
n = 1500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,1 mm/ot	0	12,48 $\pm$ 0,59	15,96 $\pm$ 0,64	18,39 $\pm$ 0,68
n = 500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,1 mm/ot	0	8,19 $\pm$ 0,79	12,68 $\pm$ 0,74	15,73 $\pm$ 0,82
n = 1500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,05mm/ot	0	7,33 $\pm$ 0,75	8,99 $\pm$ 0,76	14,39 $\pm$ 0,71

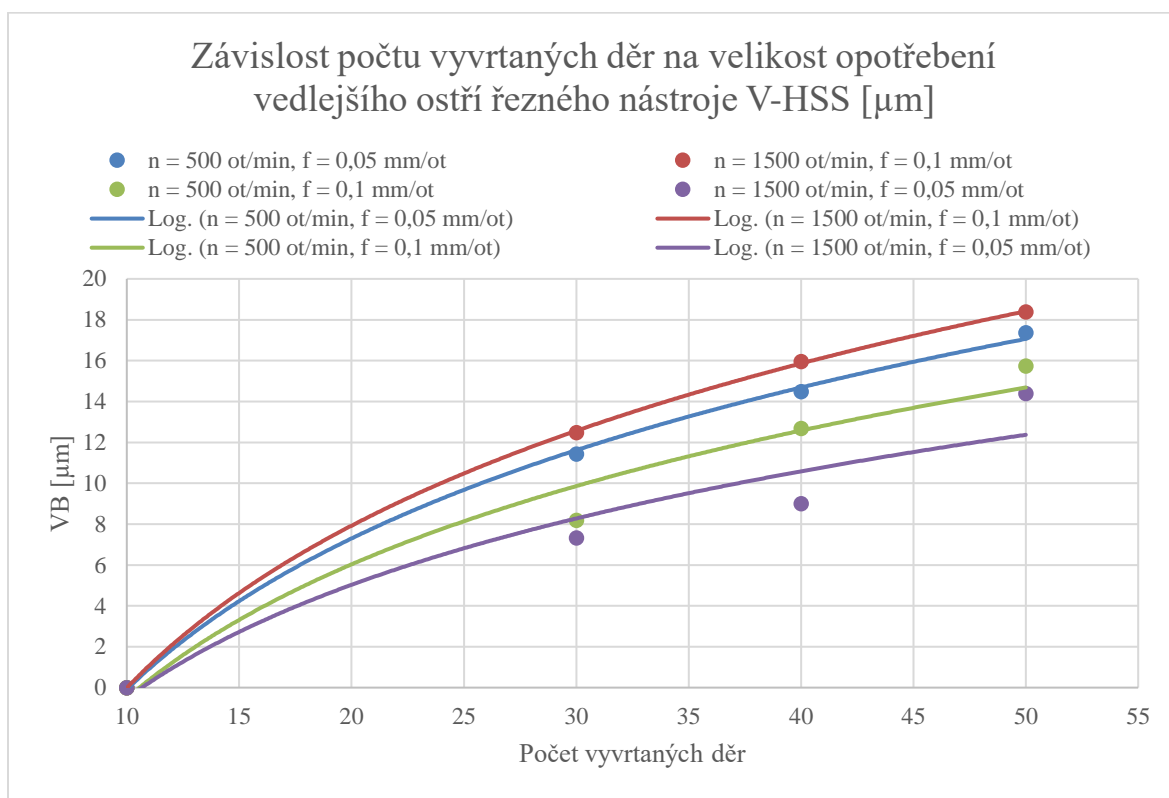


**Graf 1** – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-HSS [ $\mu\text{m}$ ]



Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce 9 a graficky znázorněných v grafu 1 vyplívá následující:

- 1) ŘP 2 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,10$  mm/ot) vedly k nejvyššímu opotřebení, naopak ŘP 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot) k nejnižšímu opotřebení hlavního ostří rezného nástroje V-HSS,
- 2) opotřebení se zvyšovalo s rostoucím počtem děr.



**Graf 2** – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení vedlejšího ostří rezného nástroje V-HSS [ $\mu\text{m}$ ]

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce 10 a graficky znázorněných v grafu 2 vyplívá následující:

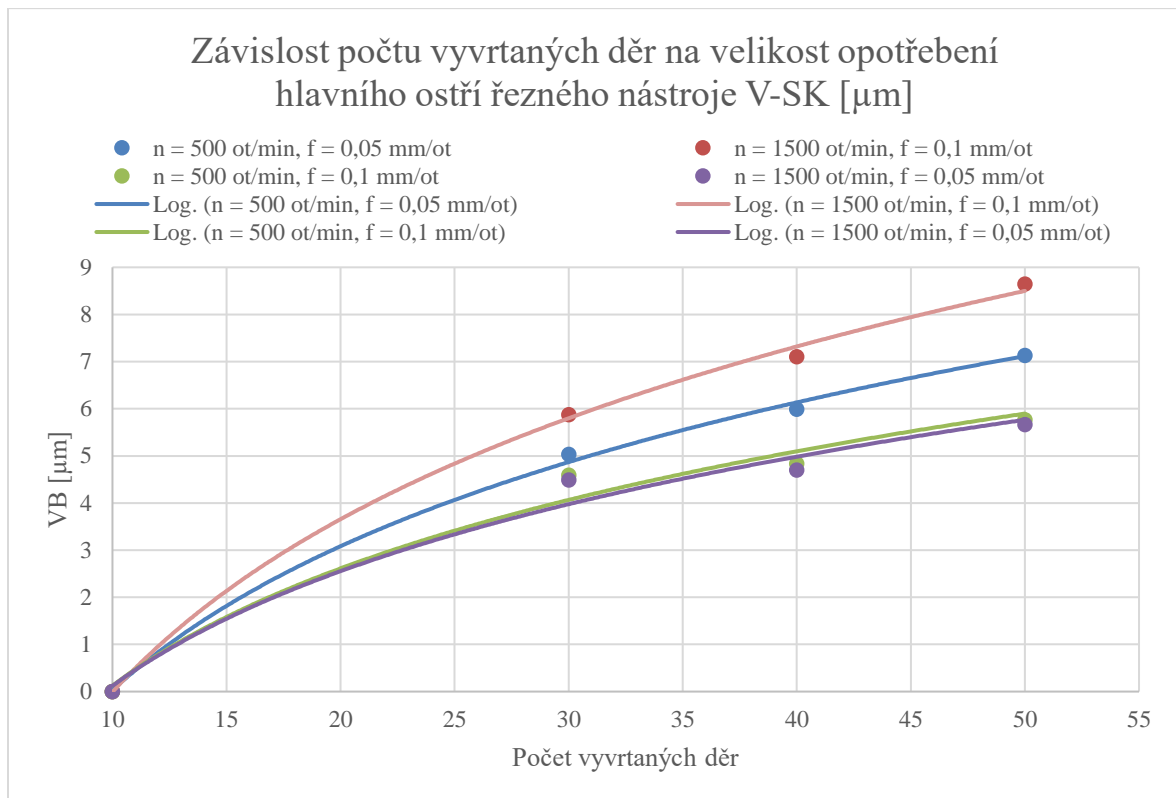
- 1) ŘP 2 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,10$  mm/ot) vedly k nejvyššímu opotřebení, naopak ŘP 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot) k nejnižšímu opotřebení vedlejšího ostří u rezného nástroje V-HSS,
- 2) velikost opotřebení se více projevila na vedlejším ostří,
- 3) opotřebení se zvyšovalo s rostoucím počtem děr.

**Tab. 11** – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-SK [ $\mu\text{m}$ ]

<b>HLAVNÍ OSTŘÍ řezného nástroje V-SK</b>				
<b>Opotřebení VB [<math>\mu\text{m}</math>] <math>\pm</math> nejistota měření U [<math>\mu\text{m}</math>]</b>				
Nástroj V-SK	Počet děr			
Řezné podmínky	10	30	40	50
n = 500 ot/min, f = 0,05 mm/ot	0	5,03 $\pm$ 0,67	5,99 $\pm$ 0,75	7,13 $\pm$ 0,81
n = 1500 ot/min, f = 0,1 mm/ot	0	5,87 $\pm$ 0,79	7,10 $\pm$ 0,72	8,64 $\pm$ 0,75
n = 500 ot/min, f = 0,1 mm/ot	0	4,59 $\pm$ 0,58	4,83 $\pm$ 0,63	5,77 $\pm$ 0,78
n = 1500 ot/min, f = 0,05mm/ot	0	4,49 $\pm$ 0,81	4,69 $\pm$ 0,80	5,66 $\pm$ 0,75

**Tab. 12** – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení vedlejšího ostří řezného nástroje V-SK [ $\mu\text{m}$ ]

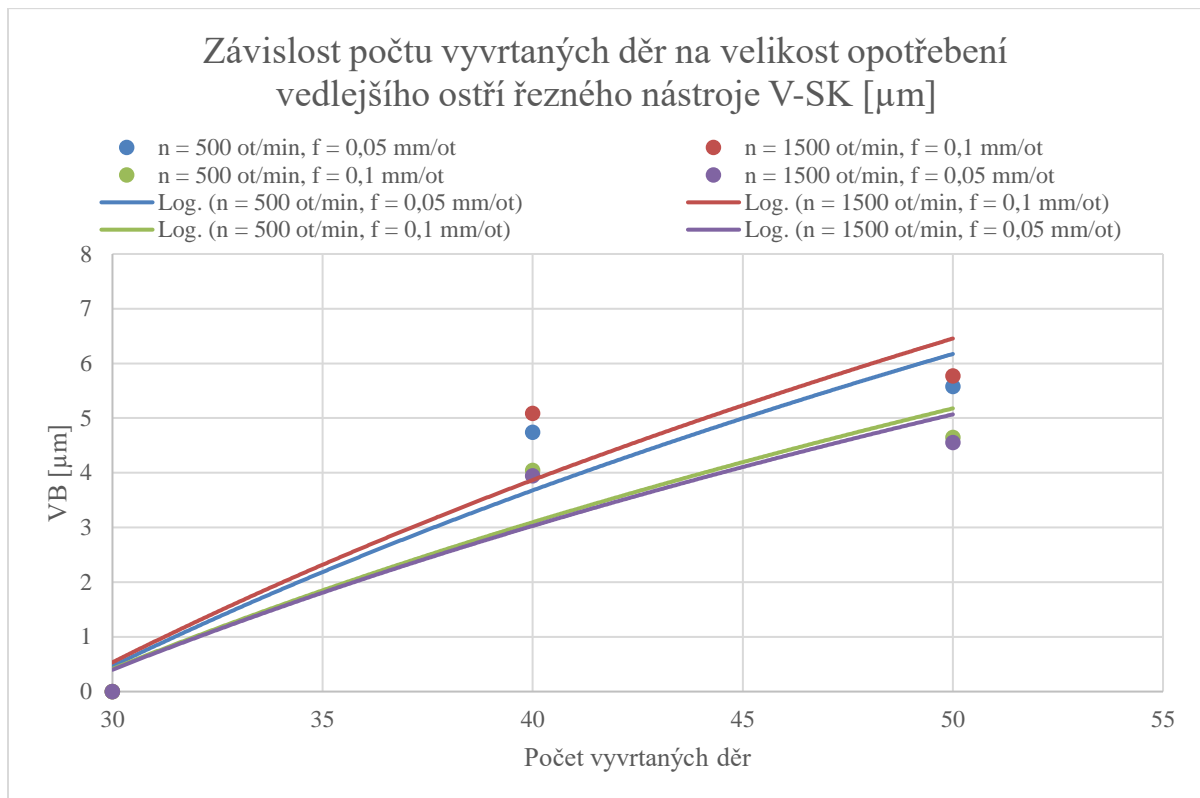
<b>VEDLEJŠÍ OSTŘÍ řezného nástroje V-SK</b>				
<b>Opotřebení VB [<math>\mu\text{m}</math>] <math>\pm</math> nejistota měření U [<math>\mu\text{m}</math>]</b>				
Nástroj V-SK	Počet děr			
Řezné podmínky	10	30	40	50
n = 500 ot/min, f = 0,05 mm/ot	0	0	4,74 $\pm$ 0,53	5,58 $\pm$ 0,58
n = 1500 ot/min, f = 0,1 mm/ot	0	0	5,09 $\pm$ 0,65	5,77 $\pm$ 0,74
n = 500 ot/min, f = 0,1 mm/ot	0	0	4,04 $\pm$ 0,91	4,64 $\pm$ 0,94
n = 1500 ot/min, f = 0,05mm/ot	0	0	3,94 $\pm$ 0,63	4,55 $\pm$ 0,65



**Graf 3** – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-SK [ $\mu\text{m}$ ]

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce 11 a graficky znázorněných v grafu 3 vyplívá následující:

- 1) ŘP 2 ( $n = 1500 \text{ ot/min}$ ,  $f_n = 0,10 \text{ mm/ot}$ ) vedly k nejvyššímu opotřebení, naopak ŘP 4 ( $n = 1500 \text{ ot/min}$ ,  $f_n = 0,05 \text{ mm/ot}$ ) k nejnižšímu opotřebení vedlejšího ostří u řezného nástroje V-SK,
- 2) velikost opotřebení se více projevila na hlavním ostří,
- 3) opotřebení se zvyšovalo s rostoucím počtem děr.



**Graf 4** – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení vedlejšího ostří řezného nástroje V-SK [ $\mu\text{m}$ ]

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce 12 a graficky znázorněných v grafu 4 vyplívá následující:

- 1) ŘP 2 ( $n = 1500 \text{ ot/min}$ ,  $f_n = 0,10 \text{ mm/ot}$ ) vedly k nejvyššímu opotřebení, naopak ŘP 4 ( $n = 1500 \text{ ot/min}$ ,  $f_n = 0,05 \text{ mm/ot}$ ) k nejnižšímu opotřebení vedlejšího ostří u řezného nástroje V-SK,
- 2) opotřebení se zvyšovalo s rostoucím počtem děr.

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulkách 9 až 12 a graficky znázorněných v grafech 1 až 4 vyplívá následující:

- 1) ŘP 2 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,10$  mm/ot) vedly k nejvyššímu opotřebení, naopak ŘP 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot) k nejnižšímu, a to u obou nástrojů V-HSS a V-SK jak u hlavního, tak vedlejšího ostří,
- 2) u V-HSS se opotřebení více projevilo na vedlejším ostří,
- 3) u V-SK se opotřebení více projevilo na hlavním ostří,
- 4) opotřebení se zvyšovalo s rostoucím počtem děr.

Velikost opotřebení se zvyšovala s rostoucím počtem vyvrtaných děr a v závislosti na ŘP u obou nástrojů. Opotřebení dosáhlo nejvyšších hodnot s ŘP 2 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,10$  mm/ot), nejnižšího opotřebení se dosáhlo s ŘP 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot), a to u obou druhů vrtáků jak na hlavním, tak vedlejším ostří.

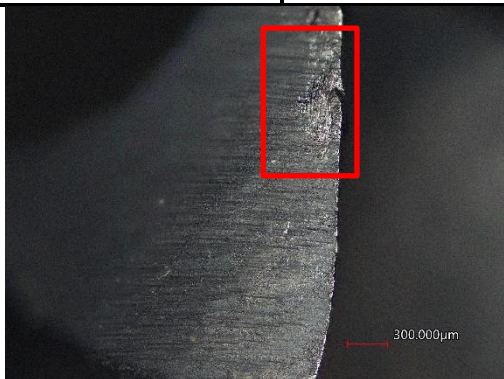

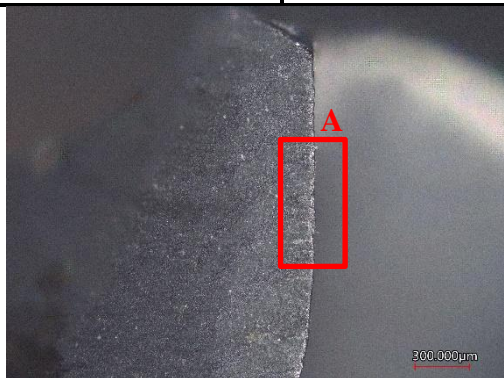

Po vyvrtání 50 děr nástrojem V-HSS můžeme na grafech 1 a 2 pozorovat velikost opotřebení, které dosáhlo hodnot  $16,30 \pm 0,90$   $\mu\text{m}$  a  $18,39 \pm 0,68$   $\mu\text{m}$  pro ŘP 2 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,10$  mm/ot) a  $13,59 \pm 0,68$   $\mu\text{m}$  a  $14,39 \pm 0,71$   $\mu\text{m}$  pro ŘP 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot), pro hlavní a vedlejší ostří. První opotřebení se projevilo po odvrtání 30 děr a více projevilo na vedlejším ostří.

V rámci experimentu bylo prokázáno opotřebení otěrem. Dále bylo pozorováno, že:

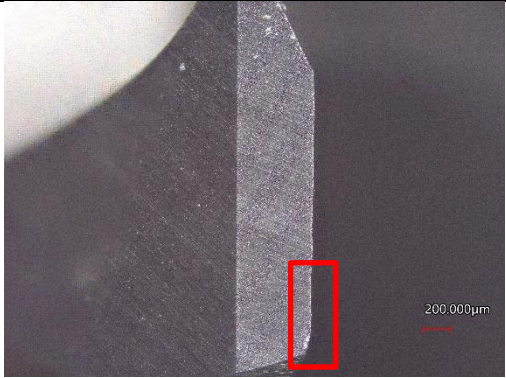
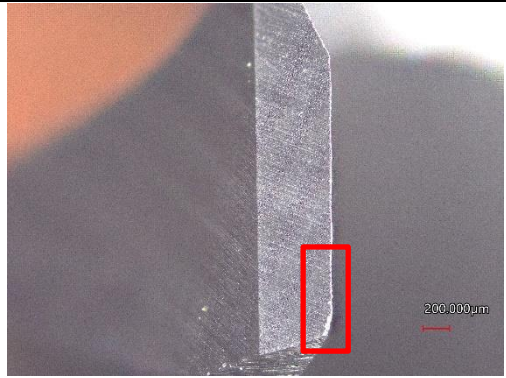
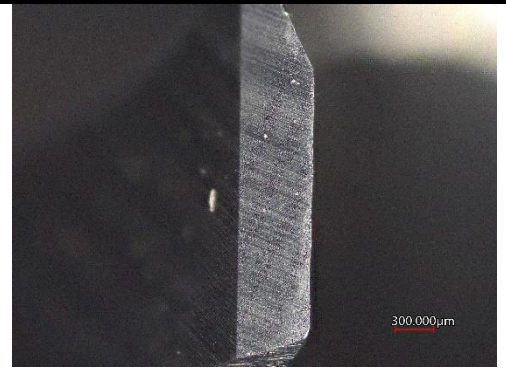

- 1) vyšší poloměr a úhel jak hlavního, tak vedlejšího ostří nástroje, viz. podkapitola 3.2, vykazoval v procesu vrtání namísto řezání protlačování zkušebním vzorkem,
- 2) nástroj nedokázal uříznout vlákna na výstupu z otvoru, což vedlo k nejen vyšší delaminaci, ale i dalšímu otěru vedlejšího ostří.

Grafy 3 a 4 ukazují velikost opotřebení u nástroje V-SK. Po vyvrtání 50 děr dosáhlo opotřebení hodnot  $8,64 \pm 0,75 \mu\text{m}$  a  $5,77 \pm 0,74 \mu\text{m}$  pro ŘP 2 ( $n = 1500 \text{ ot/min}$ ,  $f_n = 0,10 \text{ mm/ot}$ ) a  $5,66 \pm 0,75 \mu\text{m}$  a  $4,55 \pm 0,65 \mu\text{m}$  pro ŘP 4 ( $n = 1500 \text{ ot/min}$ ,  $f_n = 0,05 \text{ mm/ot}$ ), pro hlavní a vedlejší ostří. První opotřebení se projevilo po odvrtání 30 děr u hlavního ostří a po odvrtání 40 děr na vedlejším ostří. U nástroje V-SK docházelo k řezání materiálu, což vedlo nejen k nižší delaminaci, ale také nižšímu opotřebení na vedlejším ostří. U vedlejšího ostří nedocházelo k tak intenzivnímu otěru jako u nástroje V-HSS.

**Tab. 13** – Ukázka opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-HSS pro ŘP 2 a ŘP 4

V-HSS		
10 děr	( $n = 1500 \text{ ot/min}$ , $f_n = 0,10 \text{ mm/ot}$ )	50 děr
		
Defekt řezného nástroje dobře ukazuje na mechanismus jeho opotřebování, a to otěrem. Můžeme si lehce povšimnout, v červeně označených rámečcích, jak dochází k „leštění“ hřbetu řezného nástroje – daná plocha řezného nástroje je více a více lesklá.		
10 děr	( $n = 1500 \text{ ot/min}$ , $f_n = 0,05 \text{ mm/ot}$ )	50 děr
		
ŘP 4 způsobovaly nejnižší hodnoty opotřebení. Z obrázku lze pozorovat minimální opotřebení (rámečky A). Řezný nástroj trpěl spíše znečištěním obráběným materiálem (rámeček B).		

**Tab. 14** – Ukázka opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-SK pro ŘP 2 a ŘP 4

V-SK		
10 děr	( $n = 1500$ ot/min, $f_n = 0,10$ mm/ot)	50 děr
		
Stejně jako u řezného nástroje V-HSS i zde docházelo k opotřebení otěrem, jak je možné pozorovat na obrázcích (červené rámečky).		
10 děr	( $n = 1500$ ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot)	50 děr
		
I u řezného nástroje V-SK docházelo k nejnižšímu opotřebení s ŘP 4, jak je možné pozorovat na obrázcích.		

## 4.2 Hodnocení delaminace obrobeného materiálu

Měření velikosti delaminace bylo provedeno vždy po stanovém počtu vyvrtaných děr. Interval měření byl stanoven po vyvrtání 1, 10, 30, 40 a 50té díry. U každé díry byla měřena velikost delaminace jak na vstupu, tak výstupu díry, viz. obr. 28. Všechna měření byla provedena 5x.

Vliv podpěrných desek na velikost delaminace obrobeného materiálu je popsán v samostatné podkapitole 4.2.1.

Pro vyhodnocení naměřených výsledků bylo nutné stanovit limitní hodnotu průměrné velikosti delaminace  $F_{Dkrit}$  na vstupu a výstupu z vyvrtané díry. Pro danou limitní hodnotu neexistuje žádný průmyslový standard či předepisující norma. V této práci byla zvolena limitní průměrná hodnota  $F_{Dkrit} = 1500 \mu\text{m}$ .

Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulkách 15, 16 a 17. Grafické znázornění výsledků se nachází v grafech 5 až 12. Ukázka vyvrtaných děr se nachází v tabulce 18, 19 a 20.



**Tab. 15** - Naměřené průměrné hodnoty velikosti delaminace v závislosti na opotřebení nástroje V-HSS

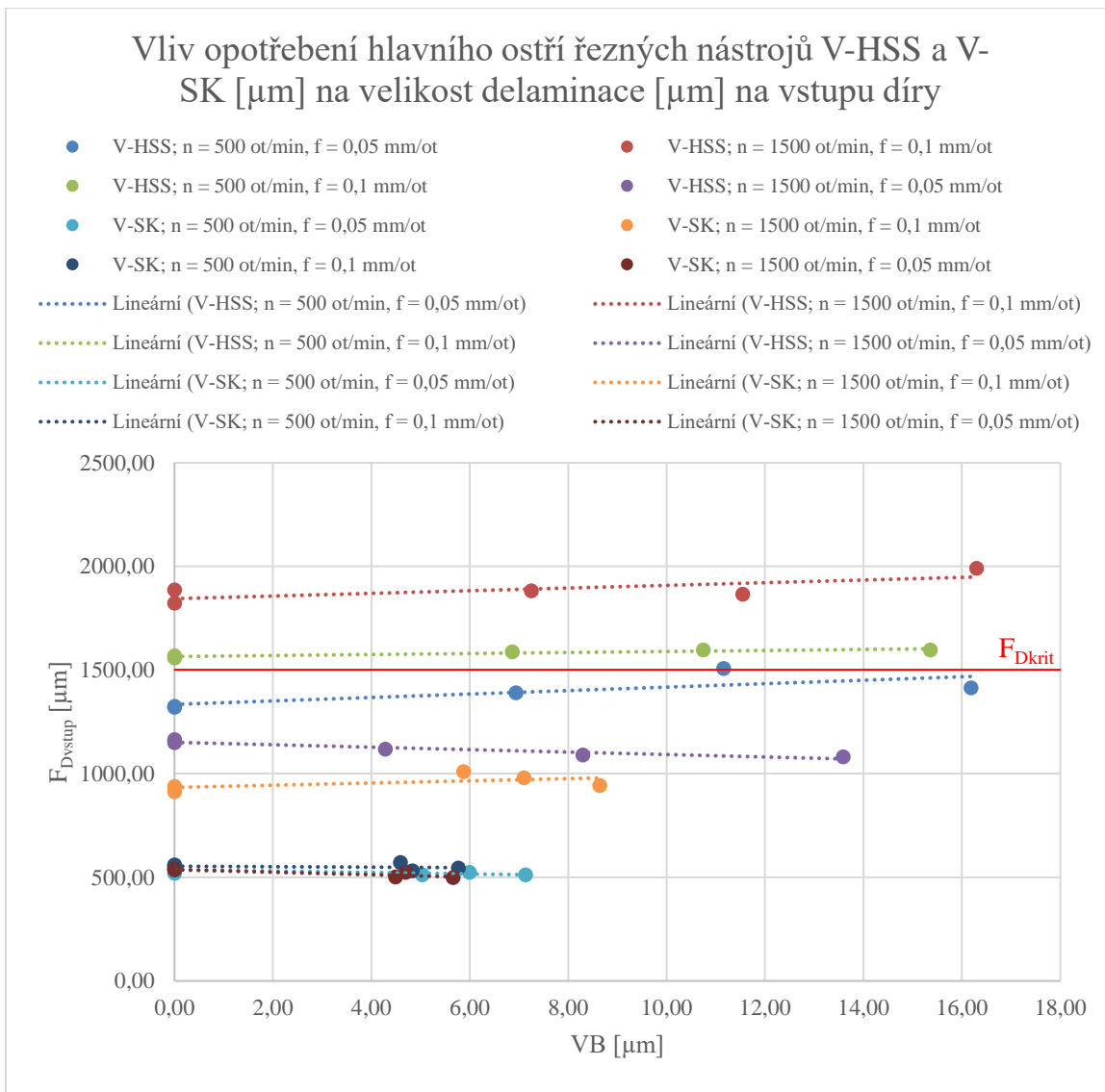
Jednotky [ $\mu\text{m}$ ]		Nástroj V-HSS			
ŘP	Počet děr	Opotřebení na hlavním ostří $\pm$ nejistota měření U	Opotřebení na vedlejším ostří $\pm$ nejistota měření U	Delaminace na výstupu $\pm$ nejistota měření U	Delaminace na vstupu $\pm$ nejistota měření U
n = 500 ot/min, f = 0,05 mm/ot	1	0,00	0,00	3207,98 $\pm$ 0,72	1324,05 $\pm$ 0,65
	10	0,00	0,00	3059,74 $\pm$ 0,78	1320,54 $\pm$ 0,68
	30	6,94 $\pm$ 0,68	11,43 $\pm$ 0,94	3204,83 $\pm$ 0,82	1390,19 $\pm$ 0,71
	40	11,16 $\pm$ 0,72	14,49 $\pm$ 0,95	3293,46 $\pm$ 0,63	1507,93 $\pm$ 0,67
	50	16,19 $\pm$ 0,65	18,39 $\pm$ 0,90	3238,07 $\pm$ 0,69	1414,19 $\pm$ 0,70
n = 1500 ot/min, f = 0,1 mm/ot	1	0,00	0,00	3414,45 $\pm$ 0,84	1822,43 $\pm$ 0,63
	10	0,00	0,00	3509,45 $\pm$ 0,85	1886,30 $\pm$ 0,64
	30	7,25 $\pm$ 0,88	12,48 $\pm$ 0,59	3377,72 $\pm$ 0,78	1881,48 $\pm$ 0,60
	40	11,55 $\pm$ 0,83	15,96 $\pm$ 0,64	3462,55 $\pm$ 0,79	1865,83 $\pm$ 0,58
	50	16,30 $\pm$ 0,90	18,39 $\pm$ 0,68	3324,38 $\pm$ 0,75	1990,31 $\pm$ 0,64
n = 500 ot/min, f = 0,1 mm/ot	1	0,00	0,00	3401,38 $\pm$ 0,88	1557,31 $\pm$ 0,72
	10	0,00	0,00	2963,62 $\pm$ 0,86	1568,17 $\pm$ 0,76
	30	6,86 $\pm$ 0,67	8,19 $\pm$ 0,79	3155,57 $\pm$ 0,81	1587,76 $\pm$ 0,75
	40	10,75 $\pm$ 0,61	12,68 $\pm$ 0,74	3095,66 $\pm$ 0,83	1595,71 $\pm$ 0,77
	50	15,36 $\pm$ 0,65	15,73 $\pm$ 0,82	3197,74 $\pm$ 0,79	1596,78 $\pm$ 0,73
n = 1500 ot/min, f = 0,05 mm/ot	1	0,00	0,00	2927,51 $\pm$ 0,74	1149,21 $\pm$ 0,69
	10	0,00	0,00	2889,92 $\pm$ 0,76	1163,47 $\pm$ 0,67
	30	4,28 $\pm$ 0,71	7,32 $\pm$ 0,75	2959,18 $\pm$ 0,77	1118,21 $\pm$ 0,68
	40	8,30 $\pm$ 0,74	9,00 $\pm$ 0,76	3028,49 $\pm$ 0,75	1090,04 $\pm$ 0,69
	50	13,59 $\pm$ 0,68	14,39 $\pm$ 0,71	3012,80 $\pm$ 0,80	1081,32 $\pm$ 0,68

**Tab. 16** – Naměřené průměrné hodnoty velikosti delaminace v závislosti na opotřebení nástroje V-SK

Jednotky [ $\mu\text{m}$ ]		Nástroj V-SK			
ŘP	Počet děr	Opotřebení na hlavním ostří $\pm$ nejistota měření U	Opotřebení na vedlejším ostří $\pm$ nejistota měření U	Delaminace na výstupu $\pm$ nejistota měření U	Delaminace na vstupu $\pm$ nejistota měření U
n = 500 ot/min, f = 0,05 mm/ot	1	0,00	0,00	1664,72 $\pm$ 0,73	518,63 $\pm$ 0,62
	10	0,00	0,00	1382,35 $\pm$ 0,74	557,51 $\pm$ 0,60
	30	5,03 $\pm$ 0,67	0,00	1555,36 $\pm$ 0,78	511,96 $\pm$ 0,55
	40	5,99 $\pm$ 0,75	4,74 $\pm$ 0,53	1409,49 $\pm$ 0,77	524,25 $\pm$ 0,56
	50	7,13 $\pm$ 0,81	5,58 $\pm$ 0,58	1500,30 $\pm$ 0,75	511,09 $\pm$ 0,58
n = 1500 ot/min, f = 0,1 mm/ot	1	0,00	0,00	2069,85 $\pm$ 0,68	938,17 $\pm$ 0,62
	10	0,00	0,00	1977,80 $\pm$ 0,66	913,57 $\pm$ 0,65
	30	5,87 $\pm$ 0,79	0,00	2048,82 $\pm$ 0,72	1009,29 $\pm$ 0,68
	40	7,10 $\pm$ 0,72	5,09 $\pm$ 0,65	1956,45 $\pm$ 0,70	979,09 $\pm$ 0,59
	50	8,64 $\pm$ 0,75	5,77 $\pm$ 0,74	2077,47 $\pm$ 0,71	942,67 $\pm$ 0,63
n = 500 ot/min, f = 0,1 mm/ot	1	0,00	0,00	1960,84 $\pm$ 0,58	545,48 $\pm$ 0,55
	10	0,00	0,00	2125,29 $\pm$ 0,62	559,66 $\pm$ 0,58
	30	4,59 $\pm$ 0,58	0,00	2040,93 $\pm$ 0,61	570,56 $\pm$ 0,59
	40	4,83 $\pm$ 0,63	4,04 $\pm$ 0,91	1994,28 $\pm$ 0,57	530,61 $\pm$ 0,62
	50	5,77 $\pm$ 0,78	4,64 $\pm$ 0,94	2041,14 $\pm$ 0,64	543,83 $\pm$ 0,61
n = 1500 ot/min, f = 0,05 mm/ot	1	0,00	0,00	1357,34 $\pm$ 0,82	534,89 $\pm$ 0,62
	10	0,00	0,00	1338,94 $\pm$ 0,83	537,90 $\pm$ 0,64
	30	4,49 $\pm$ 0,81	0,00	1286,96 $\pm$ 0,75	500,54 $\pm$ 0,71
	40	4,70 $\pm$ 0,80	3,94 $\pm$ 0,63	1343,76 $\pm$ 0,79	522,84 $\pm$ 0,68
	50	5,66 $\pm$ 0,75	4,55 $\pm$ 0,65	1442,08 $\pm$ 0,74	497,96 $\pm$ 0,65

**Tab. 17** – Vliv řezných podmínek na delaminaci – průměrné hodnoty

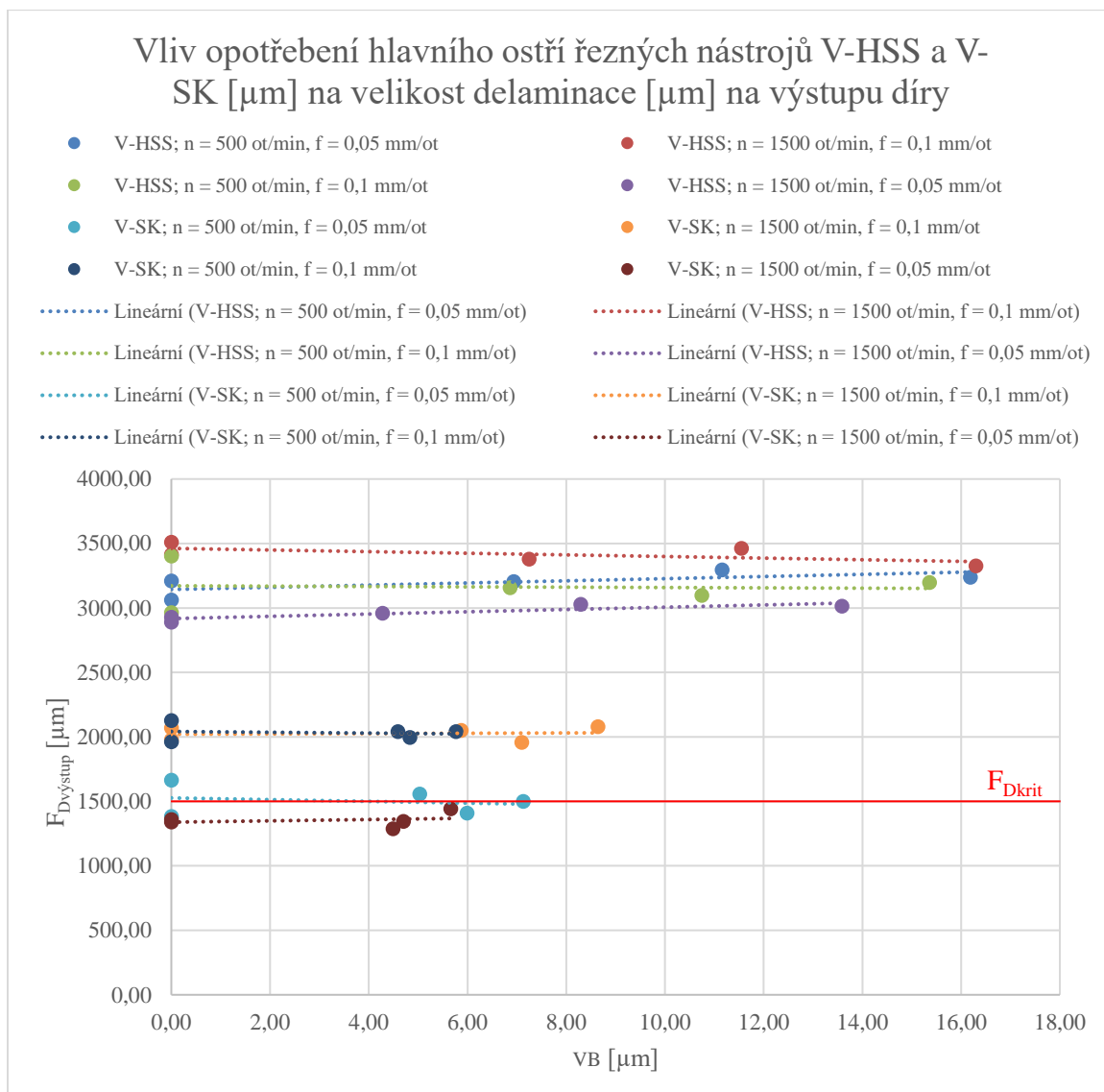
Vliv posuvu na otáčku a otáček vřetena na velikost delaminaci				
Jednotky [ $\mu\text{m}$ ]	Delaminace na vstupu $\pm$ nejistota měření U		Delaminace na výstupu $\pm$ nejistota měření U	
V-HSS	Posuv na otáčku [mm/ot]			
Ot. vřetena [ot/min]	0,05	0,1	0,05	0,1
500	1391,38 $\pm$ 0,68	1581,14 $\pm$ 0,75	3200,82 $\pm$ 0,73	3162,80 $\pm$ 0,83
1500	1120,45 $\pm$ 0,68	1889,27 $\pm$ 0,62	2963,58 $\pm$ 0,76	3417,71 $\pm$ 0,80
V-SK				
500	524,69 $\pm$ 0,58	550,03 $\pm$ 0,59	1502,44 $\pm$ 0,75	2026,08 $\pm$ 0,60
1500	518,83 $\pm$ 0,66	956,56 $\pm$ 0,63	1353,82 $\pm$ 0,79	2032,50 $\pm$ 0,69



**Graf 5** – Vliv opotřebení hlavního ostří řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ] na velikost delaminace [ $\mu\text{m}$ ] na vstupu díry

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulkách 14 a 15 a graficky znázorněných v grafu 5 vyplívá následující:

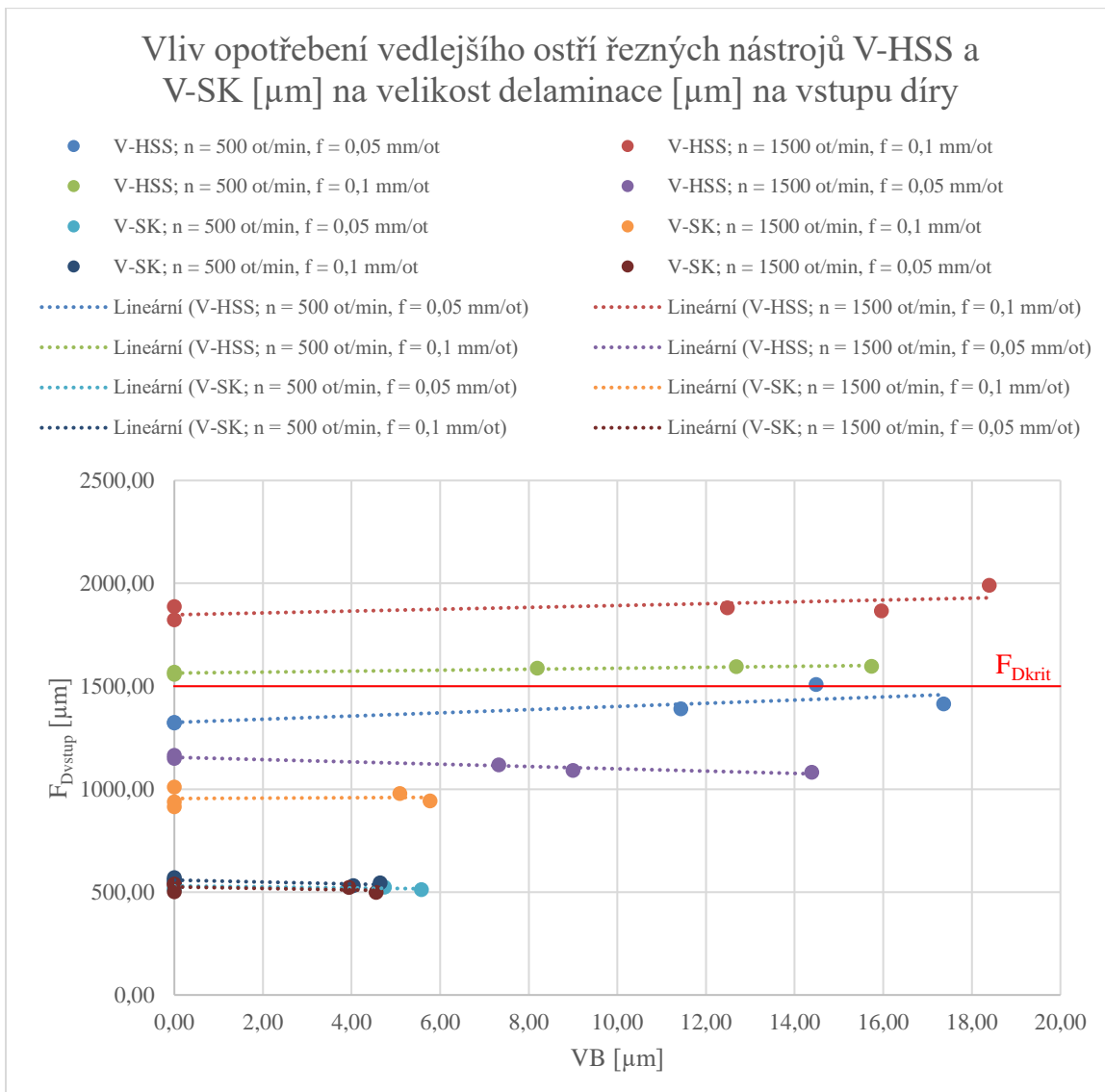
- 1) velikost opotřebení hlavního ostří obou řezných nástrojů měla minimální vliv na velikost delaminace na vstupu vyvrtané díry,
- 2) velikost delaminace na vstupu primárně závisela na procesních parametrech, tj. na řezných podmínkách a řezném nástroji.



**Graf 6 – Vliv opotřebení hlavního ostří řezných nástrojů V-HSS a V-SK [μm] na velikost delaminace [μm] na výstupu díry**

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulkách 14 a 15 a graficky znázorněných v grafu 6 vyplívá následující:

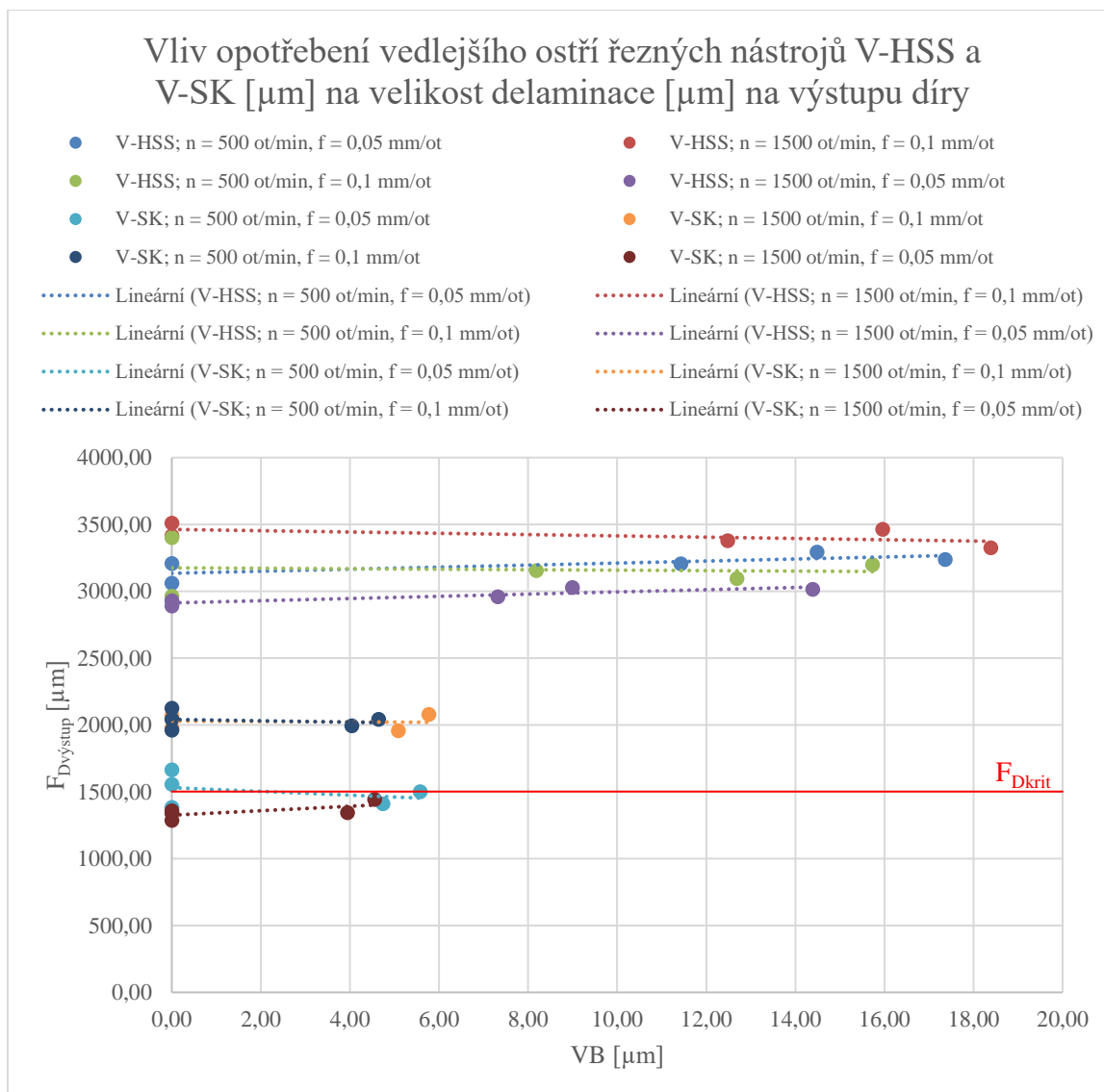
- 1) velikost opotřebení hlavního ostří obou řezných nástrojů měla minimální vliv na velikost delaminace na výstupu vyvrtané díry,
- 2) velikost delaminace na výstupu primárně závisela na procesních parametrech, tj. na řezných podmínkách a řezném nástroji,
- 3) delaminace se projevila více na výstupu než vstupu vyvrtané díry.



**Graf 7** – Vliv opotřebení vedlejšího ostří řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ] na velikost delaminace [ $\mu\text{m}$ ] na vstupu díry

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulkách 15 a 15 a graficky znázorněných v grafu 7 vyplívá následující:

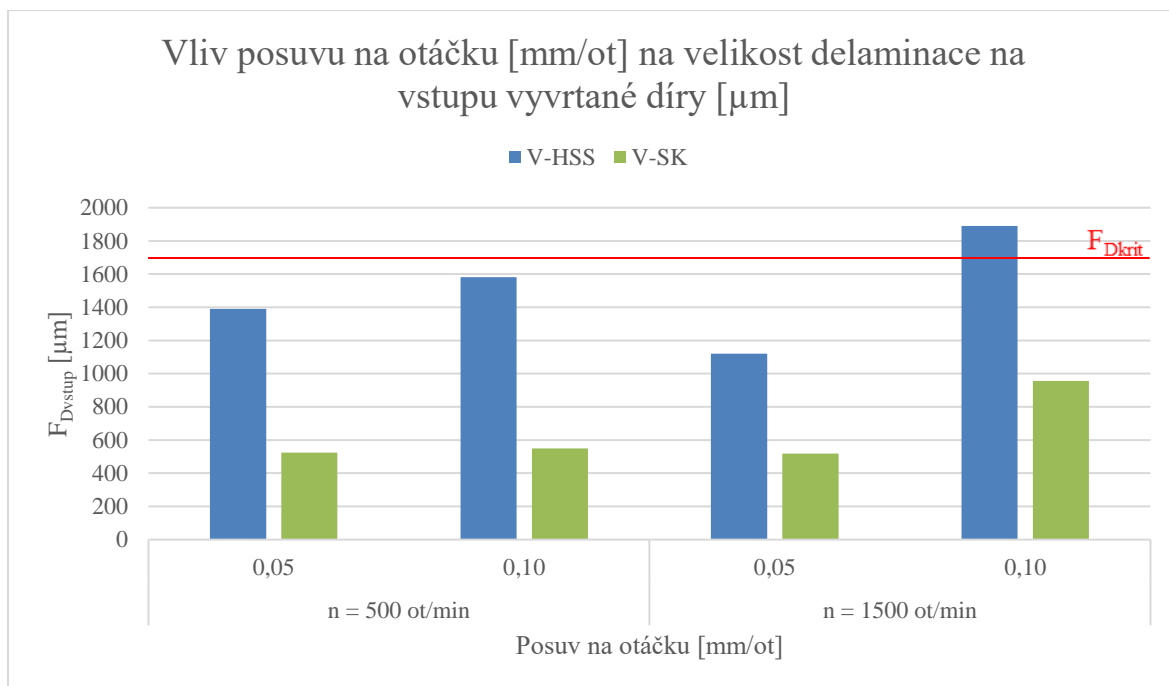
- 1) velikost opotřebení vedlejšího ostří obou řezných nástrojů měla minimální vliv na velikost delaminace na vstupu vyvrtané díry,
- 2) velikost delaminace na vstupu primárně závisela na procesních parametrech, tj. na řezných podmínkách a řezném nástroji.



**Graf 8** – Vliv opotřebení vedlejšího ostří řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ] na velikost delaminace [ $\mu\text{m}$ ] na výstupu díry

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulkách 14 a 15 a graficky znázorněných v grafu 8 vyplívá následující:

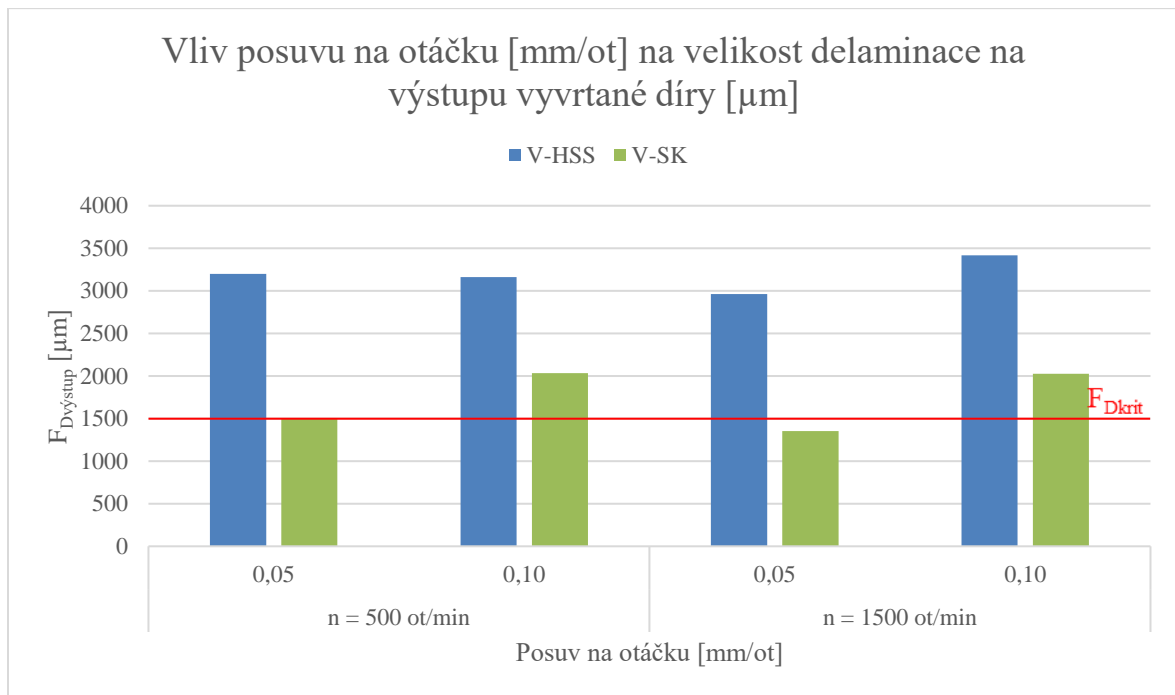
- 1) velikost opotřebení vedlejšího ostří obou řezných nástrojů měla minimální vliv na velikost delaminace na výstupu vyvrtané díry,
- 2) velikost delaminace na výstupu primárně závisela na procesních parametrech, tj. na řezných podmínkách a řezném nástroji,
- 3) delaminace se projevila více na výstupu než vstupu vyvrtané díry.



**Graf 9** – Vliv posuvu na otáčku [mm/ot] na velikost delaminace na vstupu vyvrtané díry [ $\mu\text{m}$ ]

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce 16 a graficky znázorněných v grafu 9 vyplívá následující:

- 1) s rostoucí rychlostí posuvu na otáčku roste i velikost delaminace na vstupu vyvrtané díry,
- 2) u řezného nástroje V-SK v kombinaci s otáčkami vřetena  $n = 500$  ot/min, má posuv na otáčku minimální vliv na velikost delaminace na vstupu vyvrtané díry.

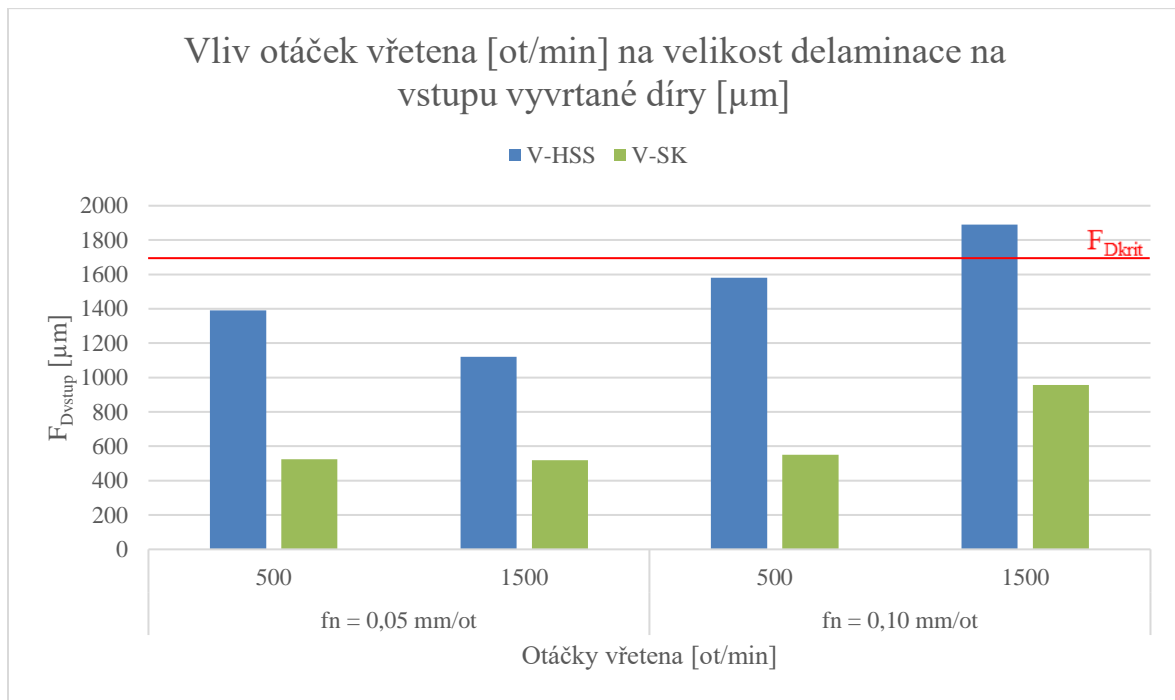


**Graf 10** – Vliv posuvu na otáčku [mm/ot] na velikost delaminace na výstupu vyvrtané díry [μm]

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce 16 a graficky znázorněných v grafu 10 vyplívá následující:

- 1) s rostoucí rychlostí posuvu na otáčku roste i velikost delaminace na výstupu vyvrtané díry,
- 2) pro otáčky vřetena  $n = 500$  ot/min a rezný nástroj V-HSS má změna posuvu na otáčku minimální vliv na velikost delaminace na výstupu vyvrtané díry.

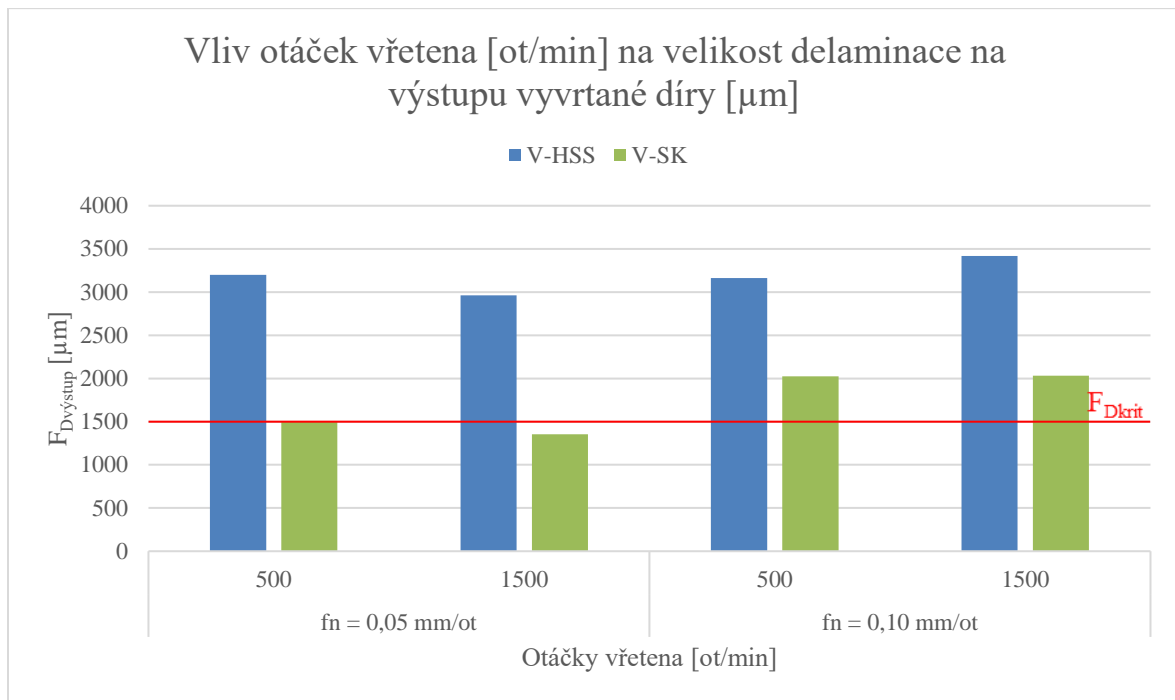




**Graf 11** – Vliv otáček vřetena [ot/min] na velikost delaminace na vstupu vyvrtané díry [ $\mu\text{m}$ ]

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce 16 a graficky znázorněných v grafu 11 vyplívá následující:

- 1) pro posuv na otáčku  $f_n = 0,10$  mm/ot dochází s rostoucími otáčkami vřetena ke zvětšování velikosti delaminace na vstupu vyvrtané díry,
- 2) pro posuv na otáčku  $f_n = 0,05$  mm/ot naopak dochází s rostoucími otáčkami vřetena ke snižování velikosti delaminace na vstupu vyvrtané díry,
- 3) u řezného nástroje V-SK v kombinaci s posuvem na otáčku  $f_n = 0,05$  mm/ot můžeme pozorovat minimální vliv hodnoty otáček vřetena na velikost dané delaminace.



**Graf 12** – Vliv otáček vřetena [ot/min] na velikost delaminace na výstupu vyvrtané díry [ $\mu\text{m}$ ]

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce 16 a graficky znázorněných v grafu 12 vyplívá následující:

- 1) pro posuv na otáčku  $f_n = 0,10$  mm/ot dochází s rostoucími otáčkami vřetena ke zvětšování velikosti delaminace na vstupu vyvrtané díry,
- 2) pro posuv na otáčku  $f_n = 0,05$  mm/ot naopak dochází s rostoucími otáčkami vřetena ke snižování velikosti delaminace na vstupu vyvrtané díry,
- 3) u rezného nástroje V-SK v kombinaci s posuvem na otáčku  $f_n = 0,10$  mm/ot můžeme pozorovat minimální vliv hodnoty otáček vřetena na velikost dané delaminace.

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulkách 15, 16 a 17 a graficky znázorněných v grafech 5 až 12 vyplívá, následující:

- 1) velikost opotřebení nástrojů měla minimální vliv na velikost delaminace,
- 2) velikost delaminace primárně závisela na procesních parametrech, které představují řezné podmínky a řezný nástroj,
- 3) delaminace se více projevila na výstupech z děr.


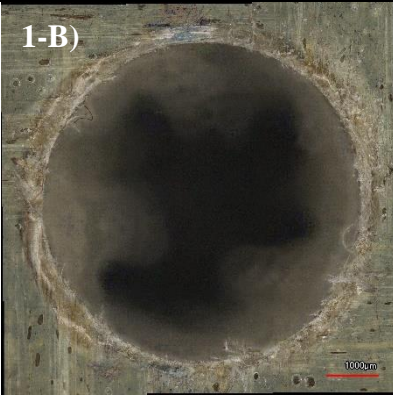
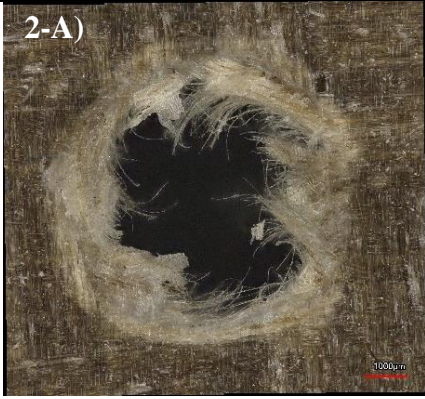
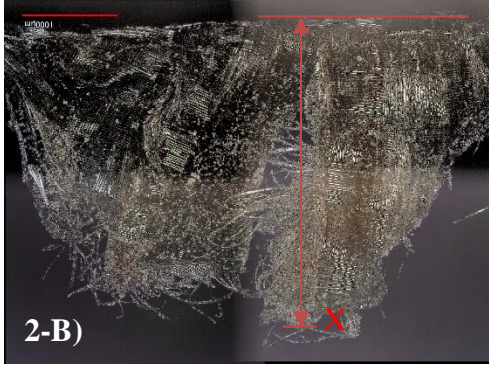
V tab. 15 můžeme pozorovat, že nejnižší hodnoty celkové delaminace bylo dosaženo s ŘP 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot), naopak nejhorších výsledků bylo dosaženo s ŘP 2 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,10$  mm/ot).

Z grafů 5 až 9 vyplívá, že velikost opotřebení vykazuje minimální, či až žádný vliv na velikost delaminace. BKM se oproti jiným kompozitním materiálům vyznačují nižší tvrdostí a abrazivitou. Tyto vlastnosti vedou společně s malou tloušťkou zkušebních vzorků k minimálnímu opotřebení nástroje, a tedy k minimálnímu ovlivnění velikosti delaminace jak na vstupu, tak výstupu z díry.








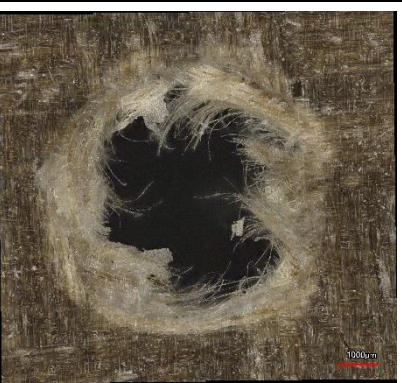
Posuv na otáčku, jak můžeme pozorovat v grafech 9 a 10, má zásadní vliv na celkovou velikost delaminace vyvrtané díry. Se zvyšující se rychlostí posuvu roste i velikost delaminace. To lze vysvětlit následovně, se zvyšující se rychlostí posuvu roste i velikost průřezu nedeformovaným materiálem v daném okamžiku. Větší tloušťka nebo plocha vrtaného průřezu vede k vyššímu odporu materiálu, a to má za následek i vyšší řeznou sílu. Vyšší odolnost materiálu proti proříznutí následně vede k vyšší hodnotě delaminace. Výjimku tvoří V-HSS s minimální změnou velikosti delaminace na výstupu z díry a V-SK s minimální změnou velikosti delaminace na vstupu vyvrtané díry. Společným parametrem těchto výjimek jsou otáčky vřeten  $n = 500$  ot / min. U V-HSS docházelo namísto řezání materiálu k jeho protlačování, což vedlo k velikosti delaminace rovnající se poloměru vyvrtané díry. Tento fakt naznačuje, že jakmile se špička řezného nástroje protlačila přes poslední vrstvu laminátu, došlo pouze k jejímu vytlačení na okraj vyvrtané díry a nikoliv k uříznutí, viz. tab. 18. Tuto skutečnost již změna hodnoty posuvu na otáčku nezměnila. U V-SK můžeme na druhou stranu pozorovat minimální změnu ve velikosti delaminace na vstupu vyvrtané díry. Lepší geometrické parametry tohoto vrtáku naznačují, že i při změně rychlosti posuvu, za daných otáček vřeten, došlo ke správnému řezání materiálu v rozmezí jeho výkonu.

Grafy 11 a 12 ukazují vliv otáček vřetena na velikost delaminace. Delaminace jak na vstupu, tak výstupu z díry u nástroje V-HSS rostla s vyšším posuvem na otáčku, naopak s nižším klesala v závislosti na otáčkách vřetena. Při nižší hodnotě posuvu na otáčku může být zvýšení otáček vřetena přínosné pro snížení velikosti delaminace, a to z důvodu, že s vyššími otáčkami roste i teplota v místě řezu. S nízkým posuvem na otáčku je v procesu vrtání dostatek času na to, aby došlo k dostatečnému prohřátí polymerní matrice, a tím se zlepšila její obrobiteľnosť. U nástroje V-SK můžeme pozorovat stejný průběh jako pro V-HSS. Výjimku tvoří velikost delaminace na výstupu u V-SK s posuvem na otáčku  $f_n = 0,10$  mm/ot. Zde otáčky vřetena neměly žádný vliv na velikost delaminace.






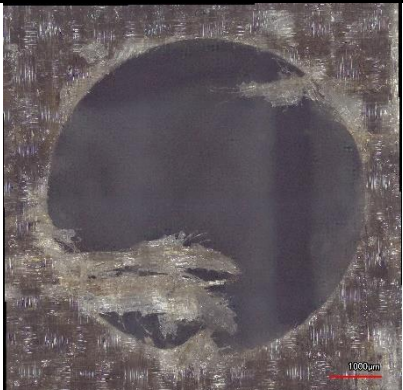
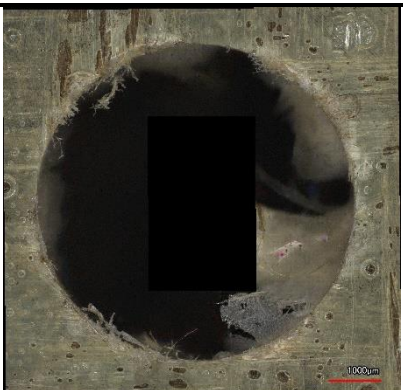

**Tab. 18** – Ukázka velikosti delaminace pro řezný nástroj V-HSS s ŘP 4

	<p>1-A) Pohled na vstup vyvrtané díry z profilu. Hodnota <b>X</b> dosahuje přes 1100 <math>\mu\text{m}</math>.</p> <p>1-B) Pohled na vstup vyvrtané díry ze shora.</p>
	
<p>2-A) Pohled na výstup vyvrtané díry ze shora.</p> <p>2-B) Pohled na výstup vyvrtané díry z profilu. Hodnota <b>X</b> dosahuje přes 3000 <math>\mu\text{m}</math>.</p>	

**Tab. 19** – Ukázka vyvrtaných děr / delaminace pro řezný nástroj V-HSS

		Vstup	Výstup
V-HSS	$n = 500$ ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot		
	$n = 1500$ ot/min, $f_n = 0,10$ mm/ot		
	$n = 500$ ot/min, $f_n = 0,10$ mm/ot		
	$n = 1500$ ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot		

**Tab. 20** – Ukázka vyvrtaných děr / delaminace pro řezný nástroj V-SK

		Vstup	Výstup
V-SK	<p>n = 500 ot/min, f<sub>n</sub> = 0,05 mm/ot</p>		
	<p>n = 1500 ot/min, f<sub>n</sub> = 0,10 mm/ot</p>		
	<p>n = 500 ot/min, f<sub>n</sub> = 0,10 mm/ot</p>		
	<p>n = 1500 ot/min, f<sub>n</sub> = 0,05 mm/ot</p>		

## 4.2.1 Hodnocení delaminace s podpěrnými deskami

Měření vlivu podpěrných desek na velikost delaminace bylo realizováno za těchto podmínek:

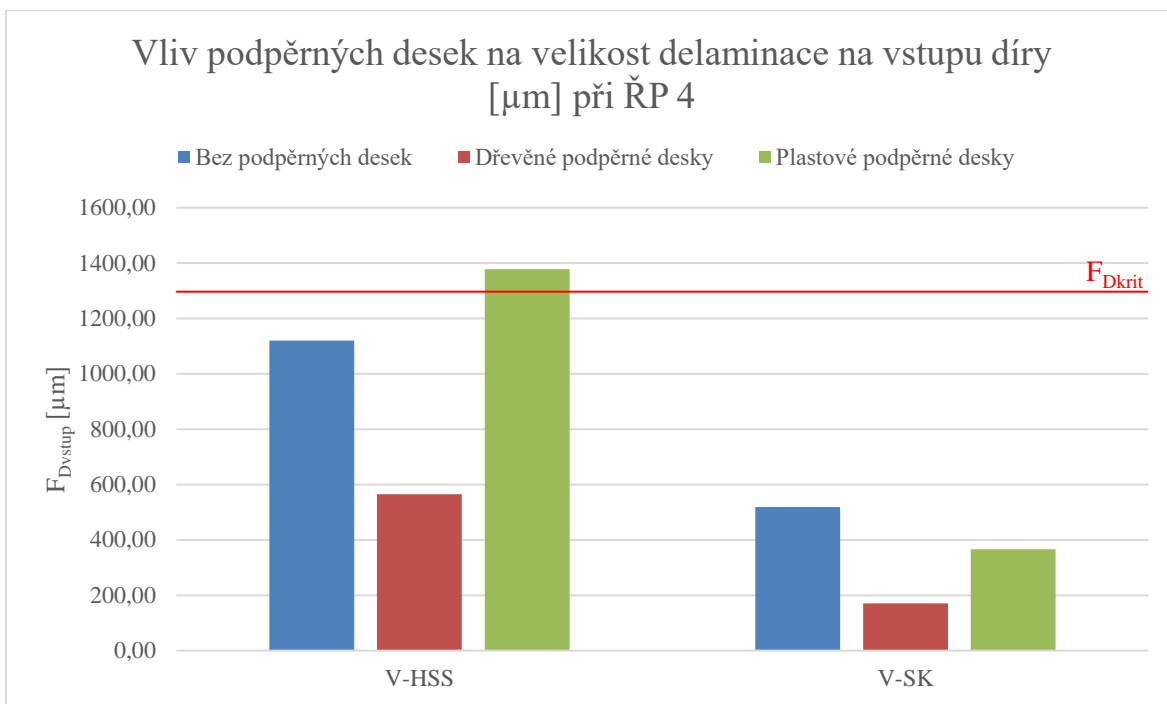
- z hodnocení delaminace v podkapitole 4.2 vychází ŘP 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot) jako nejvíce optimální pro vrtání BKM, z tohoto důvodu byly použity i pro tento experiment,
- velikost delaminace byla měřena vždy po 1, 10, 30, 40 a 50té vyvrtané díře na vstupu a výstupu díry,
- veškerá měření byla provedena 5x.

Vlastnosti a možnosti využití podpěrných desek v procesu vrtání je popsáno v podkapitole 2.2.4.

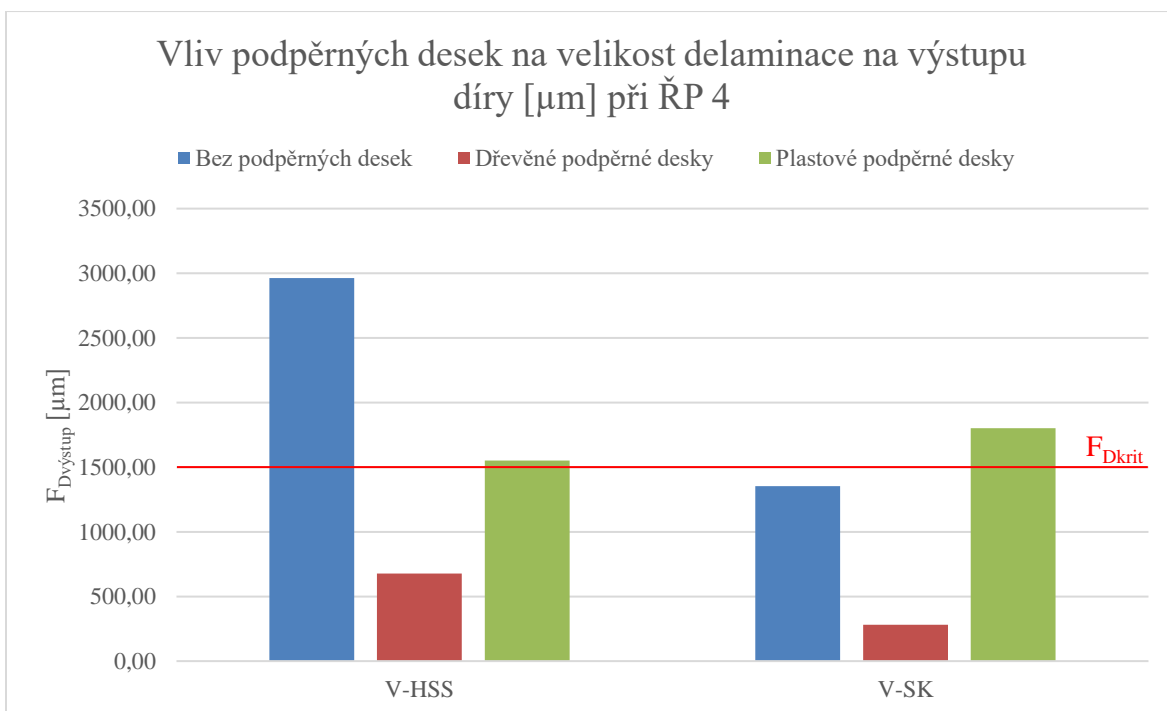
Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce 21. Grafické znázornění výsledků se nachází v grafu 13 a 14. Ukázka vyvrtaných děr s podpěrnými deskami se nachází v tabulce 22 a 23

**Tab. 21** – Vliv podpěrných desek na velikost delaminace [ $\mu\text{m}$ ]

Nástroj		V-HSS		V-SK	
Podpěrné desky	Počet děr	Delaminace na výstupu $\pm$ nejistota měření U	Delaminace na vstupu $\pm$ nejistota měření U	Delaminace na výstupu $\pm$ nejistota měření U	Delaminace na vstupu $\pm$ nejistota měření U
Dřevo	1	655,40 $\pm$ 0,72	586,92 $\pm$ 0,81	271,95 $\pm$ 0,55	164,43 $\pm$ 0,58
	10	693,15 $\pm$ 0,74	556,45 $\pm$ 0,82	274,72 $\pm$ 0,59	173,47 $\pm$ 0,54
	30	681,82 $\pm$ 0,75	565,81 $\pm$ 0,79	284,69 $\pm$ 0,56	167,80 $\pm$ 0,56
	40	688,05 $\pm$ 0,71	579,61 $\pm$ 0,78	293,44 $\pm$ 0,58	172,84 $\pm$ 0,55
	50	672,17 $\pm$ 0,76	538,25 $\pm$ 0,80	279,95 $\pm$ 0,57	176,33 $\pm$ 0,60
Aritmetický průměr		678,12 $\pm$ 0,73	565,41 $\pm$ 0,80	280,95 $\pm$ 0,57	170,97 $\pm$ 0,57
Plast	1	1586,59 $\pm$ 0,73	1399,04 $\pm$ 0,88	1734,56 $\pm$ 0,80	379,59 $\pm$ 0,74
	10	1576,42 $\pm$ 0,75	1387,49 $\pm$ 0,90	1736,78 $\pm$ 0,82	357,44 $\pm$ 0,75
	30	1521,27 $\pm$ 0,70	1381,12 $\pm$ 0,91	1823,92 $\pm$ 0,86	363,82 $\pm$ 0,78
	40	1530,45 $\pm$ 0,71	1336,38 $\pm$ 0,86	1844,91 $\pm$ 0,85	358,07 $\pm$ 0,79
	50	1541,97 $\pm$ 0,78	1387,66 $\pm$ 0,84	1865,68 $\pm$ 0,88	373,79 $\pm$ 0,73
Aritmetický průměr		1551,34 $\pm$ 0,73	1378,34 $\pm$ 0,88	1801,17 $\pm$ 0,84	366,54 $\pm$ 0,76



**Graf 13** – Vliv podpěrných desek na velikost delaminace na vstupu díry [μm] při ŘP 4



**Graf 14** – Vliv podpěrných desek na velikost delaminace na výstupu díry [μm] při ŘP 4



Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce 21 a graficky znázorněných v grafech 13 a 14 vyplívá následující:

- 1) použití dřevěných podpěrných desek vedlo k razantnímu snížení velikosti delaminace jak na vstupu, tak výstupu z díry pro oba řezné nástroje,
- 2) použití plastových podpěrných desek vedlo jak ke zvýšení, tak ke snížení velikosti delaminace, oproti vrtání bez podpěrných desek; u řezného nástroje V-HSS došlo ke zvýšení velikosti delaminace na vstupu, na výstupu naopak ke snížení; u řezného nástroje V-SK můžeme pozorovat opak.



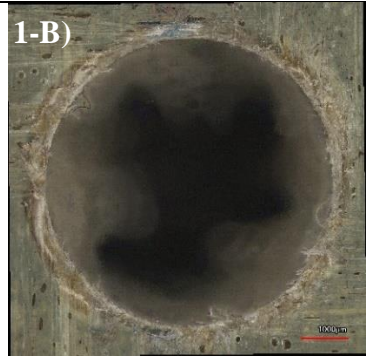
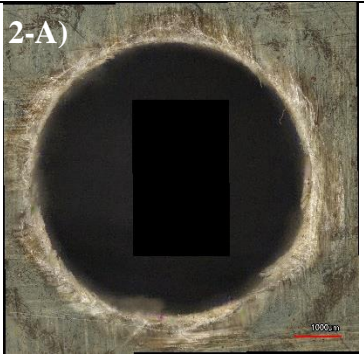
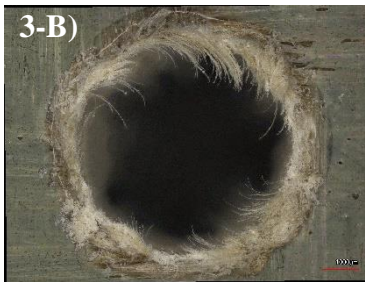
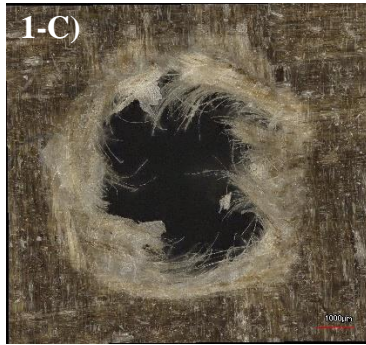
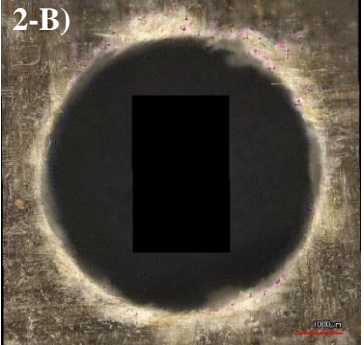
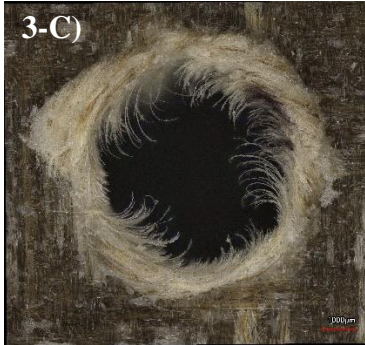
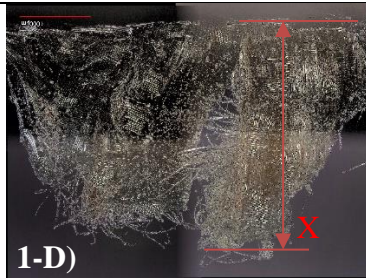
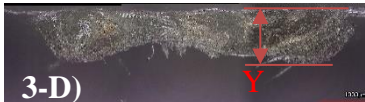
Dřevěné podpěrné desky díky svým vlastnostem pevného, ale relativně měkkého materiálu dokázaly pevně přilnout k vrtanému materiálu, a tím zamezili jednak „uhýbání“ materiálu před uříznutím, ale také snížily hodnoty oddělování laminátových vrstev od sebe. Z těchto důvodů došlo k zásadnímu snížení velikosti delaminace pro oba obráběné materiály, tak jak je možné vidět na grafech 13 a 14, tab. 22 a tab. 23 (vyvrtaná díra 2).

Plastové podpěrné desky se naopak ukázaly jako špatná volba. U řezného nástroje V-HSS došlo sice ke snížení velikosti delaminace na výstupu z vyvrtané díry, nicméně na jejím vstupu došlo ke zvýšení velikosti delaminace, oproti hodnotám bez využití podpěrných desek. U řezného nástroje V-SK můžeme pozorovat opak, snížení velikosti delaminace na vstupu a zvýšení na výstupu vyvrtané díry, tak jak je možné vidět na grafech 13 a 14, tab. 22 a tab. 23 (vyvrtaná díra 3).


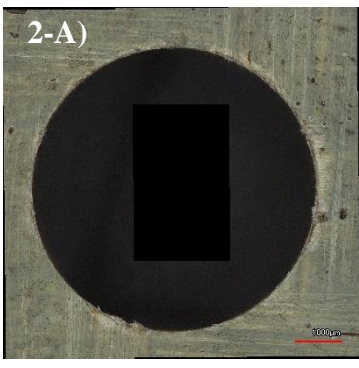
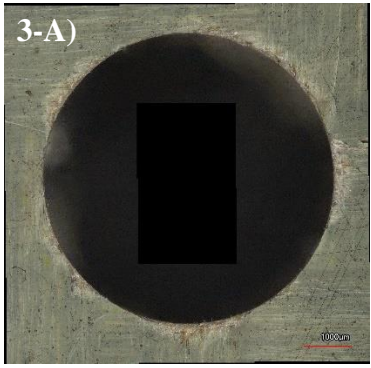
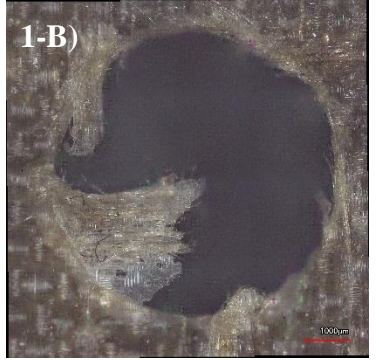
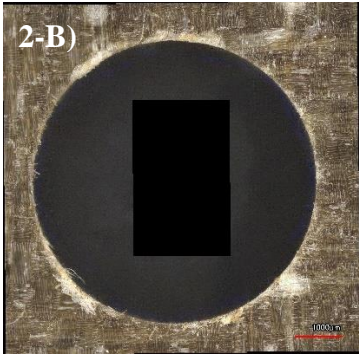
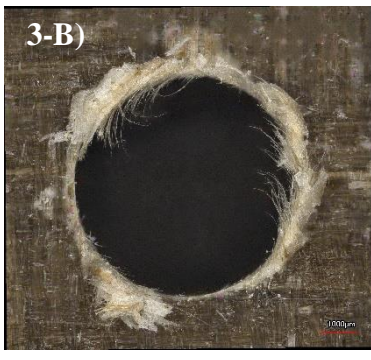
Plastové podpěrné desky po utažení vrtacího přípravku vykazovaly poměrně velkou deformaci, což způsobilo přesun objemu materiálu z místa deformace. Z tohoto důvodu plastové desky nedokázali plně přilnout k vrtanému materiálu. Spodní podpěrná deska nebyla, až na výjimky, provrtaná. Z těchto důvodů docházelo k pěchování materiálu v okolí vyvrtané díry mezi podpěrnými deskami a obráběným materiálem, viz. tab. 22 a 23 (vyvrtaná díra 3).

Tabulky 22 a 23 zobrazují vyvrtanou díru z různých pohledů bez podpěrných desek (vyvrtaná díra 1) a s jejich využitím (vyvrtané díry 2 a 3). Každá vyvrtaná díra je ucelena číslováním, např. 1-A až 1-D atd.

Tab. 22 – Ukázka vyvrtaných děr s podpěrnými deskami pro řezný nástroj V-HSS a ŘP 4

V-HSS; n = 1500 ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot		
Bez podpěrných desek	Dřevěné podpěrné desky	Plastové podpěrné desky
Pohled na vstup vyvrtané díry z profilu.		
 <p>1-A)</p>	<p>1-A) Hodnota <b>X</b> dosahuje přes 1100 <math>\mu\text{m}</math>.</p> <p>3-A) Hodnota <b>Y</b> dosahuje přes 600 <math>\mu\text{m}</math>.</p>	 <p>3-A)</p>
Pohled na vstup vyvrtané díry ze shora.		
 <p>1-B)</p>	 <p>2-A)</p>	 <p>3-B)</p>
Pohled na výstup vyvrtané díry ze shora.		
 <p>1-C)</p>	 <p>2-B)</p>	 <p>3-C)</p>
Pohled na výstup vyvrtané díry z profilu.		
 <p>1-D)</p>	<p>1-D) Hodnota <b>X</b> dosahuje přes 3000 <math>\mu\text{m}</math>.</p> <p>3-D) Hodnota <b>Y</b> dosahuje přes 1500 <math>\mu\text{m}</math>.</p>	 <p>3-D)</p>

**Tab. 23** – Ukázka vyvrtaných děr s podpěrnými deskami pro řezný nástroj V-SK a ŘP 4

V-SK; $n = 1500$ ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot		
Bez podpěrných desek	Dřevěné podpěrné desky	Plastové podpěrné desky
Pohled na vstup vyvrtané díry ze shora.		
<p>1-A)</p> 	<p>2-A)</p> 	<p>3-A)</p> 
Pohled na výstup vyvrtané díry ze shora.		
<p>1-B)</p> 	<p>2-B)</p> 	<p>3-B)</p> 

### 4.3 Hodnocení prachových částic

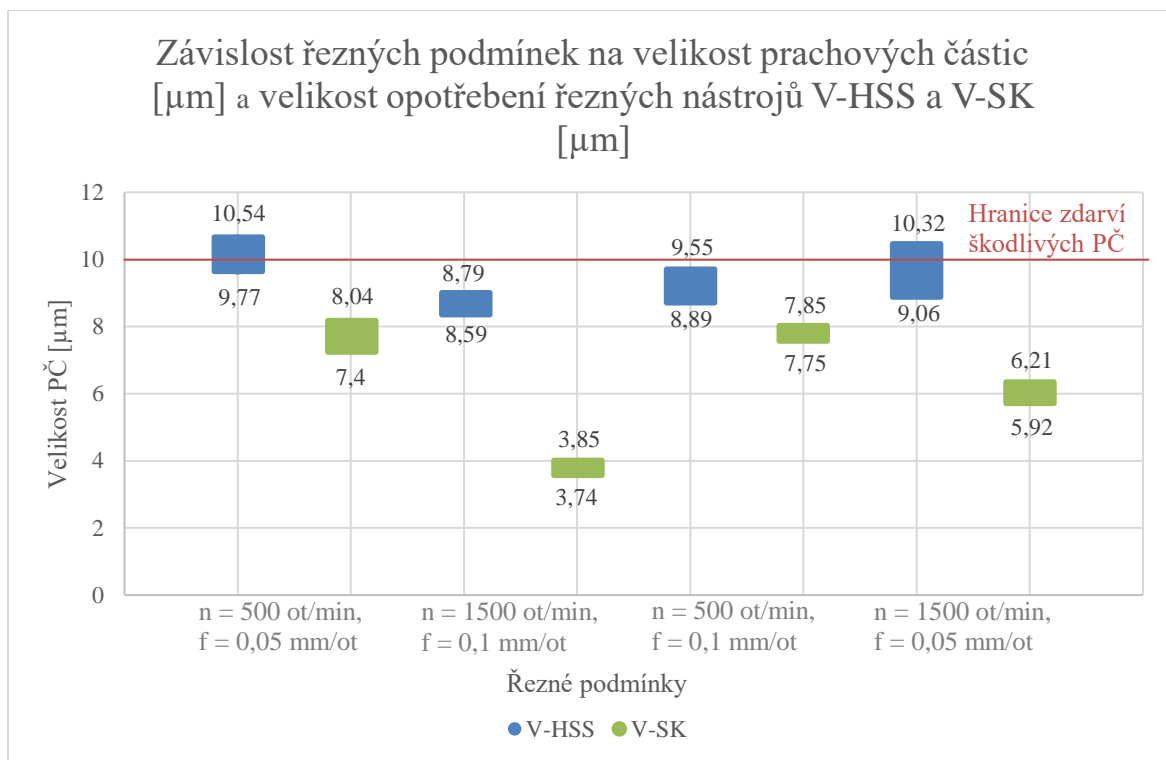
Měření prachových částic (třísek) bylo provedeno vždy u první a poslední vyvrtané díry, tj. 1 a 50té díry. Odběr PČ byl realizován z blízkosti místa řezu. Veškerá měření byla provedena 5x.

Dle vědeckých článků je možné pozorovat PČ v závislosti na opotřebením nástroje a ŘP. Z literatury vyplývá, že s opotřebeným nástrojem vznikají částice menších rozměrů. Takto vytvořené PČ se skládají z výztuže a matrice. Při vrtání BKM však dochází k nízkému opotřebením nástrojů v porovnání s vrtáním jiných kompozitních materiálů (např. s uhlíkovými vlákny). Nízká hodnota opotřebením má za následek minimálně se měnící velikost PČ, tak jak bylo pozorováno i v této práci. Z důvodu minimálního opotřebením je rozdíl ve velikosti nejmenších a největších PČ minimální.

Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce 24. Grafické znázornění výsledků se nachází v grafu 15. Ukázka nejmenších PČ se nachází v tabulce 24.

**Tab. 24** – Vliv počtu vyvrtaných děr / opotřebením nástroje [ $\mu\text{m}$ ] na velikost PČ

ŘP	Počet vyvrtaných děr	Nástroj	Velikost třísky $\pm$ nejistota měření U	Nástroj	Velikost třísky $\pm$ nejistota měření U
n = 500 ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot	1	V - H S S	10,54 $\pm$ 0,59	V - S K	8,04 $\pm$ 0,55
	50		9,77 $\pm$ 0,58		7,40 $\pm$ 0,54
n = 1500 ot/min, $f_n = 0,10$ mm/ot	1		8,79 $\pm$ 0,55		3,85 $\pm$ 0,58
	50		8,59 $\pm$ 0,54		3,74 $\pm$ 0,56
n = 500 ot/min, $f_n = 0,10$ mm/ot	1		9,55 $\pm$ 0,61		7,85 $\pm$ 0,62
	50		8,89 $\pm$ 0,59		7,75 $\pm$ 0,64
n = 1500 ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot	1		10,32 $\pm$ 0,65		6,21 $\pm$ 0,59
	50		9,06 $\pm$ 0,68		5,92 $\pm$ 0,57



**Graf 15** – Závislost řezných podmínek na velikost prachových částic [ $\mu\text{m}$ ] a velikost opotřebení řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ]

Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce 24 a graficky znázorněných v grafu 15 vyplívá následující:

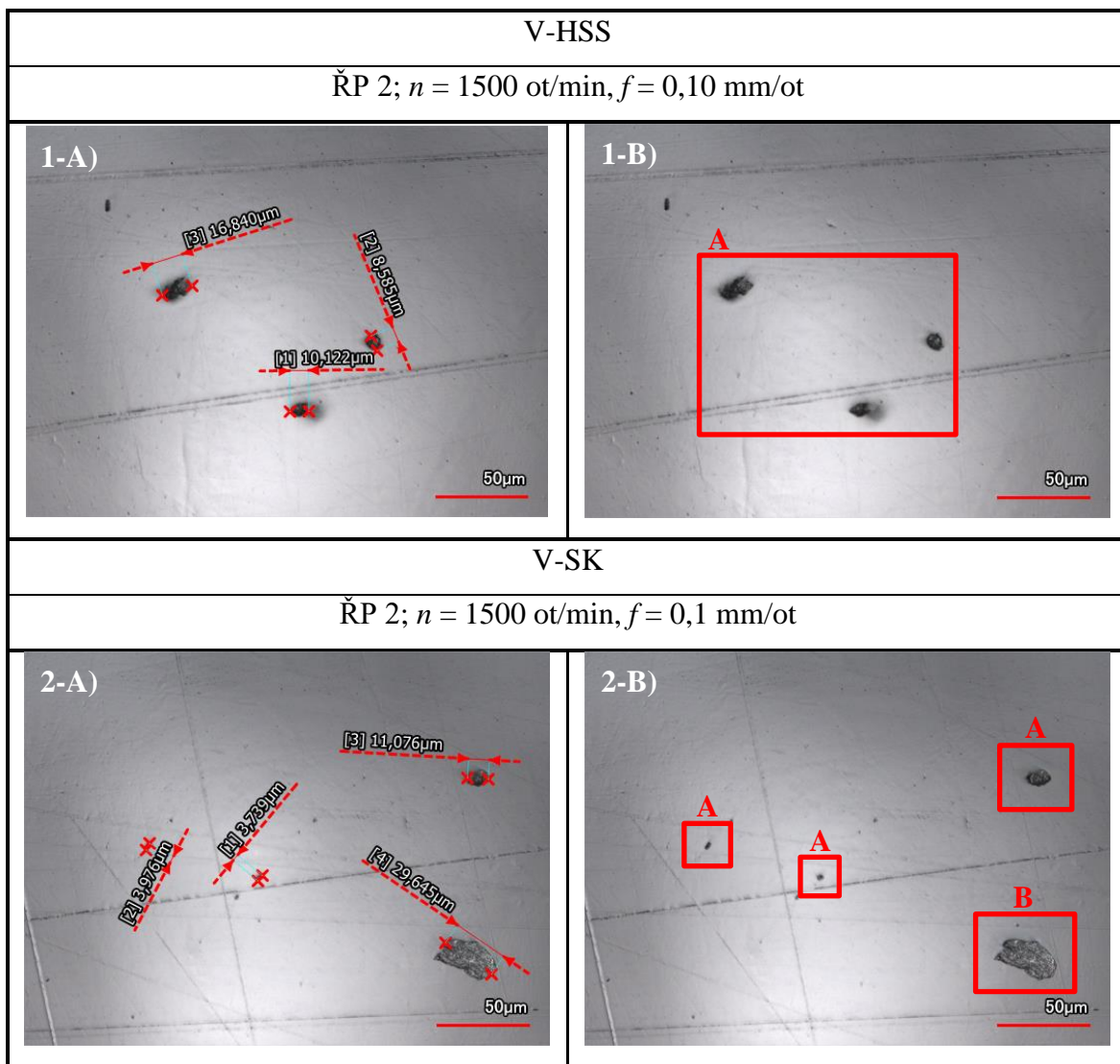
- 1) velikost opotřebení nástroje má vliv na velikost PČ,
- 2) se zvyšujícími se hodnotami ŘP dochází ke zmenšování PČ,
- 3) nástroj V-SK generoval menší PČ,
- 4) PČ, které vznikly v procesu vrtání spadají svou velikostí do zdraví škodlivých.

Z důvodu nízkého opotřebení řezných nástrojů, viz. podkapitola 4.1, můžeme v grafu 15 pozorovat malý rozdíl v hodnotách velikostí nejmenších naměřených PČ. Nicméně nelze popřít fakt, že i přes nízké opotřebení řezných nástrojů, docházelo ke snižování velikosti PČ.

Zvyšující se řezná rychlost a posuv na otáčku vede dle grafu 15 ke snížení velikosti PČ pro oba řezné nástroje. Velikost PČ se pohybovala v intervalu od  $10,54 \pm 0,59 \mu\text{m}$  do  $8,59 \pm 0,54 \mu\text{m}$  pro řezný nástroj V-HSS. Pro řezný nástroj V-SK je interval v rozmezí od  $8,04 \pm 0,55 \mu\text{m}$  do  $3,74 \pm 0,56 \mu\text{m}$ .

Nejmenší naměřené PČ pro oba nástroje spadají svou velikostí (menší jak 10  $\mu\text{m}$ ) do skupiny zdraví škodlivých. Tyto částice mohou jednoduše cestovat atmosférou a způsobovat zdravotní potíže.

**Tab. 25** – Ukázka nejmenších naměřených PČ [ $\mu\text{m}$ ] pro řezné nástroje V-HSS a V-SK; zvětšení 50x



V tabulce 25 můžeme pozorovat PČ slepené epoxidové pryskyřice s lněnými vlákny v červených rámečcích označených písmenem A. Červený rámeček označený písmenem B ukazuje úlomek čisté epoxidové pryskyřice.

## 5 Diskuse výsledků

Předkládaná diplomová práce se věnuje výzkumu vlivů procesních parametrů na velikost opotřebení řezného nástroje, delaminace (na vstupu a výstupu vyvrtané díry) a na velikosti škodlivých prachových částic při vrtání kompozitního materiálu vyztuženého lněnými přírodními vlákny s tkaninou keprové vazby 2/2 s orientací vláken 90°. Sledované procesní parametry byly materiál, geometrie řezného nástroje a řezné podmínky.

Pro dosažení vytyčených cílů diplomové práce bylo nejprve nutné provést literární rešerši k dané problematice, která je popsána v teoretické části této práce a nachází se v kapitole 2. Teoretická část této práce předkládá teoretické znalosti o biokompozitních materiálech (podkapitola 2.1) a aktuální problematice vrtání biokompozitních materiálů (podkapitola 2.2). Dále bylo nutné navrhnout vhodnou metodiku experimentu, která je popsána v kapitole 3. Metodická část této práce zahrnuje volbu řezných nástrojů (podkapitola 3.2), řezných podmínek (podkapitola 3.3) a návrh postupů měření daných veličin pro splnění cílů. Mezi měřené veličiny se řadí opotřebení nástroje (podkapitola 3.8), velikost delaminace na vstupu a výstupu vyvrtané díry (podkapitola 3.9) a prachové částice (podkapitola 3.10). V neposlední řadě bylo nutné stanovit limitní hodnotu průměrné velikosti delaminace  $F_{Dkrit}$  na vstupu a výstupu z vyvrtané díry. Pro danou limitní hodnotu neexistuje žádný průmyslový standard či předepisující norma. V této práci byla zvolena limitní průměrná hodnota  $F_{Dkrit} = 1500 \mu\text{m}$ .

Realizovaný experiment a jeho výstupy jsou obsaženy v kapitole 4 s názvem Experimentální část.

Z obsáhlého experimentálního měření a získaných výsledků lze shrnout následující:

### **1. Vliv počtu vyvrtaných děr a procesních parametrů na velikosti opotřebení řezných nástrojů**

Řezný nástroj je v rámci procesu vrtání opotřebováván abrazivními účinky kompozitního materiálu. Opotřebení řezného nástroje vzniká otěrem přírodních vláken. V rámci experimentálního měření bylo prokázáno následující:

- nízká abrazivita přírodních vláken vede k nízkému opotřebení nástrojů,
- opotřebení sledovaných řezných nástrojů rostlo v závislosti na počtu vyvrtaných děr a řezných podmínkách,
- geometrie řezných nástrojů měla rozhodující vliv na velikost opotřebení mezi hlavním a vedlejším ostřím nástroje.

Biokompozitní materiály se vyznačují nízkou abrazivitou a celkově nižší tvrdostí oproti jiným kompozitním materiálům (např. vyztužených uhlíkovými vlákny). Z tohoto důvodu můžeme pozorovat nízké hodnoty opotřebení u obou řezných nástrojů. I v případě nástroje V-HSS, který namísto řezání materiál protlačoval.

Opotřebení u obou řezných nástrojů rostlo s počtem vyvrtaných děr. Dále bylo opotřebení závislé na daných řezných podmínkách. Velikost opotřebení dosáhla vyšších hodnot s vyšším posuvem na otáčku. Vyšší hodnota otáček vřetena v kombinaci s nižším posuvem na otáčku vyšla dle analýzy výsledků jako nejlepší kombinace z pohledu životnosti nástroje.

Geometrie nástroje má zásadní vliv nejen z pohledu opotřebení, ale i na celkovou výslednou jakost vyvrtané díry, při vrtání biokompozitních materiálů. Vyšší hodnoty opotřebení můžeme pozorovat u řezného nástroje V-HSS. Jak je vysvětleno v podkapitole 4.1, nástroj V-HSS materiál namísto řezání protlačoval, což vedlo nejen k vyšším hodnotám opotřebení, ale i vyšším hodnotám opotřebení vedlejšího ostří nástroje. Vhodnější geometrie nástroje V-SK vedla ke správnému mechanismu řezání díry, a tedy i k nižším hodnotám opotřebení.



Řezný nástroj V-HSS dosáhl nejvyšších hodnot opotřebení s ŘP 2 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,10$  mm/ot), naopak nejnižších dosáhnul s ŘP 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot). Velikost opotřebení dosáhla hodnot  $16,30 \pm 0,90$   $\mu\text{m}$  a  $18,39 \pm 0,68$   $\mu\text{m}$  pro ŘP 2 a  $13,59 \pm 0,68$   $\mu\text{m}$  a  $14,39 \pm 0,71$   $\mu\text{m}$  pro ŘP 4, pro hlavní a vedlejší ostří.

Řezný nástroj V-SK dosáhl nejvyšších hodnot opotřebení s ŘP 2, naopak nejnižších dosáhnul s ŘP 4. Velikost opotřebení dosáhla hodnot  $8,64 \pm 0,75$   $\mu\text{m}$  a  $5,77 \pm 0,74$   $\mu\text{m}$  pro ŘP 2 a  $5,66 \pm 0,75$   $\mu\text{m}$  a  $4,55 \pm 0,65$   $\mu\text{m}$  pro ŘP 4, pro hlavní a vedlejší ostří.

**Tab. 26** – Shrnutí výsledků opotřebení řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ] po vyvrtání 50 děr  $\pm$  nejistota měření  $U$

ŘP	ŘP 1; $n = 500$ ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot		ŘP 2; $n = 1500$ ot/min, $f_n = 0,10$ mm/ot		ŘP 3; $n = 500$ ot/min, $f_n = 0,10$ mm/ot		ŘP 4; $n = 1500$ ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot	
	Hlavní ostří	Vedlejší ostří	Hlavní ostří	Vedlejší ostří	Hlavní ostří	Vedlejší ostří	Hlavní ostří	Vedlejší ostří
V-HSS	16,19 $\pm 0,65$	17,36 $\pm 0,90$	16,30 $\pm 0,90$	18,39 $\pm 0,68$	15,36 $\pm 0,65$	15,73 $\pm 0,82$	13,59 $\pm 0,68$	14,39 $\pm 0,71$
V-SK	7,13 $\pm 0,81$	5,58 $\pm 0,58$	8,64 $\pm 0,75$	5,77 $\pm 0,74$	5,77 $\pm 0,78$	4,64 $\pm 0,94$	5,66 $\pm 0,75$	4,55 $\pm 0,65$

## 2. Vliv opotřebení nástroje na velikost delaminace

Velikost delaminace byla měřena na vstupu a výstupu z vyvrtané díry v závislosti na počtu vyvrtaných děr a tedy i v závislosti na opotřebení nástroje. V rámci experimentálního měření bylo prokázáno následující:

- velikost delaminace na vstupu i výstupu vyvrtané díry se měnila v závislosti na počtu vyvrtaných děr,
- hodnota opotřebení rostla s počtem vyvrtaných děr, neměla však vliv na velikost výsledné delaminace.

Hodnoty velikosti delaminace se měnily s počtem vyvrtaných děr. Dle výsledků měření v podkapitole 4.2 však není potvrzeno, že by velikost delaminace rostla s rostoucím opotřebením nástroje. Z celkového měření plyne, že nízké opotřebením nástrojů nevedlo k ovlivnění velikosti výsledné delaminace.

### 3. Vliv řezných podmínek na velikost delaminace

Velikost delaminace byla měřena na vstupu a výstupu z vyvrtané díry v závislosti na řezných podmínkách. V rámci experimentálního měření bylo prokázáno následující:

- se zvyšujícím se posuvem na otáčku roste i velikost delaminace jak na vstupu, tak výstupu z vyvrtané díry,
- posouzení vlivu otáček vřetena není jednoznačné, v kombinaci s nižší hodnotou posuvu na otáčku vedou ke snížení velikosti delaminace, naopak s vyšší hodnotou posuvu na otáčku k jejímu zvýšení.

Velikost delaminace na vstupu i výstupu vyvrtané díry rostla společně s vyššími hodnotami posuvu na otáčku, naopak s nižšími hodnotami posuvu na otáčku docházelo k jejímu snížení.

Hodnota otáček vřetena měla vliv na velikost delaminace především u nástroje V-HSS, kde v závislosti na posuvu na otáčku docházelo ke snižování, nebo zvyšování celkové velikosti delaminace. U nástroje V-SK měly otáčky vřetena vliv pouze na velikost delaminace na vstupu vyvrtané díry pro posuv na otáčku  $f_n = 0,10$  mm/ot. Pro ostatní řezné podmínky byl zjištěn pouze minimální či žádný vliv na výslednou velikost delaminace.

Nejnižších hodnot velikosti delaminace bylo dosaženo s ŘP 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot). Nejvyšších hodnot bylo dosaženo s ŘP 2 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,10$  mm/ot).

Průměrná velikost delaminace vyvrtané díry, pro řezný nástroj V-HSS a ŘP 4, se pohybovala v rozmezí od  $1081,32 \pm 0,68$   $\mu\text{m}$  do  $1163,47 \pm 0,67$   $\mu\text{m}$  na vstupu a od  $2889,92 \pm 0,76$   $\mu\text{m}$  do  $3028,49 \pm 0,75$   $\mu\text{m}$  na výstupu. U ŘP 2 se velikost delaminace pohybovala v rozmezí od  $1822,43 \pm 0,63$   $\mu\text{m}$  do  $1990,31 \pm 0,64$   $\mu\text{m}$  na vstupu a od  $3324,38 \pm 0,75$   $\mu\text{m}$  do  $3509,45 \pm 0,85$   $\mu\text{m}$  na výstupu.

Průměrná velikost delaminace vyvrtané díry, pro nástroj V-SK a ŘP 4, se pohybovala v rozmezí od  $497,96 \pm 0,65 \mu\text{m}$  do  $537,90 \pm 0,64 \mu\text{m}$  na vstupu a od  $1286,96 \pm 0,75 \mu\text{m}$  do  $1442,08 \pm 0,74 \mu\text{m}$  na výstupu. U ŘP 2 se velikost delaminace pohybovala v rozmezí od  $913,57 \pm 0,65 \mu\text{m}$  do  $1009,29 \pm 0,68 \mu\text{m}$  na vstupu a od  $1956,45 \pm 0,70 \mu\text{m}$  do  $2077,47 \pm 0,71 \mu\text{m}$  na výstupu.

Předem definovanou limitní hodnotu průměrné velikosti delaminace,  $F_{Dkrit} = 1500 \mu\text{m}$ , splňuje pouze nástroj V-SK v kombinaci s ŘP 4 ( $n = 1500 \text{ ot/min}$ ,  $f_n = 0,05 \text{ mm/ot}$ ). Nástroj V-HSS nedokázal splnit limitní hodnotu.

Získané výsledky jsou v relaci s údaji v publikacích od BELAADI a spol. [32] [34] a TABETA a spol. [13].

#### **4. Vliv geometrie nástroje na velikost delaminace**

Geometrie řezného nástroje je zásadní pro splňující výslednou jakost vyvrtané díry. Geometrie obou nástrojů je detailně studována v podkapitole 3.2. V rámci experimentálního měření a studia nástrojů bylo prokázáno následující:

- větší poloměr hlavního ostří má negativní vliv na vrtání BKM,
- větší poloměr hlavního ostří vede k protlačování BKM, namísto jeho řezání.

Nástroj V-HSS disponuje větším poloměrem hlavního ostří, oproti nástroji V-SK. Tento rozdíl v geometrii obou nástrojů vedl k protlačování materiálu na straně V-HSS, namísto jeho řezání. Tento fakt negativně ovlivnil velikost delaminace i opotřebení nástroje.

Získané výsledky nejsou ve shodě s výsledky v publikaci LOFTI a spol. [35]. V této práci i v dané publikaci jsou použity stejné druhy řezných nástrojů. V publikaci však šroubovitý vrták z HSS disponuje ostřejší geometrií, oproti šroubovitému vrtáku z SK. Z tohoto důvodu má také lepší výsledky. V této práci je tomu naopak.

**Tab. 27** – Shrnutí výsledků průměrné velikosti delaminace [ $\mu\text{m}$ ]  $\pm$  nejistota měření  $U$

ŘP	ŘP 1; n = 500 ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot		ŘP 2; n = 1500 ot/min, $f_n = 0,10$ mm/ot		ŘP 3; n = 500 ot/min, $f_n = 0,10$ mm/ot		ŘP 4; n = 1500 ot/min, $f_n = 0,05$ mm/ot	
	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
V- HSS	1391,38 $\pm 0,68$	3200,82 $\pm 0,73$	1889,27 $\pm 0,62$	3417,71 $\pm 0,71$	1581,14 $\pm 0,75$	3162,80 $\pm 0,83$	1120,45 $\pm 0,68$	2963,58 $\pm 0,76$
V-SK	524,69 $\pm 0,58$	1502,44 $\pm 0,75$	956,56 $\pm 0,63$	2032,50 $\pm 0,69$	550,03 $\pm 0,59$	2026,08 $\pm 0,60$	518,83 $\pm 0,66$	1353,82 $\pm 0,79$

### 5. Vliv využití podpěrných desek na velikost delaminace

Nad rámec diplomové práce byl realizován experiment za využití podpěrných desek v procesu vrtání a jejich vliv na velikost delaminace (podkapitola 2.2.4 a 3.6). Pro experiment byly zvoleny neoptimálnější řezné podmínky, které vycházejí z předešlých výsledků (podkapitola 4.2). Řezné podmínky byly zvoleny č. 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot). Nástroje zůstaly stejné. V rámci experimentálního měření bylo prokázáno následující:

- opotřebení nástroje nemělo vliv na velikost delaminace i za použití podpěrných desek,
- dřevěné podpěrné desky se ukázaly jako vhodné pro snížení velikosti delaminace,
- plastové podpěrné desky se projeví jako nevyhovující.

Dřevěné podpěrné desky, díky svým vlastnostem, dokázaly snížit velikost delaminace u řezného nástroje V-HSS v průměru o cca 50 % na vstupu a zhruba 77 % na výstupu vyvrtané díry. Velikost delaminace dosáhla průměrné hodnoty  $565,41 \pm 0,80$   $\mu\text{m}$  na vstupu a  $678,12 \pm 0,73$   $\mu\text{m}$  na výstupu vyvrtané díry.

U řezného nástroje V-SK vedlo použití dřevěných podpěrných desek ke snížení velikosti delaminace v průměru o cca 67 % na vstupu a cca 79 % na výstupu vyvrtané díry. Velikost delaminace dosáhla průměrné hodnoty  $170,97 \pm 0,57$   $\mu\text{m}$  na vstupu a  $280,95 \pm 0,57$   $\mu\text{m}$  na výstupu vyvrtané díry.

Plastové podpěrné desky se ukázaly jako naprosto nevyhovující pro proces vrtání. Desky, z důvodu svých nepříznivých vlastností pro proces, vedly k pěchování řezaného materiálu mezi vzorkem a deskami, a to především u výstupu z vyvrtané díry.

Využití dřevěných podpěrných desek v procesu vrtání BKM vedlo k zásadnímu snížení velikosti delaminace pro oba řezné nástroje. Díky tomu oba řezné nástroje splnily danou limitní hodnotu průměrné velikosti delaminace ( $F_{Dkrit} = 1500 \mu\text{m}$ ).

**Tab. 28** – Shrnutí výsledků průměrné velikosti delaminace [ $\mu\text{m}$ ]  $\pm$  nejistota měření  $U$  při použití podpěrných desek

ŘP 4; n = 1500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,05 mm/ot	Bez podpěrných desek		Dřevěné podpěrné desky		Plastové podpěrné desky	
	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
Řezný nástroj						
V-HSS	1120,45 ±0,68	2963,58 ±0,76	565,41 ±0,80	678,12 ±0,73	1378,34 ±0,88	1551,34 ±0,73
V-SK	518,83 ±0,66	1353,82 ±0,79	170,97 ±0,57	280,95 ±0,57	366,54 ±0,76	1801,17 ±0,84

## 6. Vliv opotřebení řezného nástroje na velikost prachových částic

Zkoumání a vyhodnocování velikosti PČ bylo zrealizováno vždy u 1 a 50té vyvrtané díry. V rámci experimentálního měření bylo prokázáno následující:

- velikost PČ se zmenšovala se zvyšujícím se opotřebením řezného nástroje,
- PČ dosáhly velikosti zdraví nebezpečných.

Rozdíl velikosti prachových třísek v závislosti na opotřebením nástroje se na jednu stranu může jevit jako zanedbatelný, z pohledu ochrany zdraví člověka může být však i takto malý rozdíl rozhodující.

Největší rozdíl ve velikosti PČ v závislosti na opotřebení řezného nástroje byl změřen u nástroje V-HSS s ŘP 4 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot), a to o více jak 1  $\mu\text{m}$ . Velikost PČ po 1 díře je rovna  $10,32 \pm 0,65$   $\mu\text{m}$ , po 50ti dírách  $9,06 \pm 0,68$   $\mu\text{m}$ . U řezného nástroje V-SK s ŘP 1 ( $n = 500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot), a to o více jak 0,6  $\mu\text{m}$ . Velikost PČ po 1 díře je rovna  $8,04 \pm 0,55$   $\mu\text{m}$ , po 50ti dírách  $7,40 \pm 0,54$   $\mu\text{m}$ .

Největší PČ byla změřena u nástroje V-HSS s ŘP 1 ( $n = 500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot), a to  $10,54 \pm 0,59$   $\mu\text{m}$ . Nejmenší PČ poté u nástroje V-SK s ŘP 2 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,10$  mm/ot), a to  $3,74 \pm 0,56$   $\mu\text{m}$ .

## 7. Vliv procesních parametrů na velikost prachových částic

Zkoumání a vyhodnocování velikosti PČ bylo zrealizováno vždy u 1 a 50té vyvrtané díry. V rámci experimentálního měření bylo prokázáno následující:

- velikost PČ se snižovala s vyšším posuvem na otáčku a vyššími otáčkami vřetena,
- řezný nástroj V-SK produkoval menší PČ, oproti řeznému nástroji V-HSS,
- PČ dosáhly velikosti zdraví nebezpečných.

Zvolené řezné podmínky měly rozhodující vliv na velikost PČ. Menších PČ bylo dosaženo s vyššími otáčkami vřetena. K dalšímu zmenšování vedly vyšší hodnoty posuvu na otáčku.

Největší PČ byla změřena u řezného nástroje V-HSS s ŘP 1 ( $n = 500$  ot/min,  $f_n = 0,05$  mm/ot), a to  $10,54 \pm 0,59$   $\mu\text{m}$ , u řezného nástroje V-SK s ŘP 1, a to  $8,04 \pm 0,55$   $\mu\text{m}$ . Nejmenší PČ byla změřena u řezného nástroje V-HSS s ŘP 2 ( $n = 1500$  ot/min,  $f_n = 0,10$  mm/ot), a to  $8,59 \pm 0,54$   $\mu\text{m}$ , u řezného nástroje V-SK s ŘP 1 a to  $3,74 \pm 0,56$   $\mu\text{m}$ .

Velikost prachových částic překročila zdraví bezpečnou hranici pro oba řezné nástroje se všemi kombinacemi ŘP. Vliv velikosti PČ je velice důležitý v oblasti jejich možnosti průchodu do nižších cest dýchacích a s tím spojenými respiračními problémy. Při vrtání BKM je tedy nutné doporučit nošení ochranných pomůcek a zajištění odsávacích zařízení z důvodu přenosu takto malých částic na velké vzdálenosti.

**Tab. 29** – Shrnutí výsledků průměrné velikosti PC [ $\mu\text{m}$ ]  $\pm$  nejistota měření U

ŘP	ŘP 1; n = 500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,05 mm/ot		ŘP 2; n = 1500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,10 mm/ot		ŘP 3; n = 500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,10 mm/ot		ŘP 4; n = 1500 ot/min, f <sub>n</sub> = 0,05 mm/ot	
	1 díra	50 díra	1 díra	50 díra	1 díra	50 díra	1 díra	50 díra
Řezný nástroj								
V-HSS	10,54 ±0,59	9,77 ±0,58	8,79 ±0,55	8,59 ±0,54	9,55 ±0,61	8,89 ±0,59	10,32 ±0,65	9,06 ±0,68
V-SK	8,04 ±0,55	7,40 ±0,54	3,85 ±0,58	3,74 ±0,56	7,85 ±0,62	7,75 ±0,64	6,21 ±0,59	5,92 ±0,57

## 6 Závěr

Předkládaná diplomová práce zpracovaná na téma Problematika poškození povrchu při vrtání biokompozitů přispívá k rozšíření aktuálních poznatků v rámci problematiky vrtání kompozitních materiálů vyztuženými lněnými vlákny.

Hlavním cílem diplomové práce byl výzkum vlivů procesních parametrů na velikost opotřebení řezného nástroje, delaminace (na vstupu a výstupu vyvrtané díry) a na velikosti škodlivých prachových částic při vrtání do kompozitního materiálu vyztuženého lněnou tkaninou keprové vazby 2/2 s orientací vláken 90°. Sledované procesní parametry byly materiál, geometrie řezného nástroje a řezné podmínky.

Diplomová práce je členěna do 3 hlavních částí.

Teoretická část (kapitola 2) této práce představuje aktuální rozbor dané problematiky a shrnutí dosavadních poznatků.

Metodická část (kapitola 3) této práce se zabývá návrhem a přípravou experimentu. Předepisuje přípravu zkušebních vzorků, použité stroje a zařízení, řezné nástroje a měřicí přístroje. Dále definuje postup vyhodnocení získaných výsledků měření.

Experimentální část (kapitola 4) této práce se zabývá realizací navrhnutého experimentu a zpracováním získaných výsledků měření.

Nedílnou součástí diplomové práce bylo shrnutí dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků vyplívají následující poznatky:

1. opotřebení řezného nástroje má minimální vliv na velikost delaminace,
2. nízká tvrdost a abrazivita biokompozitních materiálů vede k nízkým hodnotám opotřebení řezného nástroje, což dovoluje využití řezných nástrojů z rychlořezné ocele,



3. řezné podmínky mají zásadní vliv na velikost delaminace; optimální řezné podmínky spočívají ve vyšších otáčkách vřetena a nízkém posuvu na otáčku,
4. geometrie řezného nástroje má podstatný vliv na velikost delaminace,
5. delaminace se více projevila na výstupu z vyvrtané díry,
5. správná volba podpěrných desek vede k výraznému snížení velikosti delaminace, špatná volba naopak k jejímu zvýšení,
6. s rostoucím opotřebením řezného nástroje se snižuje velikost prachových částic,
7. řezné podmínky mají vliv na velikost prachových částic; s rostoucími otáčkami vřetena a posuvem na otáčku dochází ke zmenšování velikosti prachových částic.

Dle předem stanovené limitní hodnoty průměrné velikosti delaminace ( $F_{Dkrit} = 1500 \mu\text{m}$ ) lze pro vrtání kompozitních materiálů vyztužených lněnými vlákny doporučit pouze řezný nástroj V-SK v kombinaci s řeznými podmínkami č. 4 ( $n = 1500 \text{ ot/min}$ ,  $f_n = 0,05 \text{ mm/ot}$ ). S využitím dřevěných podpěrných desek je možné využití obou řezných nástrojů V-HSS a V-SK v kombinaci s řeznými podmínkami č. 4.

## Seznam obrázků

<b>Obr. 1</b> – Rozdělení polymerních matic BKM [2].....	14
<b>Obr. 2</b> – Rozdělení výztuže BKM [2].....	15
<b>Obr. 3</b> – Využití BKM ve vozech značky Mercedes-Benz [6].....	17
<b>Obr. 4</b> – Technické názvosloví jednotlivých částí vrtáku [11].....	20
<b>Obr. 5</b> – Ukázka nasákavosti spodní strany BKM, vlevo před a vpravo po.....	22
<b>Obr. 6</b> – Ukázka nasákavosti spodní strany BKM, vlevo před a vpravo po.....	23
<b>Obr. 7</b> – Poškození BKM při vrtání – delaminace [15].....	24
<b>Obr. 8</b> – Princip vzniku delaminace při vrtání [16].....	24
<b>Obr. 9</b> – Ukázka vlivu opotřebení na kompozitní materiál [17].....	25
<b>Obr. 10</b> – Ukázka ulpívání BKM na vrtáku z HSS (vlevo) a SK (vpravo) .....	26
<b>Obr. 11</b> – Ukázka tkaniny ampliTex™ 200 s vazbou twill 2/2 [33] .....	29
<b>Obr. 12</b> – Zkušební vzorek .....	30
<b>Obr. 13</b> – Ukázka lomu biokompozitního vzorku .....	30
<b>Obr. 13</b> – Šroubovitý vrták z HSS [30] .....	31
<b>Obr. 14</b> – Šroubovitý vrták z SK [31].....	32
<b>Obr. 15</b> – 3D sken V-HSS .....	32
<b>Obr. 16</b> – Geometrie V-HSS.....	32
<b>Obr. 17</b> – 3D sken V-SK .....	33
<b>Obr. 16</b> – Geometrie V-SK.....	33
<b>Obr. 17</b> – Frézka FNG 32 .....	34
<b>Obr. 18</b> – Vrtací přípravek.....	35
<b>Obr. 19</b> – Podpěrná deska ze dřeva .....	35
<b>Obr. 20</b> – Podpěrná deska z plastu .....	36
<b>Obr. 21</b> – Mikroskop KAYENCE VK-X1000 .....	36
<b>Obr. 22</b> – VK Viewer a Analyzer .....	36
<b>Obr. 23</b> – Ukázka měření opotřebení nástroje .....	37
<b>Obr. 24</b> – Ukázka měření delaminace.....	37
<b>Obr. 25</b> – Ukázka měření třísky a PČ .....	38

## Seznam tabulek

<b>Tab. 1</b> – Ukázka využití BKM v automobilovém průmyslu [6].....	16
<b>Tab. 2</b> – Ukázka značení a obecných vlastností prachových částic [18].....	27
<b>Tab. 3</b> – Technické parametry výztuže ampliTex™ 200, twill 2/2 [21].....	28
<b>Tab. 4</b> – Technické parametry pryskyřice LG 700 [22] .....	29
<b>Tab. 5</b> – Mechanické vlastnosti vytvrzené LG 700 bez výztuže [22].....	29
<b>Tab. 6</b> – Technické informace o zvolených vrtácích .....	31
<b>Tab. 7</b> – Řezné podmínky .....	33
<b>Tab. 8</b> – Technické parametry frézky FNG 32 [23].....	34
<b>Tab. 9</b> – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-HSS [ $\mu\text{m}$ ].....	39
<b>Tab. 10</b> – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení vedlejšího ostří řezného nástroje V-HSS [ $\mu\text{m}$ ].....	40
<b>Tab. 11</b> – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-SK [ $\mu\text{m}$ ] .....	42
<b>Tab. 12</b> – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení vedlejšího ostří řezného nástroje V-SK [ $\mu\text{m}$ ] .....	42
<b>Tab. 13</b> – Ukázka opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-HSS pro ŘP 2 a ŘP 4 ....	46
<b>Tab. 14</b> – Ukázka opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-SK pro ŘP 2 a ŘP 4 .....	47
<b>Tab. 15</b> - Naměřené průměrné hodnoty velikosti delaminace v závislosti na opotřebení nástroje V-HSS.....	49
<b>Tab. 16</b> – Naměřené průměrné hodnoty velikosti delaminace v závislosti na opotřebení nástroje V-SK.....	50
<b>Tab. 17</b> – Vliv řezných podmínek na delaminaci – průměrné hodnoty.....	50
<b>Tab. 18</b> – Ukázka velikosti delaminace pro řezný nástroj V-HSS s ŘP 4.....	60
<b>Tab. 19</b> – Ukázka vyvrtaných děr / delaminace pro řezný nástroj V-HSS.....	61
<b>Tab. 20</b> – Ukázka vyvrtaných děr / delaminace pro řezný nástroj V-SK.....	62
<b>Tab. 21</b> – Vliv podpěrných desek na velikost delaminace [ $\mu\text{m}$ ] .....	63
<b>Tab. 22</b> – Ukázka vyvrtaných děr s podpěrnými deskami pro řezný nástroj V-HSS a ŘP 4 .....	66
<b>Tab. 23</b> – Ukázka vyvrtaných děr s podpěrnými deskami pro řezný nástroj V-SK a ŘP 4	67
<b>Tab. 24</b> – Vliv počtu vyvrtaných děr / opotřebení nástroje [ $\mu\text{m}$ ] na velikost PČ.....	68

<b>Tab. 25</b> – Ukázka nejmenších naměřených PČ [ $\mu\text{m}$ ] pro řezné nástroje V-HSS a V-SK; zvětšení 50x .....	70
<b>Tab. 26</b> – Shrnutí výsledků opotřebení řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ] po vyvrtání 50 děr $\pm$ nejistota měření U .....	73
<b>Tab. 27</b> – Shrnutí výsledků průměrné velikosti delaminace [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota měření U ....	76
<b>Tab. 28</b> – Shrnutí výsledků průměrné velikosti delaminace [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota měření U při použití podpěrných desek .....	77
<b>Tab. 29</b> – Shrnutí výsledků průměrné velikosti PČ [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota měření U .....	79

## Seznam grafů

<b>Graf 1</b> – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-HSS [ $\mu\text{m}$ ] .....	40
<b>Graf 2</b> – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení vedlejšího ostří řezného nástroje V-HSS [ $\mu\text{m}$ ] .....	41
<b>Graf 3</b> – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení hlavního ostří řezného nástroje V-SK [ $\mu\text{m}$ ] .....	43
<b>Graf 4</b> – Závislost počtu vyvrtaných děr na velikost opotřebení vedlejšího ostří řezného nástroje V-SK [ $\mu\text{m}$ ] .....	44
<b>Graf 5</b> – Vliv opotřebení hlavního ostří řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ] na velikost delaminace [ $\mu\text{m}$ ] na vstupu díry .....	51
<b>Graf 6</b> – Vliv opotřebení hlavního ostří řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ] na velikost delaminace [ $\mu\text{m}$ ] na výstupu díry .....	52
<b>Graf 7</b> – Vliv opotřebení vedlejšího ostří řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ] na velikost delaminace [ $\mu\text{m}$ ] na vstupu díry .....	53
<b>Graf 8</b> – Vliv opotřebení vedlejšího ostří řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ] na velikost delaminace [ $\mu\text{m}$ ] na výstupu díry .....	54
<b>Graf 9</b> – Vliv posuvu na otáčku [mm/ot] na velikost delaminace na vstupu vyvrtané díry [ $\mu\text{m}$ ] .....	55
<b>Graf 10</b> – Vliv posuvu na otáčku [mm/ot] na velikost delaminace na výstupu vyvrtané díry [ $\mu\text{m}$ ] .....	56
<b>Graf 11</b> – Vliv otáček vřetena [ot/min] na velikost delaminace na vstupu vyvrtané díry [ $\mu\text{m}$ ] .....	57
<b>Graf 12</b> – Vliv otáček vřetena [ot/min] na velikost delaminace na výstupu vyvrtané díry [ $\mu\text{m}$ ] .....	58
<b>Graf 13</b> – Vliv podpěrných desek na velikost delaminace na vstupu díry [ $\mu\text{m}$ ] při ŘP 4..	64
<b>Graf 14</b> – Vliv podpěrných desek na velikost delaminace na výstupu díry [ $\mu\text{m}$ ] při ŘP 4	64
<b>Graf 15</b> – Závislost řezných podmínek na velikost prachových částic [ $\mu\text{m}$ ] a velikost opotřebení řezných nástrojů V-HSS a V-SK [ $\mu\text{m}$ ] .....	69

## Seznam použité literatury

- [1] – PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II.* 2., opr.rozš. vyd. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 978-80-7204-248-7.
- [2] – ANDREW, J. Jefferson a H. N. DHAKAL. *Sustainable biobased composites for advanced applications: recent trends and future opportunities – A critical review.* Composites Part C: Open Access. 2022, roč. 7, ISSN 2666-6820. DOI: [10.1016/j.jcomc.2021.100220](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100220)
- [3] – DAVIM, J. Paulo, ed. *Machining: fundamentals and recent advances.* London: Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-212-8.
- [4] – DÍAZ-ÁLVAREZ, A. et al. *Drilling of biocomposite materials: Modelling and experimental validation.* Simulation Modelling Practice and Theory. 2021, roč. 106. ISSN 1569-190X. DOI: [10.1016/j.simpat.2020.102203](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102203).
- [5] – OBID, Daniel. *Obrábění bio-kompozitních materiálů* [online]. Brno, 2022 [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/205444>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v brně. Vedoucí práce Jan Zouhar.
- [6] – LI, Mi et al. *Recent advancements of plant-based natural fiber-reinforced composites and their applications.* Composites Part B: Engineering. 2020, roč. 200. ISSN 1359-8368. DOI: [10.1016/j.compositesb.2020.108254](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108254)
- [7] – ASTAKHOV, Viktor P. *Geometry of single-point turning tools and drills: fundamentals and practical applications.* 1st ed. vyd. London; New York: Springer, 2010. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 978-1-84996-052-6.
- [8] – KNAP, Artur. *Problematika vrtání do kompozitních materiálů* [online]. Liberec, 2021 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/163470>. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Štěpánka Dvořáčková.

- [9] – LOTFI, Amir et al. *Natural fiber–reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability*. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2019, roč. 34. DOI: [10.1177/0892705719844546](https://doi.org/10.1177/0892705719844546)
- [10] – BENYETTOU, Riyadh et al. *Assessment of induced delamination drilling of natural fiber reinforced composites: a statistical analysis*. Journal of Materials Research and Technology. 2022, roč. 21, s. 131–152. ISSN 2238-7854. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.08.161](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.161)
- [11] – Technický nákres vrtáku s popisem jeho jednotlivých částí. In: *Alza.cz* [online]. [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/vrtaky-jak-se-v-nich-vyznat>
- [12] – SHYHA, Islam a Dehong HUO, eds. *Advances in machining of composite materials: conventional and non-conventional processes*. Cham: Springer, 2021. Engineering materials. ISBN 978-3-030-71438-3.
- [13] – TABET, Zohir et al. *Drilling of a bidirectional jute fibre and cork-reinforced polymer biosandwich structure: ANN and RSM approaches for modelling and optimization*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, roč. 117, č. 11, s. 3819–3839. ISSN 1433-3015. DOI: [10.1007/s00170-021-07679-y](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07679-y)
- [14] – GAO, Teng et al. *Carbon fiber reinforced polymer in drilling: From damage mechanisms to suppression*. Composite Structures. 2022, roč. 286. ISSN 0263-8223. DOI: [10.1016/j.compstruct.2022.115232](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115232)
- [15] – ADDA, Bachir et al. *Experimental investigation and optimization of delamination factors in the drilling of jute fiber–reinforced polymer biocomposites with multiple estimators*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, roč. 116, č. 9, s. 2885–2907. ISSN 1433-3015. DOI: [10.1007/s00170-021-07628-9](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07628-9)

- [16] – SAEEDIFAR, Milad, Mohammad FOTOUHI a Mehdi AHMADI NAJAFABADI. *Investigation of push-out delamination using cohesive zone modelling and acoustic emission technique*. Journal of Composite Materials. 2015, roč. 50. DOI: [10.1177/0021998315622983](https://doi.org/10.1177/0021998315622983)
- [17] – JAK SEDLÁČEK. *Problémy při obrábění kompozitních materiálů*. In: [www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com) [online] [cit. 26.03.2024]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [18] – *Energie z biomasy XIV* [online]. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2013 [cit. 2024-03-27]. ISBN 978-80-214-4775-2. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2013/Enbio%202013.pdf#page=84>
- [19] – *PM – prachové částice*. HW server s.r.o. [online] [cit. 27.03.2024]. Dostupné z: <https://obchod.hw.cz/eshop/produkty/category/pm-prachove-castice-v-ovzdusi>
- [20] – MOUDRÝ, Vojtěch. *Vliv řezných podmínek na delaminaci a opotřebení řezného nástroje při frézování kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny* [online]. Liberec, 2024 [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/items/ce15a1bb-68f9-4c03-b90a-745ce8ddf2a9>.  
Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Štěpánka Dvořáčková.
- [21] – Priskyřice a tužidla. *GRM Systems* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <http://www.grm-systems.cz/priskyrice-tuzidla>
- [22] – BCOMP. *Product datasheet: Art. No. 5043*. 2021.



- [23] – Nástrojařská frézka FNG 32. In: *TOS Olomouc* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.tos-olomouc.cz/files/oc/produktove-informace/fng32.pdf>
- [24] – JAYABAL, S. a U. NATARAJAN. *Drilling analysis of coir-fibre-reinforced polyester composites*. *Bulletin of Materials Science*. 2011, roč. 34, č. 7, s. 1563–1567. ISSN 0973-7669. DOI: [10.1007/s12034-011-0359-y](https://doi.org/10.1007/s12034-011-0359-y)
- [25] – ZHOU, Yonghui, Mizi FAN a Lihui CHEN. *Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview*. *Composites Part B: Engineering*. 2016, roč. 101, s. 31–45. ISSN 1359-8368. DOI: [10.1016/j.compositesb.2016.06.055](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.055)
- [26] – SARIKANAT, Mehmet et al. *The effect of argon and air plasma treatment of flax fiber on mechanical properties of reinforced polyester composite*. *Journal of Industrial Textiles*. SAGE Publications Ltd STM, 2016, roč. 45, č. 6, s. 1252–1267. ISSN 1528-0837. DOI: [10.1177/1528083714557057](https://doi.org/10.1177/1528083714557057)
- [27] – DHAKAL, H. N., Z. Y. ZHANG a M. O. W. RICHARDSON. *Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites*. *Composites Science and Technology*. 2007, roč. 67, č. 7, s. 1674–1683. ISSN 0266-3538. DOI: [10.1016/j.compscitech.2006.06.019](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.019)
- [28] – PRASANNA VENKATESH, R., K. RAMANATHAN a V. SRINIVASA RAMAN. *Tensile, Flexural, Impact and Water Absorption Properties of Natural Fibre Reinforced Polyester Hybrid Composites*. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2016, roč. 24, č. 3(117), s. 90–94. ISSN 1230-3666. DOI: [10.5604/12303666.1196617](https://doi.org/10.5604/12303666.1196617)

- [29] – REZGHI MALEKI, H. et al. *Experimental investigation on drilling of natural flax fiber-reinforced composites*. Materials and Manufacturing Processes. Taylor & Francis, 2019, roč. 34, č. 3, s. 283–292. ISSN 1042-6914. DOI: [10.1080/10426914.2018.1532584](https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1532584)
- [30] – 100010 6,00 Twist drill HSS PRETEC. In: *Precishop* [online]. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: [https://www.precishop.ae/products/twist-drill-hss-pretec-din-338-type-n-roll-forged-59?\\_pos=2&\\_sid=a19593fd6&\\_ss=r](https://www.precishop.ae/products/twist-drill-hss-pretec-din-338-type-n-roll-forged-59?_pos=2&_sid=a19593fd6&_ss=r)
- [31] – 102615 6,00 Twist drill VHM PREMUS. In: *Precishop* [online]. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: [https://www.precishop.ae/products/twist-drill-vhm-premus-61?\\_pos=1&\\_sid=6c1d04ee1&\\_ss=r](https://www.precishop.ae/products/twist-drill-vhm-premus-61?_pos=1&_sid=6c1d04ee1&_ss=r)
- [32] – BELAADI, Ahmed, Hamdi LAOUICI a Mostefa BOURCHAK. *Mechanical and drilling performance of short jute fibre-reinforced polymer biocomposites: statistical approach*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020, roč. 106, č. 5–6, s. 1989–2006. ISSN 0268-3768, 1433-3015. DOI: [10.1007/s00170-019-04761-4](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04761-4)
- [33] – AmpliTex™ 200, twill 2/2: dry. In: *Bcomp* [online]. [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://www.bcomp.com/products/amplitex/>
- [34] – BELAADI, Ahmed et al. *Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020, roč. 111, č. 7, s. 2073–2094. ISSN 1433-3015. DOI: [10.1007/s00170-020-06217-6](https://doi.org/10.1007/s00170-020-06217-6)
- [35] – LOTFI, Amirhossein, Huaizhong LI a Dzung Viet DAO. *Analytical and experimental investigation of the parameters in drilling flax/poly(lactic acid) bio-composite laminates*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020, roč. 109, č. 1, s. 503–521. ISSN 1433-3015. DOI: [10.1007/s00170-020-05668-1](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05668-1)