



Bakalářská práce

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

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Jana Klírová

Vedoucí práce:

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

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

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

Jméno a příjmení:

Jana Klírová

Osobní číslo:

S20000290

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Zadávající katedra:

Katedra obrábění a montáže

Akademický rok:

2021/2022

Zásady pro vypracování:

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

Rozsah grafických prací: Obrázky, tabulky a grafy – dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 30 – 40 stran textu
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

1. KOČMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
2. BILÍK, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
3. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.
4. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. *Jakost obráběných povrchů*. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.
5. LIDAŘÍK, M. a kol. *Epoxidové pryskyřice*. Praha: SNTL–Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983. 732 s.

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

Datum zadání práce: 12. října 2021
Předpokládaný termín odevzdání: 12. dubna 2023

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

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

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

Anotace

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

Teoretická část obsahuje základní pojmy týkající se řešené problematiky. Do této části práce jsou zahrnuty informace o vrtání do kompozitních materiálů, nástrojích a poruchách při vrtání.

Experimentální část obsahuje informace o použitých zařízeních a metodice pro experiment. V diskuzi a v závěru jsou popsány naměřené hodnoty a zhodnocení experimentu.

Klíčová slova: vrtání, kompozitní materiály, epoxidová pryskyřice, skelná vlákna.

Annotation

The scope of the bachelor thesis is research on the problem of drilling into composite systems based on epoxy resin and glass fibre, with regard to chip formation.

The theoretical part contains the basic concepts related to the problem. Information on drilling into composite materials, tools and drilling failures are included in this part of the thesis.

The experimental part contains information about the used, equipment and methodology for the experiment. In the discussion and conclusion, the measured values and evaluation of the experiment are described.

Keywords: drilling, composite materials, epoxy resin, fiberglass.

Poděkování

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

Obsah

1. ÚVOD	9
2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ PROBLEMATIKY VRTÁNÍ DO KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	11
2.1. Vrtání do kompozitních materiálů	11
2.2. Volba řezného nástroje.....	12
2.3. Geometrie řezného nástroje	13
2.4. Volba materiálu řezného nástroje	15
2.5. Řezné podmínky.....	17
2.6. Poruchy	17
2.7. Tvorba třísky	20
3. METODIKA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	22
3.1. Zkušební vzorky	22
3.2. Obrobení vzorků.....	23
3.3. Frézka FNG 32.....	24
3.4. Použité nástroje.....	25
3.5. Mikroskopie	26
3.6. Dynamometr.....	27
3.7. Řezné podmínky.....	28
3.8. Opotřebení řezného nástroje.....	29
3.9. Delaminace.....	29
3.10. Řezná síla.....	29
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
4.1. Opotřebení nástroje.....	30
4.2. Delaminace.....	36
4.3. Tvorba třísky.....	40
4.4. Vyhodnocení výsledků řezných sil.....	42
5. DISKUZE	47
6. ZÁVĚR.....	50
Seznam obrázků	52
Seznam grafů	53
Seznam tabulek.....	54
Seznam použité literatury	55

Seznam použitých symbolů a zkratk

ZKRATKA/ SYMBOL	JEDNOTKA	NÁZEV
CFRP	[-]	Carbon fiber reinforced polym
CMC	[-]	Kompozity s keramickou maticí
EP	[-]	Epoxidová pryskyřice
f	[mm*ot ⁻¹]	Posuv
F	[N]	Síla
d	[mm]	Průměr
GFRP	[-]	Glass fiber reinforced polymer
HSS	[-]	Rychlořezná ocel
HSS +	[-]	HSS - TiAlN
HSS- TiAlN	[-]	Rychlořezná ocel + TiAlN povlak
MMC	[-]	Kompozity s kovovou maticí
n	[ot*min ⁻¹]	Otáčky
PKD	[-]	Polykrystalický diamant
PMC	[-]	Kompozity s polymerní maticí
SK	[-]	Slinutý karbid
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička

1. ÚVOD

Skelná vlákna představují často používaná výtuzná vlákna v kompozitních materiálech. Kompozity vyztužené skelnými vlákny (označované též jako GFRP), vynikají vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti, vysoké lomové houževnatosti, vysokému specifickému modulu pružnosti a tepelné odolnosti, vysoké únavové pevnosti, nízké hmotnosti a teplotně rozměrové stabilitě.

Obrábění těchto kompozitů vyžaduje správnou volbu nástrojů a řezných podmínek tak, aby nedocházelo k delaminaci mezi nanesenými vrstvami, tepelnému poškození materiálů v polymerní matici a opotřebení řezného nástroje.

Bakalářská práce se věnuje vrtání do desek se skelnými vlákny uspořádanými do tkaniny s keprovou vazbou. V rámci bakalářské práce byla pozornost věnována vlivu řezné síly na obrobiteľnost skelných vláken a opotřebení hlavního a vedlejšího ostří nástroje, včetně jejich vlivu na obrobenou povrchovou strukturu (vytahování, uvolňování vláken a delaminaci) s ohledem na tvorbu třísky.

Pro bakalářskou práci byly vybrány 3 typy vrtáků o průměru 5 mm. Vrtáky byly o stejném průměru, avšak s jiným použitým nástrojovým materiálem, nebo jiným povlakováním. Materiály řezného nástroje byly ze slinutého karbidu, rychlořezné oceli a rychlořezné oceli s povlakem z TiAlN.

Vrtání GFRP bylo realizováno pomocí CNC frézky FNG 32 za předem stanovených podmínek.

Bakalářská práce shrnuje informace o delaminaci vláken a poškození obráběných GFRP desek po vrtání, o opotřebení nástroje a řezných silách s ohledem na tvorbu třísky.

Tato bakalářská práce poskytuje výzkumníkům příležitost prohloubit své znalosti o specifických aspektech vrtání do GFRP kompozitů s nástrojem přímo určeným pro obrábění kompozitů.

Hlavním cílem předkládané práce je zjištění sil při obrábění, opotřebení řezného nástroje, delaminace obráběného materiálu s ohledem na tvorbu třísky při vrtání do kompozitního materiálu na bázi epoxidové pryskyřice a skelných vláken.

Bakalářská práce je rozdělena na tři kapitoly: teoretickou, experimentální a závěrečnou.

Pro dosažení plánovaného cíle práce jsou nezbytné teoretické znalosti, které jsou uvedeny v teoretické části práce.

Teoretická část předkládané práce souvisí se současným stavem řešené problematiky, obsahuje základní informace vztahující se k vrtání do kompozitních materiálů, geometrii řezného nástroje, nástrojovým materiálům a k problematice vrtání do kompozitních materiálů.

Experimentální část popisuje přípravu experimentu a jejich výsledky. Zabývá se přípravou vzorků, volbou řezných podmínek a procesem vrtání.

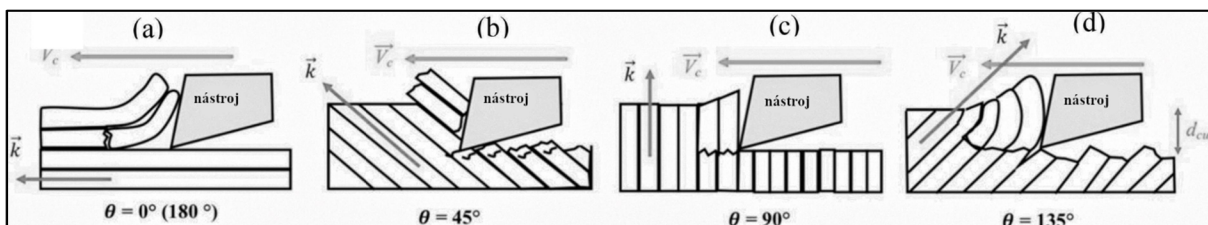
Na závěr jsou vyhodnoceny veškeré dosažené výsledky a poznatky během vypracování této bakalářské práce.

2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ PROBLEMATIKY VRTÁNÍ DO KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Tato kapitola obsahuje informace týkající se problematiky vrtání kompozitních materiálů, volby řezných nástrojů, geometrii řezných nástrojů, volby materiálu řezných nástrojů, řezných podmínek, poruch a tvorby třísky.

2.1. Vrtání do kompozitních materiálů

Vrtání kompozitních materiálů je běžný výrobní proces, který se hojně využívá v různých aplikacích, jako jsou letadla a automobilové sestavy. Vrtání kompozitních materiálů je obvykle velmi náročné vzhledem k jejich vysoké pevnosti, nehomogenním a anizotropním vlastnostem. V důsledku nedostatečné podpory pod obrobkem při vrtání materiálu dochází na výstupní straně obrobku k několika nežádoucím poruchám, jako je vychýlení obrobku, delaminace a tvorba otřepů. Proto je nutné vyvinout efektivní techniky k potlačení poškození při vrtání. Zvýšení technické podpory je důležité k prevenci poškození při obrábění s různými parametry obrábění, geometrií nástrojů a dalšími strategiemi obrábění. Většina výše uvedených poruch vzniká v důsledku vzniku tlakové síly při vrtání, vrtání při vyšší rychlosti posuvu a zvýšeném opotřebení nástroje. Rozsah poruch také závisí na pevnosti, tuhosti, tvrdosti, modulu pružnosti a tepelné vodivosti obrobku. [1]



Obr. 1 Různé geometrie vrtáků při vrtání do kompozitních materiálů [4]

2.2. Volba řezného nástroje

Nejčastěji obráběné kompozitní materiály obsahují vlákna uhlíková, skelná nebo aramidová, která jsou vázána organickým polymerem, epoxidovou nebo fenolovou pryskyřicí. Vzájemnou kombinací matrice a vyztužujících vláken lze dosáhnout rozdílných mechanických vlastností, které je nutno zohlednit při volbě řezného nástroje. Zatímco kompozitní materiály zpevněné uhlíkovými vlákny jsou velmi abrazivní, a tudíž je vyžadován co nejvíce odolný nástrojový materiál, tytéž materiály vyztužené aramidovou tkaninou kladou velké nároky především na správnou geometrii břitu, protože jsou měkké a lehce se poddají tlaku nástroje. Pro tyto materiály byly vyvinuty speciální nástroje, které vlákno nejprve předeprnou a potom čistě oddělí a odstraní z pracovního prostoru. [2]

Řezný nástroj musí v řezu generovat velmi malé množství tepla a toto teplo navíc účinně odvádět. Z tohoto důvodu je třeba volit pozitivní geometrii břitu s nízkým sklonem k adhezi, a to spolu s vhodnými řeznými podmínkami. Samotný řezný materiál nebo povlak by měl mít dostatečnou tvrdost zajišťující odolnost vůči opotřebení, odpovídající pevnost pro podporu ostré geometrie a větší tepelnou vodivost při vysoké otěruvzdornosti. Pozitivní geometrie minimalizuje namáhání materiálu, které může způsobit delaminaci, využívá se ostrá geometrie pro řezání vláken s lokalizovaným, indukovaným napětím. Odstranění třísek není u kompozitních materiálů nezbytné, ale musí být odstraňován prach vznikající při jejich opracování. [2]

Nástroj pak také musí zabezpečit uspokojivé utváření třísek a jejich odvádění. Správné použití vhodného specializovaného obráběcího nástroje je klíčem k dosažení uspokojivé kvality děr a potlačení tvorby prachových částic při obrábění součástí z kompozitních materiálů. Kvalitativní parametry díry používané při vrtání kovových materiálů nelze přímo aplikovat na vrtání kompozitů. Nedochozí totiž ke vzniku třísek a konvenční posuzování kvality opracování obvykle není vhodným ukazatelem. [2]

2.3. Geometrie řezného nástroje

Geometrie řezného nástroje, kterým je obráběn kompozitní materiál, má značný vliv na velikost síly řezání a její rozložení do jednotlivých složek, na utváření a odvod třísky, drsnost, přesnost a kvalitu výsledné obrobené plochy, trvanlivost břitu a hospodárnost obráběcího procesu. [3]

a. Spirálový vrták

Geometrie řezného nástroje má značný vliv na velikost síly řezání a její rozložení do jednotlivých složek, na utváření a odvod třísky, drsnost, přesnost a kvalitu výsledné obrobené plochy, trvanlivost břitu a hospodárnost obráběcího procesu. (Obr. 2). [4]

b. Svícnové vrtáky

Rovné drážkové vrtáky mají šroubovitě drážky a dvě rovné drážky. Tyto vrtáky se většinou upřednostňují při vytváření otvorů do laminátů, dřeva a plastů. (Obr. 2). [4]

c. Drážkové vrtáky

Drážkové vrtáky jsou navíc obvykle vrtáky se dvěma drážkami, které mají ploché konce se dvěma radiálními břity. (Obr. 2). [4]

d. Dýkové vrtáky

Jsou jiným typem dvojhrotého vrtáku, který je charakterizován čtyřmi dlouhými řeznými hranami. (Obr. 2). [11]

e. Krokový vrták

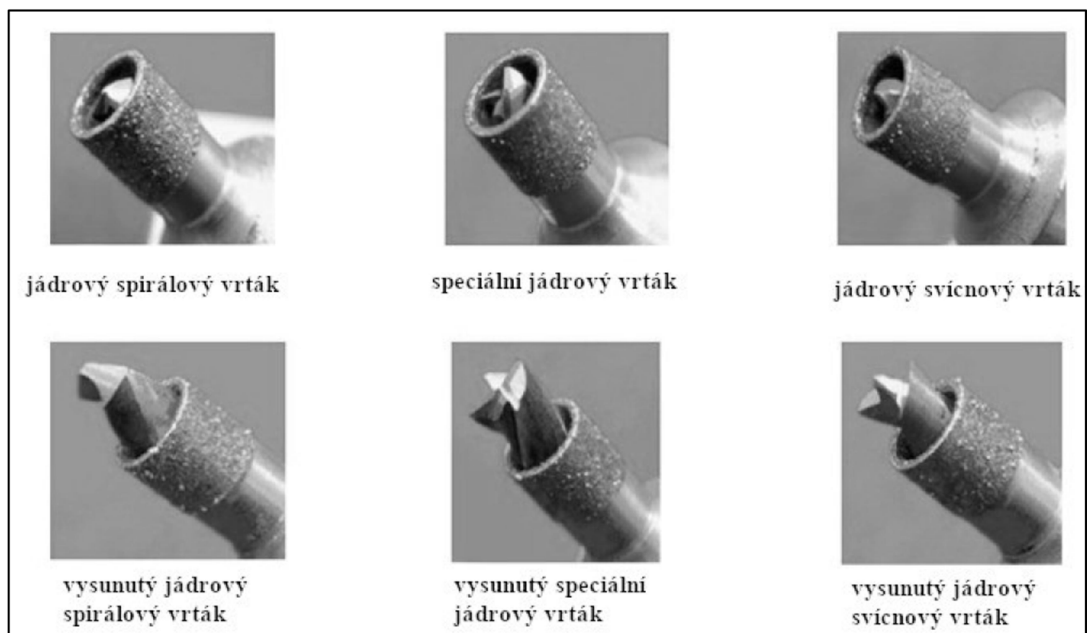
Krokové vrtáky slouží pro předvrtání a vyvrtání finálního otvoru. Tyto vrtáky jsou charakterizovány vysokou produktivitou a nízkou delaminací v kompozitu. (Obr. 2). [11]



Obr. 2 Různé geometrie vrtáků při vrtání do kompozitních materiálů [4]

f. Jádrové vrtáky

Jádrové vrtáky jsou dalším typem geometrických vrtáků speciálně určených k odebrání válce materiálu z obrobku. Uvnitř vrtáku se nachází jádro a při rotaci nástroje vůči obrobku se materiál odebírá na obvodu nástroje ve tvaru válce. (Obr. 3). [4]



Obr. 3 Jádrové vrtáky [4]

2.4. Volba materiálu řezného nástroje

Proces vrtání je jedním z nejnáročnějších zpracování kompozitních materiálů. Pro co nejefektivnější vrtání nebo obrábění tohoto materiálu je důležité pochopit, čím se tyto kompozity liší například od kovů. Ačkoli mají kompozity vlastnosti podobné kovům, pokud jde o vlastnosti materiálu jsou velmi odlišné ve smyslu způsobu jejich zpracování prostřednictvím vrtání a obrábění. Jelikož jsou kovy dobrými vodiči tepla, je vrtání mnohem snazší. Kompozity naproti tomu izolují teplo a jsou abrazivní vůči řezným nástrojům, což vede ke zvýšenému opotřebení řezných nástrojů, vrtáků a dokonce i samotných dílů. [10]

Nezbytné vlastnosti řezných materiálů:

- vyšší tvrdost a odolnost proti opotřebení,
- dostatečná pevnost a houževnatost,
- dobrá vyrobiteľnosť,
- dobrá tepelná vodivost a malý koeficient roztažnosti. [5]

a. Rychlořezná ocel (HSS)

Rychlořezná ocel je druh nástrojové oceli s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení, která obsahuje mnoho prvků, jako je W, Mo, Cr, V atd. Rychlořezná ocel má dobré komplexní vlastnosti a je nejpoužívanějším materiálem pro řezné nástroje, proto se používá hlavně k výrobě složitých tenkých nožů a kovových řezných nástrojů odolných proti nárazům. Také je možno ji využít k obrábění kompozitních materiálů. Lze ji také použít k výrobě vysokoteplotních ložisek a lisovacích forem za studena. Po tepelném zpracování má rychlořezná ocel tvrdost 62 ~ 62~66HRC, pevnost v ohybu přibližně 3,3 Pa a tepelnou odolnost přibližně 600 °C. Kromě toho má výhody malé deformace při tepelném zpracování, kování a snadném broušení ostrých břitů. [5]

b. Slinuté karbidy (SK)

Slinutý karbid je tvrdá sloučenina žáruvzdorného kovu a slitinového materiálu vyrobená spojováním kovů v práškové metalurgii. Slinutý karbid má dobrou tepelnou odolnost, vysokou řeznou účinnost, dobrou pevnost, houževnatost, odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi a další vlastnosti. Běžná tvrdá slitina obsahuje velké množství WC a TiC, takže její tvrdost a tepelná odolnost jsou vyšší než u nástrojové oceli. Slinutý karbid je dnes jedním z nástrojových materiálů, který lze využít k obrábění kompozitních materiálů. Slinutý karbid se široce používá jako nástrojový materiál, například jako soustružnické nástroje, frézy, vrtáky, vyvrtávací frézy atd. [5]

Tab. 1 Doporučené úhly nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů [6]

Obráběný materiál	Materiál vrtáku	Geometrie vrtáku		
		α	β	γ
Plasty vyztužené skleněnými vlákny GFRP	HSS	50°	15°	20°
	SK	50°	10°	20°
Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny CFRP	HSS	45° - 50°	10°-15°	15°-20°
	SK	45° - 50°	10°	15°-20°

c. Polykrystalický diamant (PKD)

Nástroje s diamantovým hrotem (PKD) jsou často nejúčinnější při řezání kompozitů, protože je důležité, aby nástroj řezal s minimální silou působící na materiál. Při vrtání kompozitů může být problémem třískové obrábění, takže použití nástrojů PKD je obzvláště důležité, protože tupý vrták povede k odsunutí vrstev stranou oproti řezání. To vede k delaminaci na výstupní straně materiálu. [7]

2.5. Řezné podmínky

Obrábění kompozitu se liší od klasického třískového obrábění. U kompozitů je nabízena několikanásobná škála materiálů a fáze jsou nehomogenní. Jelikož škála materiálů je nespočetná, nastává při obrábění problém a je potřeba přehodnotit řezné podmínky, volbu řezného materiálu, nástroje, jeho upnutí či volbu stroje. V těchto podmínkách jsou zohledňovány směry natočení vláken, materiály matrice a vlákna a jejich objemový podíl. Je důležité zohlednit, ve které vrstvě kompozitu je obráběno, což je velice složité především u vrtání a návrhu geometrie vrtáku, protože díra je vrtána ve většině případů ve všech vrstvách. [8]

Řezné podmínky se liší od klasického obrábění především tím, že nevzniká tříska stříhem, jako je tomu u převážné většiny kovů. Vlákna jsou odlamována nebo odřezávána v epoxidové pryskyřici (matrici). Dále by měla být zohledněna velmi nízká tepelná vodivost obráběného materiálu. Jeho tepelná roztažnost je velmi vysoká a mohlo by docházet k rozměrovým nepřesnostem. [8]

Nejdůležitější při obrábění kompozitů je velmi ostrý břit nebo břitové destičky, kterých je hojně využíváno. Vyznačují se adekvátní vůlí pro čistý řez a optimalizují tření nástroje o obrobek. Minimální změny geometrie břitu vedou ke zvýšení teploty v oblasti řezu a následnému vylomení. [8]

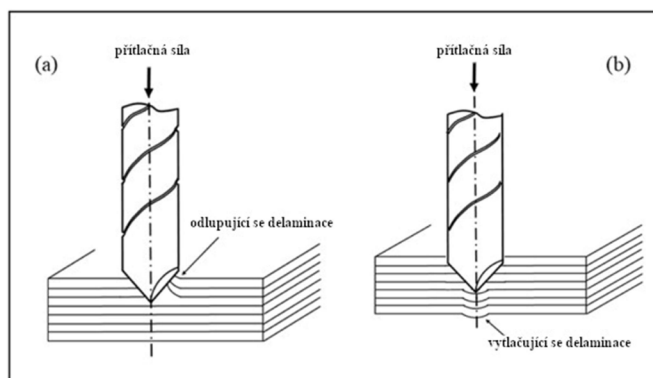
Posuv na otáčku se pohybuje v rozsahu 0,05 až 1,1 mm/ot. Velikost posuvu závisí na druhu nástroje a obráběném materiálu. [13]

2.6. Poruchy

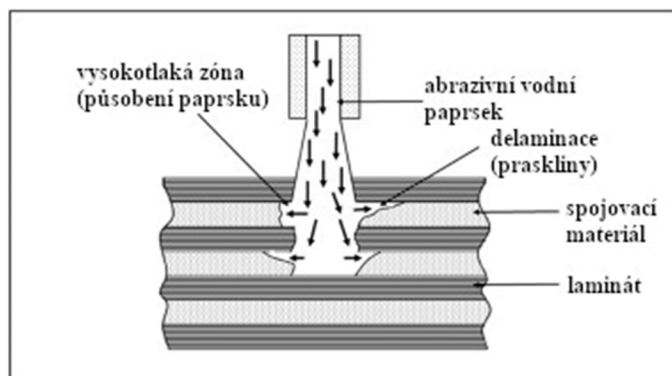
Jedinečné vlastnosti vlákny vyztuženého kompozitního materiálu vedou k problematickým otázkám při obrábění ve srovnání s běžnými materiály. Vady při obrábění přímo souvisejí s pevností a vlastnostmi kompozitního materiálu. Zejména při vrtání otvorů do kompozitních laminátů bez vad je možné snížit hmotnost a zvýšit únavovou životnost materiálu. Dosažení dobré kvality otvorů je velmi obtížné z důvodu vysoké abrazivity vyztužných složek v kompozitu, která způsobuje rychlé opotřebení vrtacího nástroje. Vady při obrábění otvorů, které snižují pevnost, průhyb obrobku, delaminaci a vylamování vláken jsou nežádoucími účinky vrtání s použitím nevhodných parametrů vrtání, geometrie nástroje a opotřebovaného vrtáku. [1]

a. Delaminace

Vrtání kompozitních materiálů vyztuženými vlákny je průmyslově náročné vzhledem k delaminačním poruchám, které jsou nejčastějším problémem laminátů. Delaminace na výstupu z otvoru je při vrtání vyšší než na vstupu do otvoru. Tuto problematiku je třeba podrobně pochopit, z důvodu hledání nových strategií pro dosažení vrtání bez delaminace v kompozitních materiálech. Při kontaktu vrtacího nástroje s laminátů dochází ke vzniku odlupovací síly, která má tendenci odlupovat horní vrstvy laminátů. To vede k delaminaci vyvolané lomem ve směru trhlin ve smyku. Delaminace souvisí s kvalitou laminátů a nepříznivými parametry vrtání, které jsou způsobeny nadměrnou přitlačnou silou. Když se vrták blíží k výstupní straně otvoru, dochází k deformaci a ohybu oblasti v blízkosti neprořezaných vrstev, které jsou pod vrtákem. Pokud je napětí mezi vrstvami větší než pevnost mezivrstvé vazby, dochází k většímu vytlačování delaminace. Pro delaminaci obecně platí, že k ní dochází častěji při výstupním otvoru (push-out), nežli při vstupním, a lze ji omezit, pokud se minimalizuje přitlačná síla při vrtání. Při nekonvenčním obrábění vodním paprskem dochází k delaminaci v důsledku jeho dopadu vysokou rychlostí na dno řezu. [1]



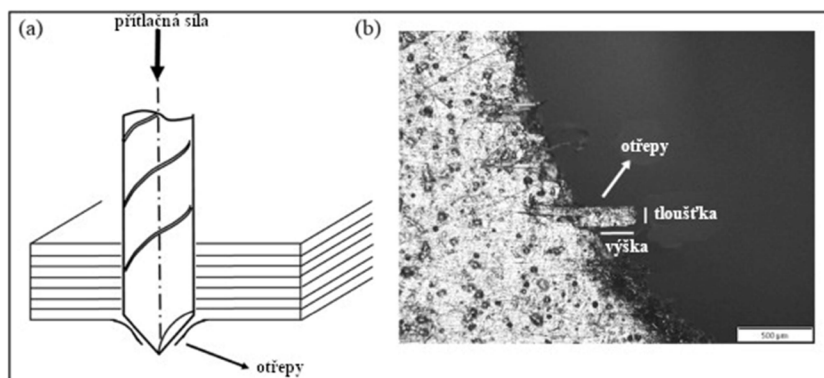
Obr. 4 Delaminace při vrtání kompozitů (a) odlupující se delaminace; (b) vytlačující se delaminace.[1]



Obr. 5 Mechanismus růstu delaminace při obrábění abrazivním vodním paprskem [1]

b. Tvorba otřepů

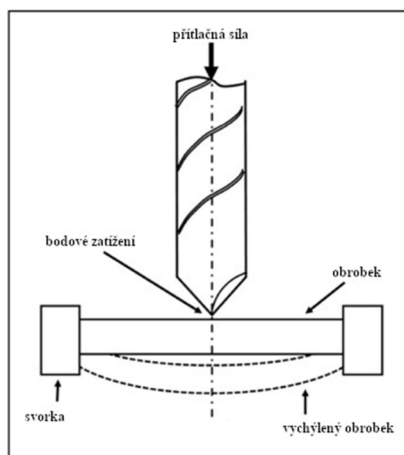
Výrobní odvětví se potýká se zásadním problémem tvorby otřepů při obrábění vláknových kompozitů v přesném strojírenství. Při vrtání hraje tento proces důležitou roli v určování kvality obrobeneho otvoru a povrchu, protože vedou ke zhoršení montážních vlastností a životnosti konstrukce. Tvorba otřepů je způsobena především plastickou deformací obrobku při obrábění a vzniká jak na vstupu, tak na výstupu z obrobku. Měření vzniklých otřepů se provádí pomocí několika veličin, jako je výška, tloušťka, objem a tvrdost. Typický vznik otřepu na vrtaném otvoru pozorovaný metodou optického mikroskopu je uveden na Obr. 5. [1]



Obr. 6 (a) Tvorba otřepů při vrtání; (b) snímek otřepů z optického mikroskopu. [1]

c. Prohnutí obrobku

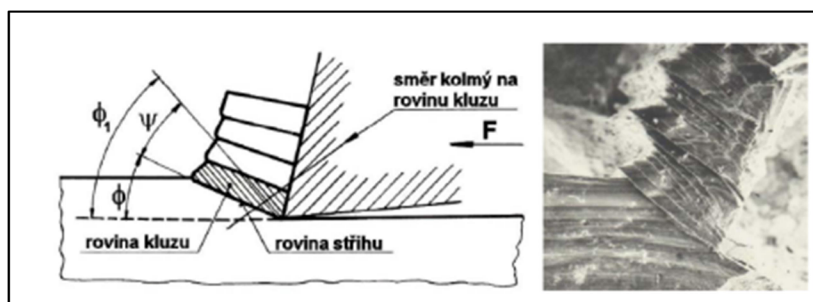
Prohnutí obrobku je jednou z hlavních příčin selhání materiálu při vrtání. Mechanismus vzniku průhybu spočívá v tom, že k němu obecně dochází v důsledku nevhodných parametrů obrábění a geometrie nástroje, což způsobuje nadměrnou přítláčnou sílu, která také vede k delaminaci a tvorbě otřepů při malé tloušťce neobrobeného materiálu ve výstupní fázi kompozitu. Kromě těchto vlivů má na vznik přítláčné síly a delaminaci zásadní vliv tuhost obrobku. Prohnutí obrobku také vytváří lokální deformaci (plastickou deformaci) v okolí otvoru při vrtání kompozitu, což je způsobeno koncentrovaným zatížením a celý kompozitní obrobek se prohýbá (pružná deformace) vlivem rychlosti posuvu. Schéma znázorňující průhyb obrobku při vrtání je uvedeno na Obr. 7. [1]



Obr. 7 Schéma průhybu obrobku při vrtání [1]

2.7. Tvorba třísky

Při používání stále vyšších řezných rychlostí na obráběcích strojích je nutné řešit problematiku odvádění třísek z místa jejich vzniku a velikosti prostoru, které zabírají. V důsledku plastické deformace dochází k pěchování třísky při jejím odchodu z místa řezu. [9]



Obr. 8 Vznik třísky [9]

Tříška má určité vlastnosti z hlediska rozměrů a tvarů, a to z důvodu lepší manipulace při odvodu ze stroje a následném dalším zpracování, a proto by měla zaujímat co nejmenší objem. Tvar třísky je také důležitý pro efektivní využití nástroje. Dlouhé a plynulé třísky se namotávají na nástroj a zvyšují nebezpečí. Z hlediska snadné manipulace a bezpečnosti práce je výhodná tříška elementární nebo článkovitá. [9]

Tvar vzniklé třísky závisí na:

- vlastnosti obráběného materiálu,
- geometrii řezného nástroje,
- materiálu řezného nástroje,
- řezných podmínkách. [9]

Při obrábění vyztužených kompozitů se tvoří drobné částičky třísky (zejména z vyztužujících vláken), které se ve formě prachu šíří z místa řezu do okolí. To vyžaduje aplikovat výkonná odsávací zařízení, aby nebyly překročeny zdravotní a hygienické limity pracovního prostředí. [2]

Vzhledem k nasákavosti kompozitů nelze při jejich obrábění většinou aplikovat obvyklé řezné kapaliny (někdy lze použít čistou vodu s inhibitorem koroze, olejové emulze jsou doporučovány pouze výjimečně). Nevhodná řezná kapalina může do značné míry snížit pevnost obráběného materiálu. [2]

3. METODIKA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Daná kapitola obsahuje informace o výrobě zkušebních vzorků, použitých strojích, nástrojích, měřicích přístrojích při stanovených řezných podmínkách a celkové metodice plánovaného experimentu.

Všechny přípravy a experiment probíhaly v Laboratoři třískových technologií a procesů na Technické univerzitě v Liberci.

3.1. Zkušební vzorky

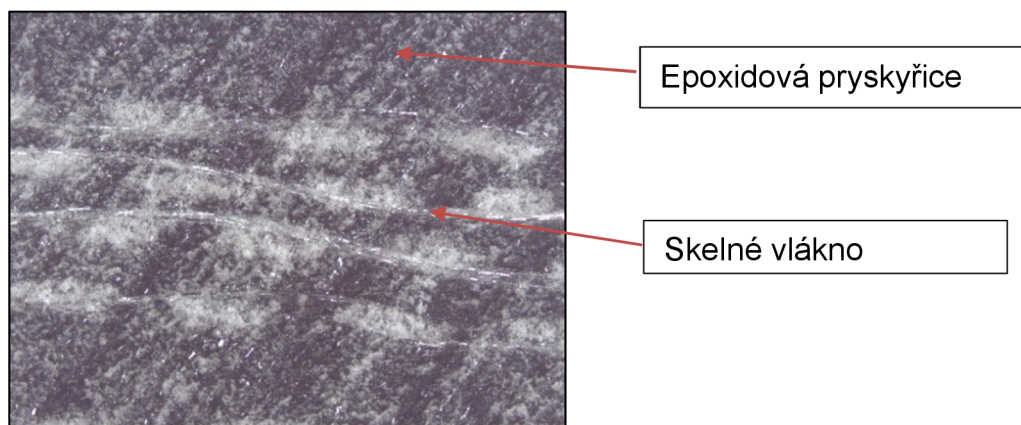
Pro experiment byly vytvořeny 2 typy vzorků. První vzorek byl vytvořen z epoxidové pryskyřice + skelného vlákna, dále jen Vzorek A (Obr. 9) a druhý vzorek z čisté epoxidové pryskyřice, dále jen Vzorek B (Obr. 10). Tyto vzorky o rozměrech 290x80x60 mm, byly pro potřeby experimentu po odlití vyjmuty z formy a následně zarovnaný na frézce FNG 32 (Obr. 12). Řezné podmínky pro vrtání kompozitních materiálů byly zvoleny dle literatury [13]. Přehled zvolených řezných podmínek kap. 3.7.



Obr. 9 Vzorek A



Obr. 10 Vzorek B



Obr. 11 Řez Vzorkem A - zvětšený výřez přibližně 5mm

Ke zhotovení vzorků z kompozitních materiálů byla použita dvousložková epoxidová pryskyřice LH288 (HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.). K vytvrzení pryskyřice bylo aplikováno tvrdidlo H 282 (HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o.), přidávané k hmotnostnímu poměru 100:23 a skelná vlákna. Vlákna byla použita ve formě skelné tkaniny Interglas 92110, kepr 2/2. Měrná hmotnost tkaniny 163 g/m². Pro výrobu vzorku bylo použito 202 g skelné výztuže a 1456 g epoxidové pryskyřice s poměrem 320 g tvrdidla. Bylo použito celkem 55 vrstev vláken, které byly pokládány po 5 vrstvách a prosycovány epoxidovou pryskyřicí s příměsí tvrdidla. Vzorky byly po dobu 8 hodin vytvrzovány při teplotě 18°C ± 2°C. K jejich vyjmutí z formy byla použita horkovzdušná pistole.

3.2. Obrobení vzorků

Hrubé vzorky z GFRP kompozitu o původních rozměrech 290x80x60 byly pomocí frézování obrobena na rozměry 280x70x50 mm, aby se odstranily nerovnosti a zajistila se přesnost vzorků pro plánovaný experiment vrtání. Operace zarovnání byla provedena na frézce FNG 32, která byla vybavena čelní frézovací hlavou s VBD.



Obr. 12 Operace zarovnání

3.3. Frézka FNG 32

Veškeré vrtací operace za sucha byly prováděny u dodaného kompozitního materiálu pomocí konvenční frézky FNG 32, (Obr. 13) od výrobce TOS Olomouc s.r.o. Parametry obrábějícího stroje jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Parametry frézky FNG 32

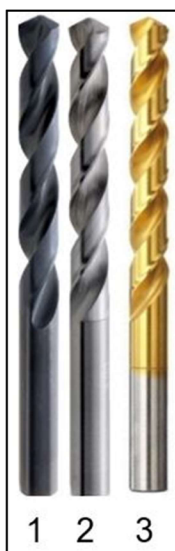
Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Rozměry pracovního stolu	400x800	mm
Max. zatížení stolu	350	kg
Pracovní zdvih podélný	600	mm
Pracovní zdvih příčný	400	mm
Pracovní zdvih svislý	400	mm
Rozsah otáček vřetene	50-1000	1/min
Výkon hlavního motoru	4	kW
Hmotnost stoje	2500	kg



Obr. 13 Frézka FNG 32

3.4. Použité nástroje

Při obrábění vzorků byly použity řezné nástroje od firmy Premus, (Obr. 14). Jedná se o vrtáky o průměru 5 mm, délce 86 mm s úhlem špičky 118°. Jednotlivé vrtáky jsou určeny k vrtání do kompozitních materiálů. Liší se nástrojovými materiály a povrchovou úpravou.



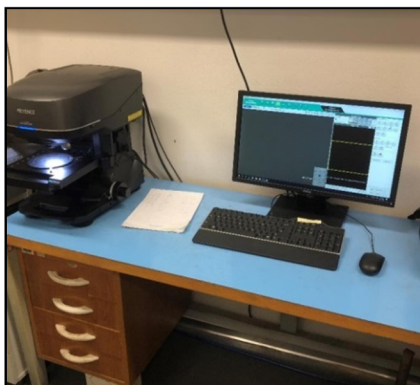
Obr. 14 Řezné nástroje

1 – HSS; 2 – SK; 3 – HSS- TiAlN;

Každý nástroj byl použit pro vrtání 45ti děr v rámci výzkumu opotřebení a delaminace řezného nástroje a 25ti děr pro určení řezné síly F_z .

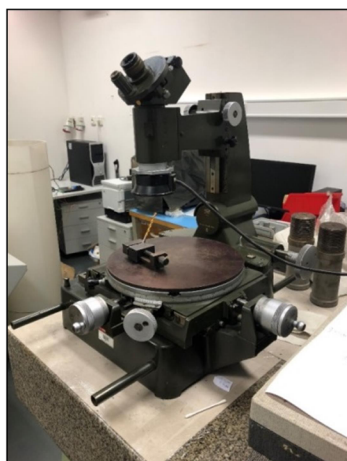
3.5. Mikroskopie

Ke zkoumání delaminace, otřepů a tvorby třísek u vrtaných vzorků byl použit konfokální mikroskop a dílenský mikroskop Zeiss. Konfokální mikroskop s 3D laserovým bezkontaktním profiloměrem Keyence VK-X3000 byl použit pro získání snímku opotřebení vedlejšího ostří rezného nástroje a poruch vzorků při procesu vrtání (Obr. 15). Ovládání přístroje a vyhodnocení výsledků bylo realizováno softwarem MultiFileAnalyser.



Obr. 15 Konfokální mikroskop s pracovní stanicí

Pro určení velikosti opotřebení hlavního ostří rezného nástroje byl použit mikroskop ZEISS (Obr. 16). Stolek mikroskopu umožňuje lineární posuv v ose X, Y. Pohyb stolu je zajištěn pomocí mikrometrických šroubů na vodících lištách. Odečítání hodnot opotřebení vedlejšího ostří bylo prováděno prostřednictvím mikrometrických hlavic. Pomocí nitkového kříže je optickým způsobem přes okulár prováděno polohování měřeného vzorku.



Obr. 16 Dílenský mikroskop ZEISS

3.6. Dynamometr

Pro měření řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER typ 9265B (Obr. 17) s nábojovým zesilovačem 5019B (Obr. 18). Na pracovní stůl frézky byl upnut dynamometr se strojním svěrákem, do kterého se upínaly jednotlivé vzorky. Naměřené hodnoty řezných sil byly znázorněny v softwaru LabVIEW6.1. a dále zpracovávány v softwaru Excel.



Obr. 17 Dynamometr.



Obr. 18 Nábojový zesilovač.

3.7. Řezné podmínky

Jak již bylo uvedeno v bodě 3.4, každý nástroj byl použit pro obrábění 45ti otvorů o tloušťce 50 mm. Jak je uvedeno v Tab. 4, byly nastaveny 3 hodnoty posuvů (0,1; 0,075; 0,05), které byly použity při vrtání GFRP kompozitů při řezné rychlosti 4000 ot/min. Řezné podmínky byly stanoveny v podobných rozmezích jako v literatuře [13].

Tab. 3 Řezné podmínky pro měření opotřebení a delaminace

Opotřebení, delaminace		
Nástroj	Řezné podmínky	
	Konstantní	
	n [ot/min]	f [mm/ot]
HSS	4000	0,1
SK		
HSS+		

Tab. 4 Řezné podmínky pro měření řezné síly

Řezná síla F_z [N]		
Nástroj	Řezné podmínky	
	Konstantní	
	n [ot/min]	f [mm/ot]
HSS	4000	0,1; 0,075; 0,05
SK		
HSS+		

3.8. Opotřebení řezného nástroje

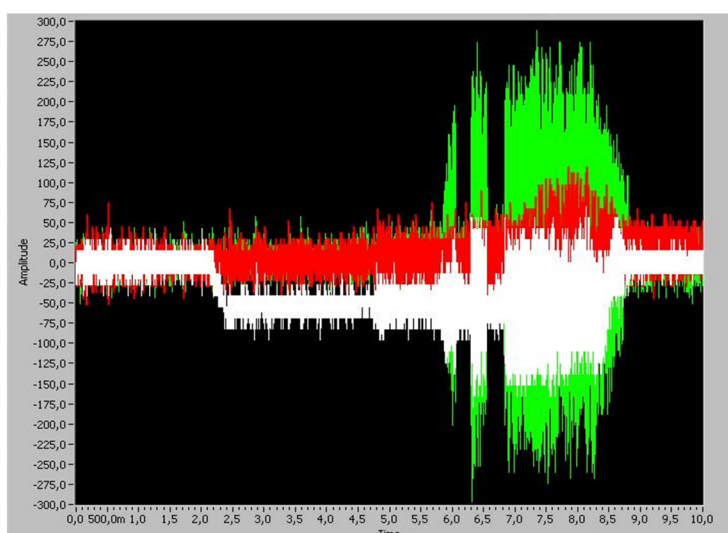
Hlavní ostří každého řezného nástroje bylo změřeno na dílenském mikroskopu ZEISS pomocí nitkového kříže. Naopak vedlejší ostří nástroje bylo zaznamenáno pomocí mikroskopu s 3D laserovým skenováním Keyence. Všechny řezné nástroje byly postupně proměřovány po 15ti vrtaných otvorech. Každý nástroj byl upnutý do patričních držáků u mikroskopů, poté následovalo změření opotřebení hlavního a vedlejšího ostří.

3.9. Delaminace

Dle řezných podmínek, bylo vrtáno pro každý řezný nástroj 45 děr a každá 15tá díra byla proměřena. Otvor byl rozdělen na 2 části vstupní a výstupní, v každém z nich bylo provedeno měření. Z naměřených hodnot průměru otvoru byla vypočtena průměrná hodnota (Tab. 15).

3.10. Řezná síla

Experiment byl realizován za řezných podmínek uvedených v Tab. 4. Z jednotlivých grafů působících řezných sil byly zjištěny hodnoty síly F_z . Před každým měřením bylo nutné provést kalibraci dynamometru z důvodu správnosti měření. Výsledkem bylo grafické řešení řezné svislé síly F_z v softwaru LabVIEW 6.1. Všechny hodnoty byly zpracovány a vyhodnoceny pomocí softwaru Excel. Na Obr. 19 je uvedeno grafické řešení ze softwaru LabVIEW 6.1



Obr. 19 Grafické řešení ze softwaru LabVIEW 6.1.

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se zabývá samotným experimentem. Práce byla rozdělena na 4 části. Opotřebení rezného nástroje (podkapitola 4.1), delaminace (podkapitola 4.2), tvorba třísky (podkapitola 4. 3.) a rezná síla (podkapitola 4.4.). Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 5 až 12.

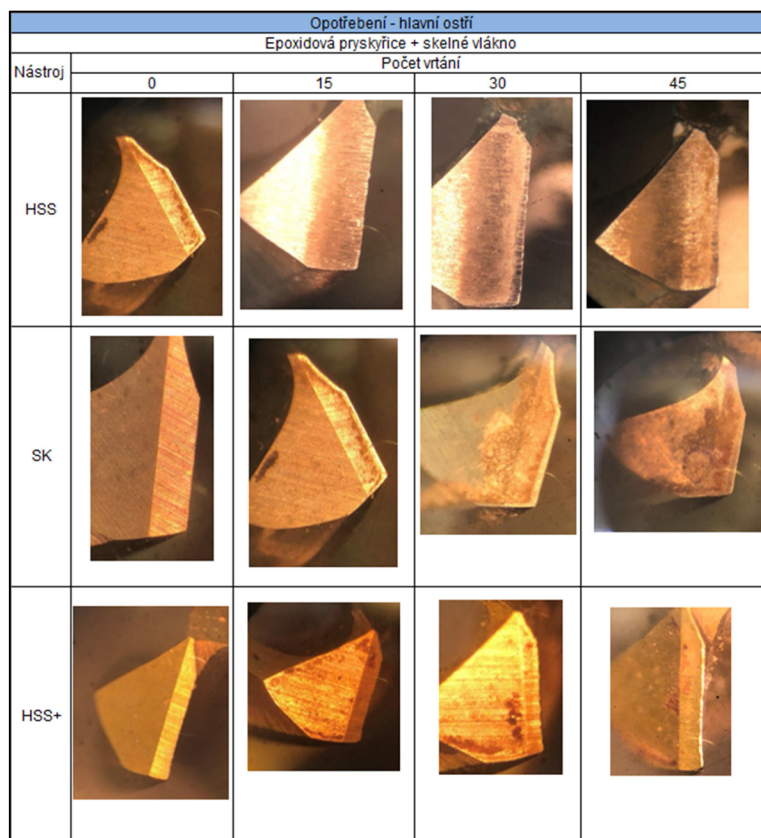
4.1. Opotřebení nástroje

Tato kapitola obsahuje výsledky měření opotřebení hlavního a vedlejšího ostří rezného nástroje při stanovených rezných podmínkách dle Tab. 3. Tyto hodnoty byly měřeny na vzorcích s použitím rezných nástrojů HSS, SK a HSS+.

a. Vzorek A – epoxidová pryskyřice + skelná vlákna ve formě tkaniny

Tab. 5 Naměřené opotřebení hlavního ostří za konstantních rezných podmínek při vrtání do Vzorku A.

Opotřebení - Hlavní ostří VB [μm]								
Vzorek A – (kompozit GFRP)								
Nástroj	Počet vrtání							
	0		15		30		45	
	VB [μm]	Nejistota měření [μm]	VB [μm]	Nejistota měření [μm]	VB [μm]	Nejistota měření [μm]	VB [μm]	Nejistota měření [μm]
HSS	0	± 0	1,33	$\pm 1,76$	2,33	$\pm 4,65$	5	$\pm 9,13$
SK	0	± 0	0,33	$\pm 1,76$	1,33	$\pm 4,65$	2	$\pm 1,76$
HSS+	0	± 0	5	$\pm 5,27$	4,67	$\pm 6,09$	7,33	$\pm 3,5$

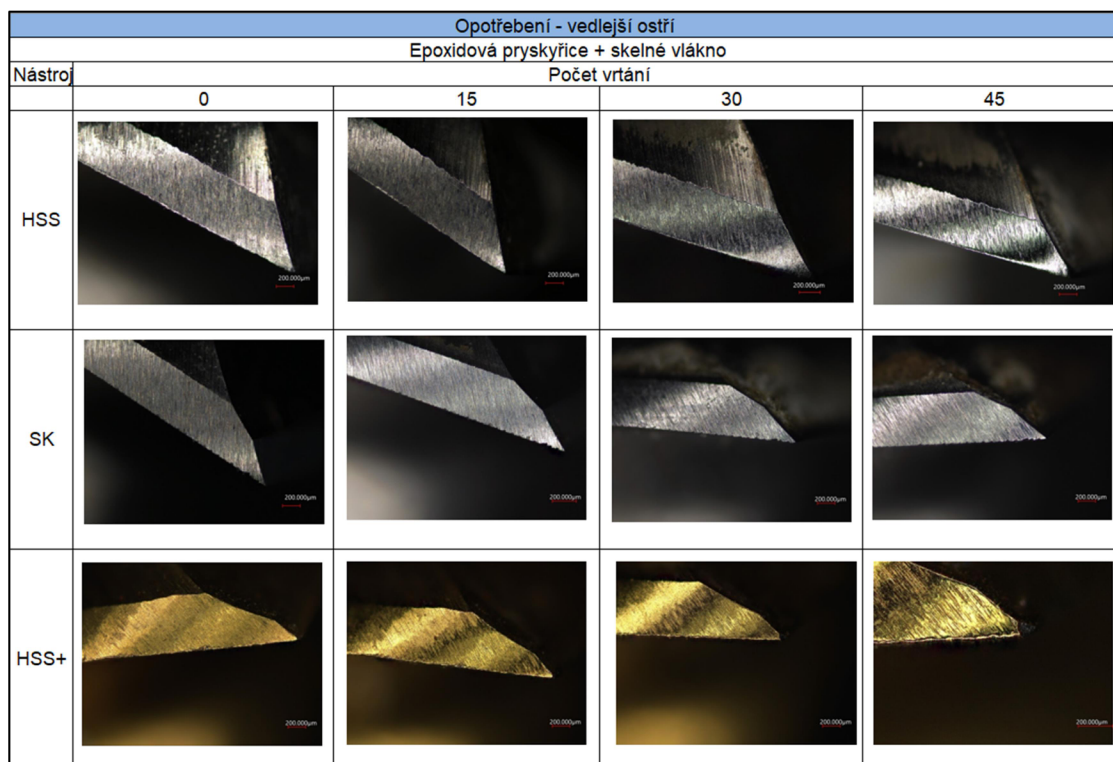


Obr. 20 Opotřebení hlavního ostří rezných nástrojů při vrtání do Vzorku A.

Obr. 20 ukazuje opotřebení nástroje při 45ti realizovaných vrtání. Lze si všimnout, že rezný nástroj z HSS – TiAlN dosáhl největšího opotřebení na hlavním ostří při vrtání do Vzorku A – epoxidová pryskyřice + skelná vlákna ve formě tkaniny. Naopak nejnižšího opotřebení si lze povšimnout na nástroji z SK.

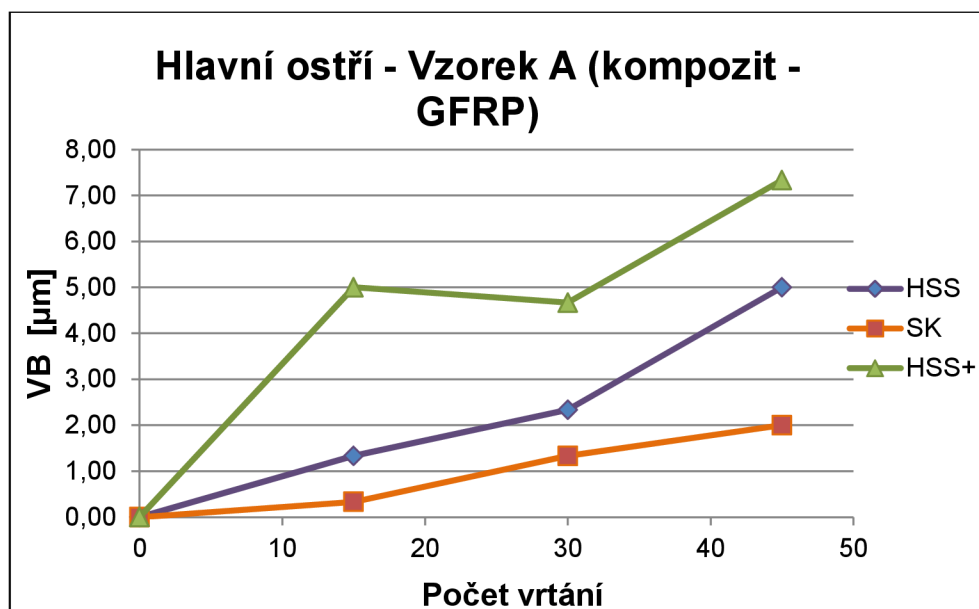
Tab. 6 Naměřené opotřebení vedlejšího ostří za konstantních rezných podmínek při vrtání do Vzorku A

Opotřebení – Vedlejší ostří VB [μm]								
Vzorek A – (kompozit GFRP)								
Nástroj	Počet vrtání							
	0		15		30		45	
	VB [μm]	Nejistota měření [μm]	VB [μm]	Nejistota měření [μm]	VB [μm]	Nejistota měření [μm]	VB [μm]	Nejistota měření [μm]
HSS	0	± 0	0,67	$\pm 3,51$	1,5	$\pm 2,64$	3	$\pm 6,01$
SK	0	± 0	0,33	$\pm 1,76$	1	$\pm 3,04$	1	$\pm 3,04$
HSS+	0	± 0	1,67	$\pm 1,76$	2,33	$\pm 1,76$	4,67	$\pm 1,76$

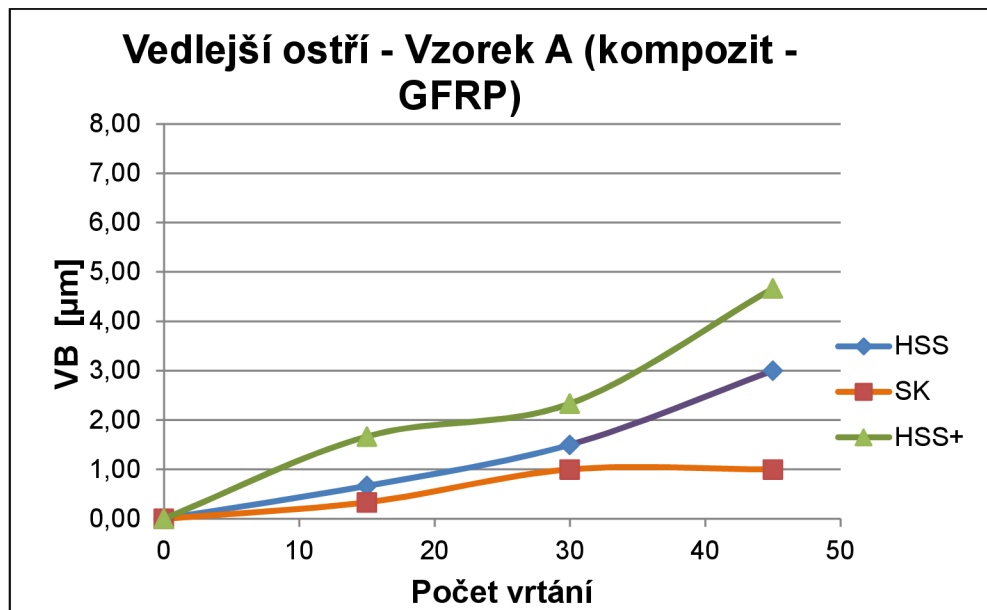


Obr. 21 Opotřebení vedlejšího ostří řezných nástrojů při vrtání do Vzorku A

Obr. 21 znázorňuje opotřebení vedlejšího ostří řezného nástroje při počtu 45ti vrtaných děr. Lze vidět, že nástroj z HSS - TiAlN má největší opotřebení vedlejšího ostří, oproti tomu nástroj z SK má nejnižší opotřebení.



Graf 1 Naměřené hodnoty opotřebení na hlavním ostří při vrtání do Vzorku A.



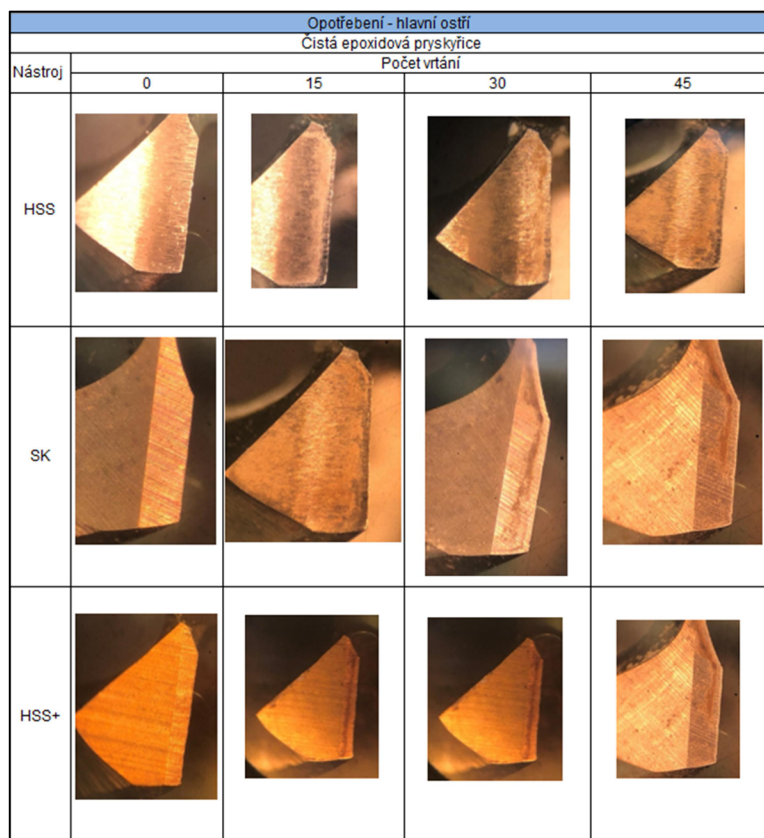
Graf 2 Naměřené hodnoty opotřebení na vedlejší ostří při vrtání do Vzorku A.

Dle Tab. 5, 6 a Graf 1 a 2 je patrné, že největší opotřebení hlavního i vedlejšího ostří při vrtání do Vzorku A (kompozit – GFRP) bylo zjištěno u řezného nástroje z HSS+. Naopak nejnižší opotřebení hlavního a vedlejšího ostří dosáhl řezný nástroj z SK.

b. Vzorek B – epoxidová pryskyřice

Tab. 7 Naměřené opotřebení hlavního ostří za konstantních řezných podmínek při vrtání do Vzorku B.

Opotřebení - Hlavní ostří VB [µm]								
Vzorek B (epoxidová pryskyřice)								
Nástroj	Počet vrtání							
	0		15		30		45	
	VB [µm]	Nejistota měření [µm]	VB [µm]	Nejistota měření [µm]	VB [µm]	Nejistota měření [µm]	VB [µm]	Nejistota měření [µm]
HSS	0	± 0	1	± 3,04	1,33	± 1,76	4	± 5,27
SK	0	± 0	0,33	± 1,76	0,66	± 1,76	1	± 3,04
HSS+	0	± 0	2,67	± 1,76	3,33	± 3,51	4,67	± 1,76

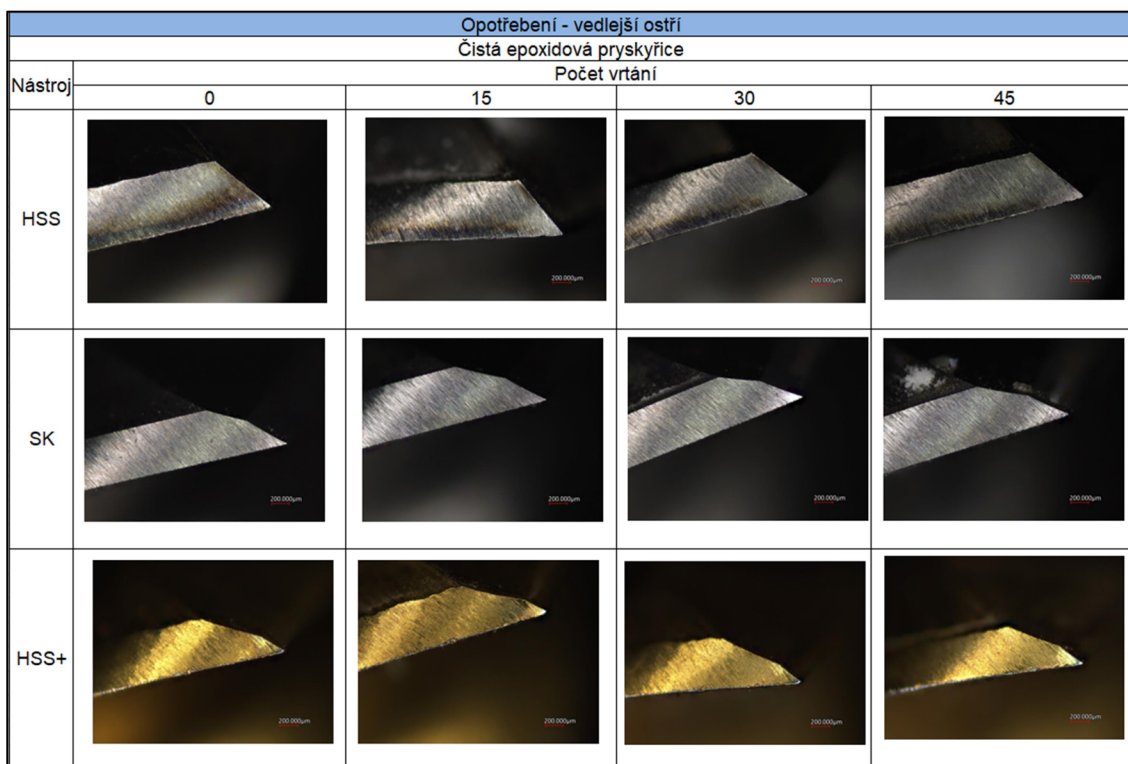


Obr. 22 Opotřebení hlavního ostří řezných nástrojů při vrtání do Vzorku B.

Z Obr. 22 vidíme, že opotřebení hlavního ostří nástroje při vrtání do Vzorku B (epoxidová pryskyřice) má největší hodnotu opotřebení nástroj z HSS – TiAlNi oproti tomu nástroj z SK má nejnižší opotřebení.

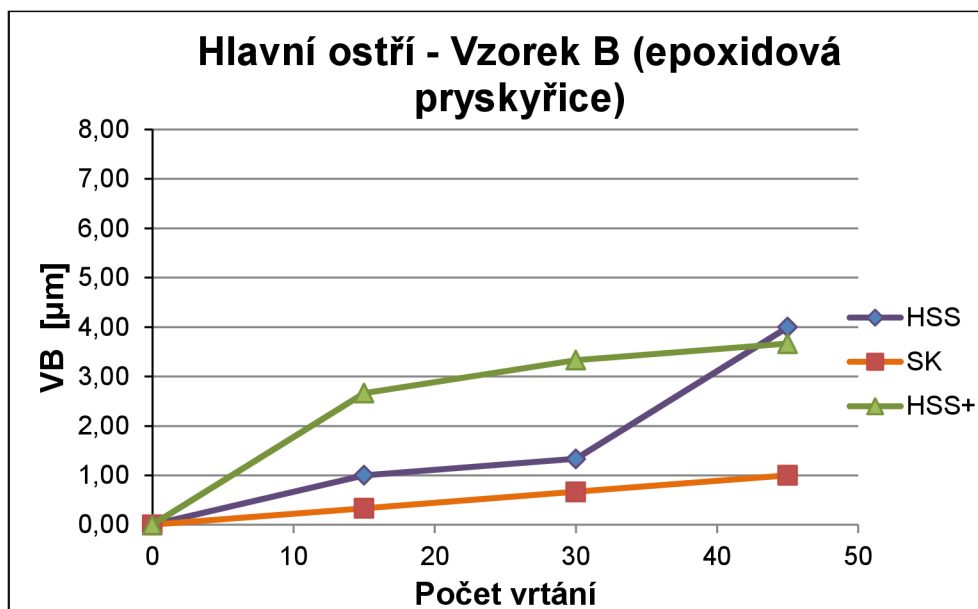
Tab. 8 Naměřené opotřebení vedlejšího ostří za konstantních řezných podmínek do Vzorku B.

Opotřebení – Vedlejší ostří VB [μm]								
Vzorek B (epoxidová pryskyřice)								
Nástroj	Počet vrtání							
	0		15		30		45	
	VB [μm]	Nejistota měření [μm]	VB [μm]	Nejistota měření [μm]	VB [μm]	Nejistota měření [μm]	VB [μm]	Nejistota měření [μm]
HSS	0	± 0	0,67	$\pm 1,76$	1	$\pm 3,04$	2	$\pm 3,04$
SK	0	± 0	0,33	$\pm 1,76$	0,66	$\pm 1,76$	0,66	$\pm 1,76$
HSS+	0	± 0	1,33	$\pm 1,76$	2	± 0	2	$\pm 3,04$

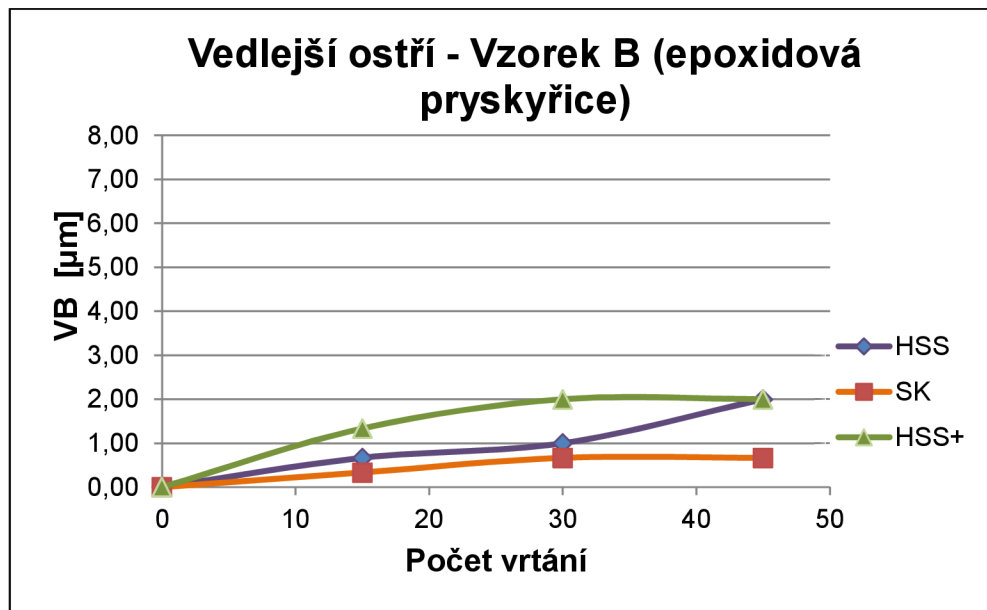


Obr. 23 Opatření vedlejšího ostří rezných nástrojů při vrtání do Vzorku B.

Obr. 23 znázorňuje opotřebení vedlejšího ostří rezného nástroje při 45ti počtu vrtaných děr do Vzorku B (epoxidová pryskyřice). Můžeme si všimnout, že nástroj z HSS - TiAlN má největší opotřebení vedlejšího ostří, oproti tomu nástroj z SK má nejnižší opotřebení.



Graf 3 Naměřené hodnoty opotřebení na hlavním ostří při vrtání do Vzorku B



Graf 4 Naměřené hodnoty opotřebení na vedlejších ostřích při vrtání do Vzorku B.

Z Tab. 7, 8 a z Graf. 3 a 4 je patrné, že největší opotřebení hlavního i vedlejšího ostří při vrtání do Vzorku B bylo zjištěno u řezného nástroje z HSS. Naopak nejnižší opotřebení hlavního a vedlejšího ostří dosáhl řezný nástroj ze SK, stejně jako při vrtání do Vzorku A.

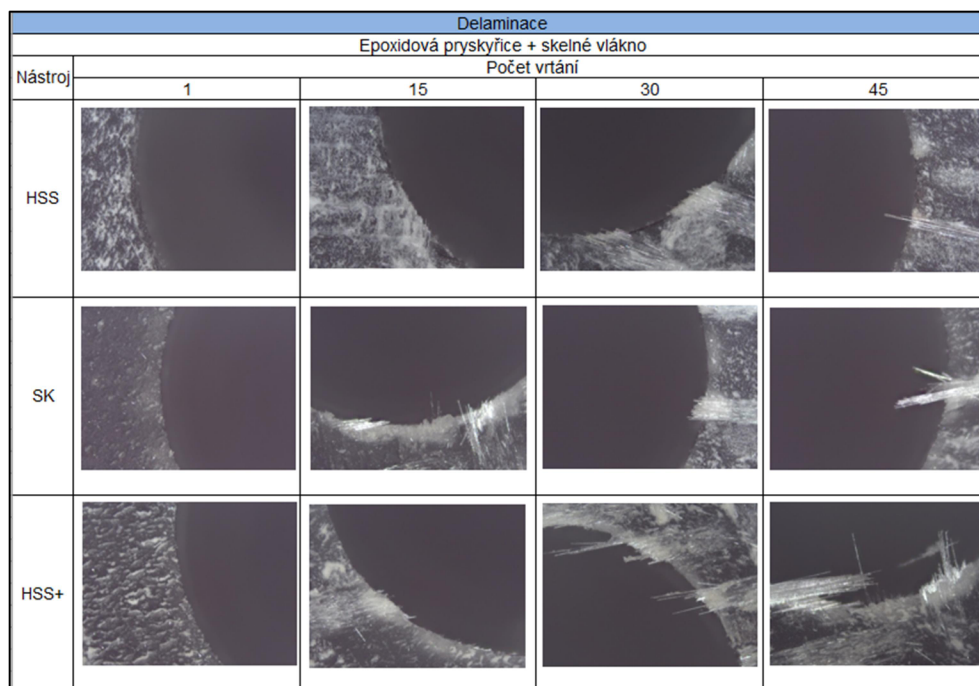
4.2. Delaminace

Tato kapitola obsahuje výsledky měření delaminace při stanovených řezných podmínkách dle Tab. 3. Tyto hodnoty byly měřeny na vzorcích s použitím řezných nástrojů HSS, SK a HSS+.

a. Vzorek A - epoxidová pryskyřice + skelná vlákna ve formě tkaniny

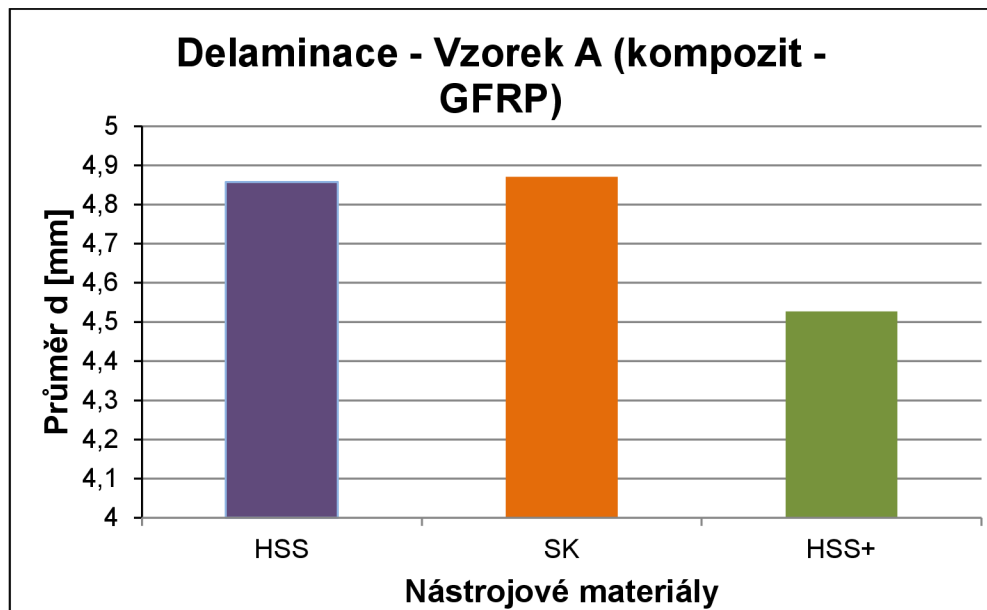
Tab. 9 Naměřené hodnoty delaminace při vrtání do Vzorku A

Delaminace		
Vzorek A (kompozit – GFRP)		
Nástroj	Průměr d [mm]	Konfidenční interval d [mm]
HSS	4,85	$\pm 0,165$
SK	4,87	$\pm 0,159$
HSS+	4,52	$\pm 0,788$



Obr. 24 Delaminace při vrtání do Vzorku A.

Z výše uvedeného Obr. 24 plyne, že s nárůstem počtu vrtaných otvorů vlivem zvyšujícího se opotřebení nástroje roste potřeba větší síly a nástupu delaminace při vrtání do Vzorku A (kompozit GFRP) o hloubce 40 mm. Na Obr. 23 si můžeme povšimnout po počtu 15ti vrtaných otvorů u nástroje z SK a HSS+ vyčnívajících vláken. Obrobená plocha nemá jasný řez, okraj je roztržený s odloupenou horní vrstvou a poškozenou polymerní matricí. Po 30ti vrtaných otvorech je zachycen obrobený povrch Vzorku A, se svazkovým množstvím vyčnívajících ořezaných vláken umístěných nepravidelně po linii obrobeného povrchu. Po 45ti vrtaných otvorech je vidět, že obrobená plocha při vrtání nástrojem z HSS+ má největší množství vytahovaných vláken, která nejsou řezaná ale ohýbaná v důsledku největšího opotřebení rezného nástroje.



Graf 5 Naměřené hodnoty delaminace při vrtání do Vzorku A.

Z Tab. 9 a z Graf 5 vyplývá, že nejhorší rozměr navrtaného otvoru dosáhl řezný nástroj z HSS+ ($4,52 \pm 0,788$ mm). Naopak nejlepší rozměr dosáhl nástroj ze SK ($4,87 \pm 0,159$ mm).

b. Vzorek B - epoxidová pryskyřice

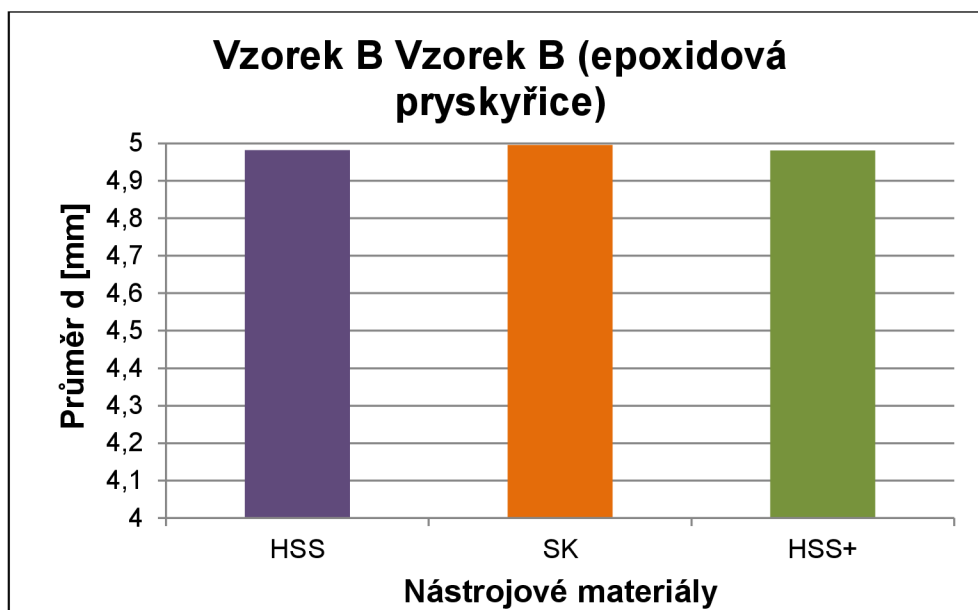
Tab. 10 Naměřené hodnoty delaminace při vrtání do Vzorku B.

Delaminace		
Vzorek B (epoxidová pryskyřice)		
Nástroj	Průměr d [mm]	Konfidenční interval d [mm]
HSS	4,99	$\pm 0,007$
SK	4,99	$\pm 0,159$
HSS+	4,98	$\pm 0,019$

Delaminace				
Čistá epoxidová pryskyřice				
Nástroj	Počet vrtání			
	1	15	30	45
HSS				
SK				
HSS+				

Obr. 25 Bez delaminace při vrtání do Vzorku B.

Z Obr. 25 vyplývá, že při absenci skelných vláken je vidět rozměrová stabilita bez jakýkoliv poruch. Obr. 25 zachycuje čistý řez s nepatrně odloupnutou vrchní vrstvou.



Graf 6 Naměřené hodnoty delaminace při vrtání do Vzorku B.

Z Tab. 10 a z Graf. 6 vyplývá, že nejnižší delaminace bylo dosaženo řezným nástrojem z SK ($4,99 \pm 0,159$ mm) a z HSS ($4,99 \pm 0,007$ mm). Nejhoršího rozměru dosáhl řezný nástroj z HSS+ ($4,98 \pm 0,019$ mm).

4.3. Tvorba třísky

Při vrtání byl pozorován proces tvorby třísky při konstantních řezných podmínkách dle Tab. 3. u obou vzorků s použitím všech řezných nástrojů - HSS, SK, HSS+.



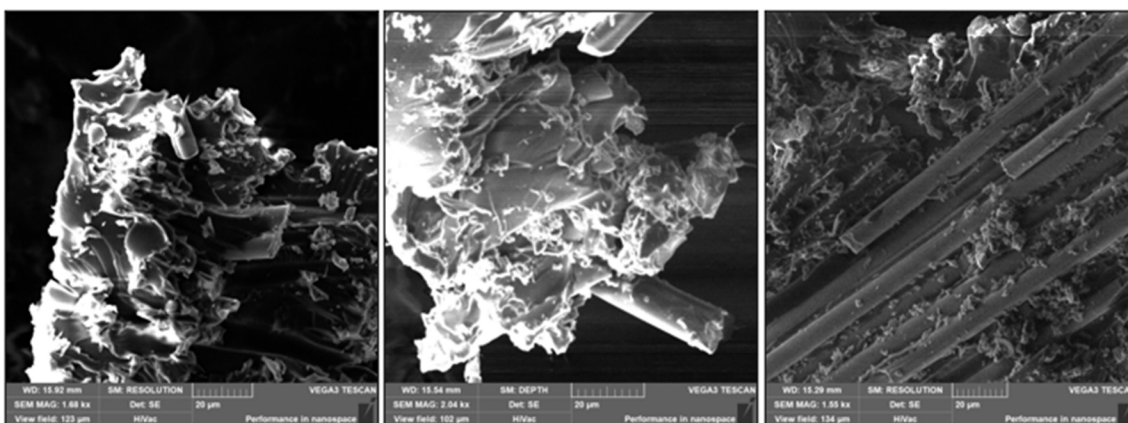
Obr. 26 Proces tvorby třísky

a. Vzorek A – epoxidová pryskyřice + skelné vlákno ve formě tkaniny

Tvorba třísky			
Epoxidová pryskyřice + skelné vlákno			
Nástroj	Počet vrtání		
	15	30	45
HSS			
SK			
HSS+			

Obr. 27 Tříška při vrtání do Vzorku A

Během procesu vrtání byla vytvořena dlouhá vinutá tříška, která přecházela na drobinou (jemný prášek) při vrtání do Vzorku A (kompozit GFRP).



Obr. 28 Tříška nástroje HSS, SK, HSS+

Obr. 28 ukazuje třísky, ze Vzorku A (Kompozit GFRP) při posuvu 0,1 mm/ot., které byly naskenovány na elektronovém mikroskopu (SEM) Vláknina na Obr. 28 rezného nástroje z HSS a SK jsou zlomená v důsledku smyku při 45°. Slabá pevnost vazby mezi skelnými vlákny a matricí má za následek mezifázové i interlaminární porušení smykem. Naopak na je patrné u nástroje z HSS+, že vlákna byla vytržena jako následek delaminace obrobku.

b. Vzorek B – epoxidová pryskyřice

Tvorba třísky			
Čistá epoxidová pryskyřice			
Nástroj	Počet vrtání		
	15	30	45
HSS			
SK			
HSS+			

Obr. 29 Tříška při vrtání do Vzorku B.

Dlouho vinutá tříška, která přecházela na drobnou byla pozorována i při vrtání do Vzorku B (Epoxidová pryskyřice).

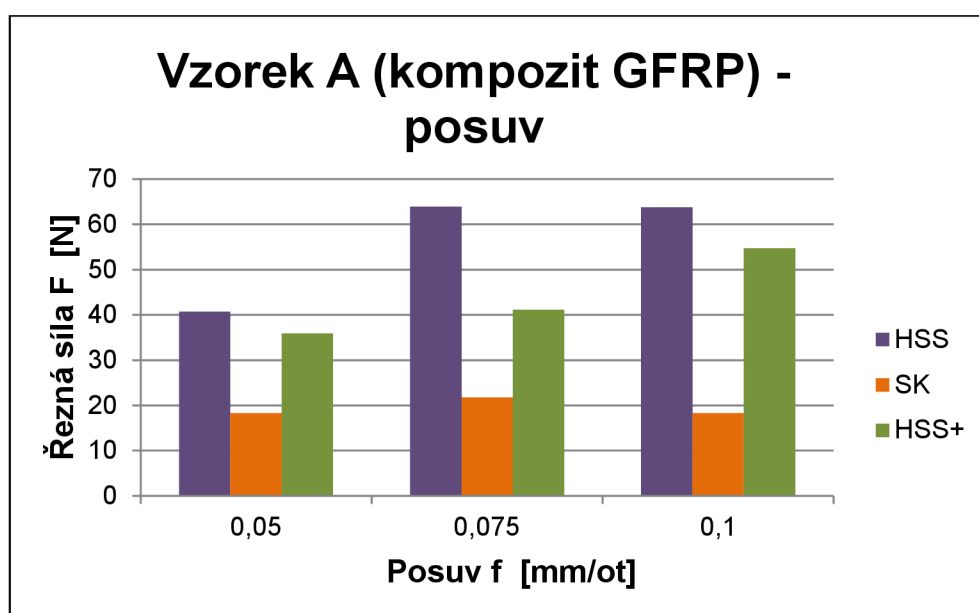
4.4. Vyhodnocení výsledků řezných sil

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření řezných sil při stanovených řezných podmínkách dle tabulky 4. Tyto hodnoty byly měřeny na vzorcích z epoxidové pryskyřice + skelné vlákno a čisté epoxidové pryskyřice s použitím řezných nástrojů HSS, SK a HSS+.

a. Vzorek A - epoxidová pryskyřice + skelná vlákna ver formě tkaniny

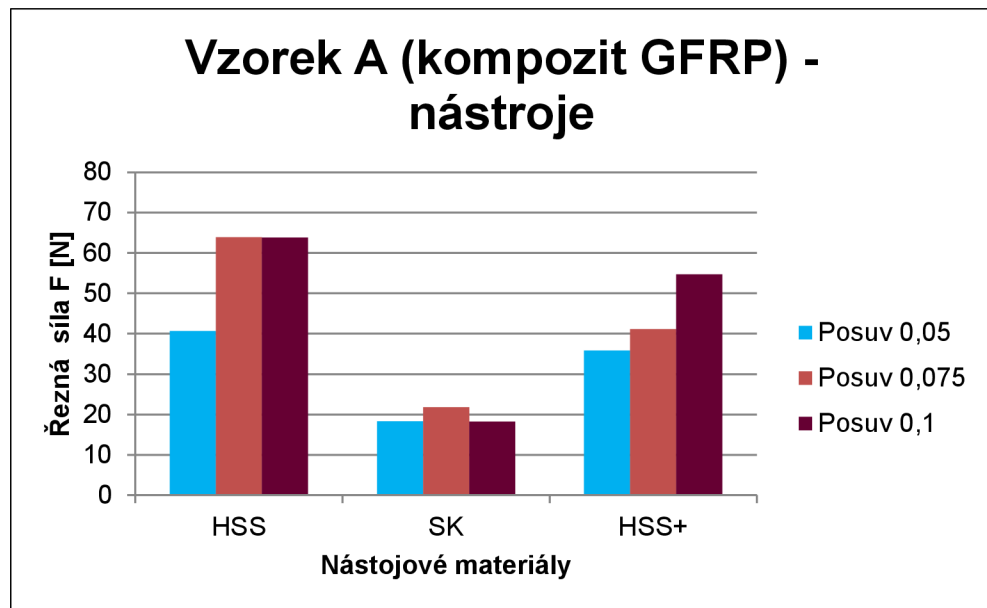
Tab. 11 Naměřené hodnoty řezné síly při vrtání do Vzorku A.

Řezná síla F_z [N]						
Vzorek A (kompozit – GFRP)						
Nástroj	Posuv $f = 0,05$ [mm/ot]		Posuv $f = 0,075$ [mm/ot]		Posuv $f = 0,1$ [mm/ot]	
	F_z [N]	Nejistota měření F_z [N]	F_z [N]	Nejistota měření F_z [N]	F_z [N]	Nejistota měření F_z [N]
HSS	40,69	± 1,14	63,87	± 1,78	63,78	± 2,31
SK	18,33	± 2,95	21,8	± 3,45	18,27	± 3,24
HSS+	35,87	± 2,38	41,12	± 0,33	54,71	± 2,01



Graf 7 Naměřené hodnoty řezné síly pro různé posuvy při vrtání do Vzorku A.

Z Tab. 11 a Graf. 7 vyplývá, že největší řezné síly za konstantních řezných podmínek dle Tab. 4. bylo dosaženo u řezného nástroje z HSS při posuvu 0,075 mm/ot. Naopak nejnižší řezné síly bylo dosaženo při posuvu 0,1 mm/ ot u nástroje z SK.



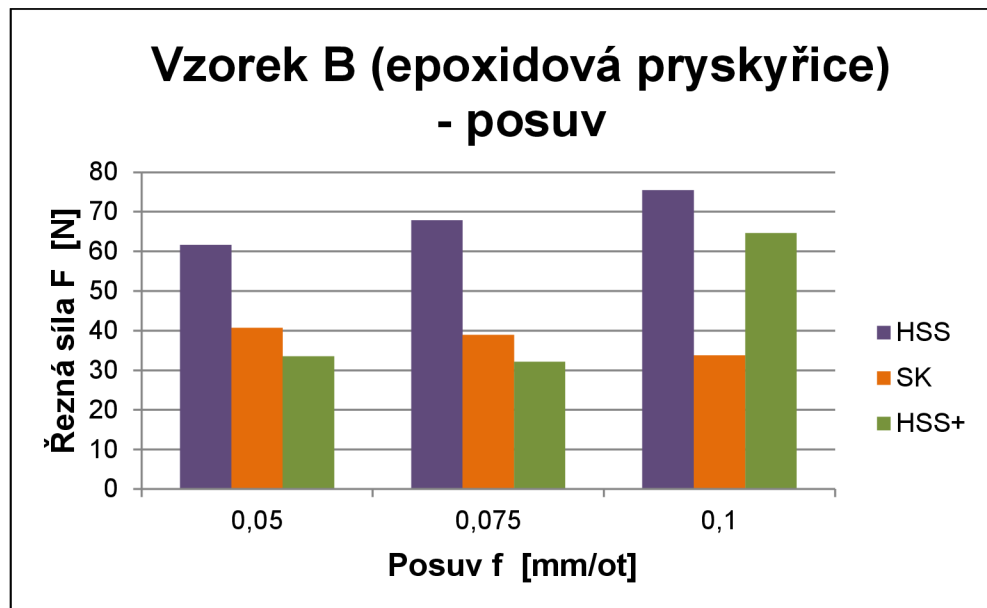
Graf 8 Naměřené hodnoty řezné síly při vrtání do Vzorku A.

Při vrtání do Vzorku A bylo zjištěno, že řezný nástroj ze SK má nejnižší hodnoty řezné síly u všech posuvů.

b. Vzorek B - epoxidová pryskyřice

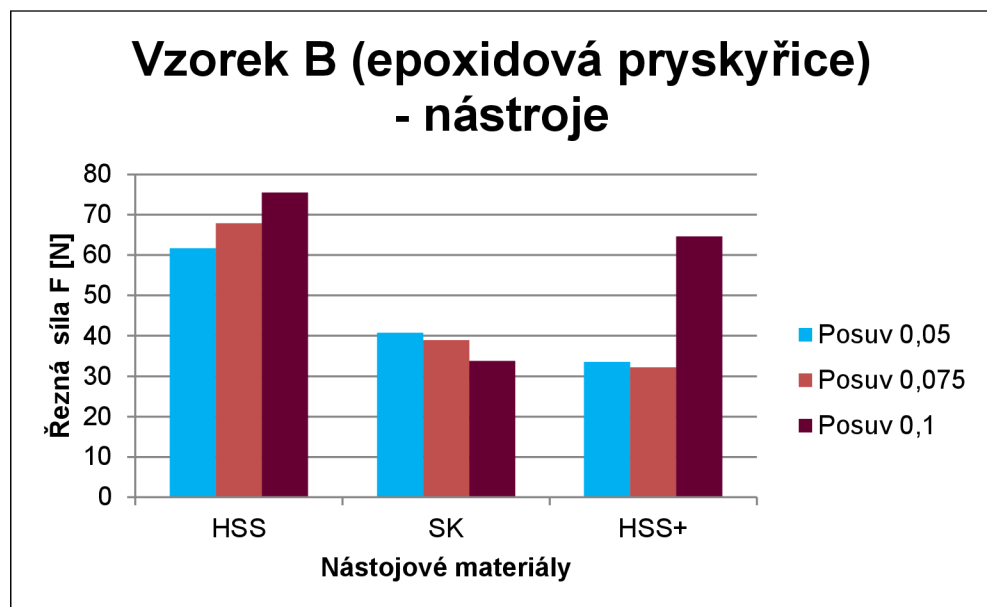
Tab. 12 Naměřené hodnoty řezné síly při vrtání do Vzorku B.

Řezná síla F_z [N]						
Vzorek B (epoxidová pryskyřice)						
Nástroj	Posuv $f = 0,05$ [mm/ot]		Posuv $f = 0,075$ [mm/ot]		Posuv $f = 0,1$ [mm/ot]	
	F_z [N]	Nejistota měření F_z [N]	F_z [N]	Nejistota měření F_z [N]	F_z [N]	Nejistota měření F_z [N]
HSS	61,64	± 2,99	67,82	± 5,01	75,45	± 0,24
SK	40,73	± 9,31	38,9	± 7,39	33,8	± 5,32
HSS+	33,52	± 5,61	32,17	± 4,02	64,63	± 7,29



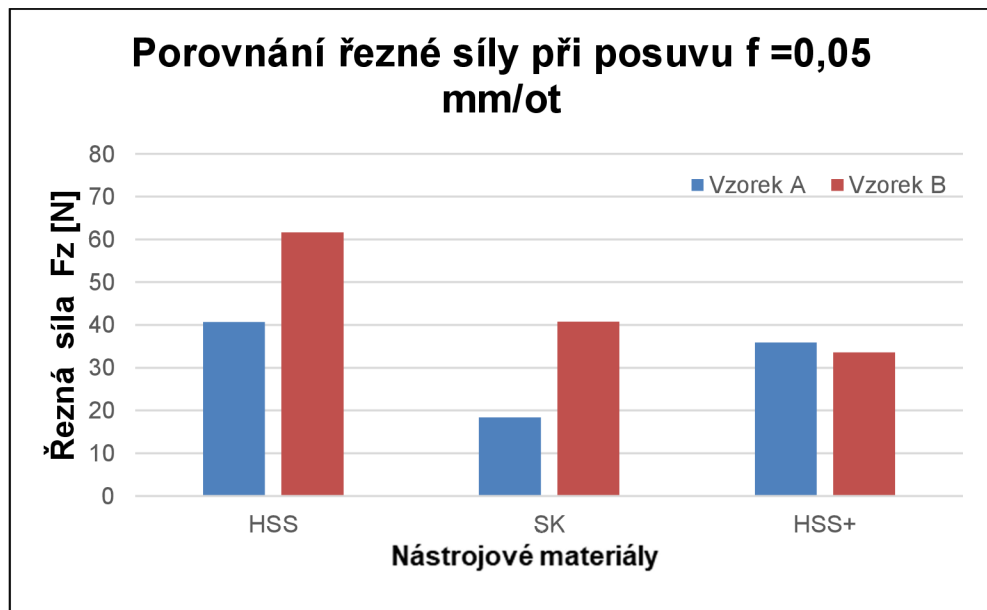
Graf 9 Naměřené hodnoty řezné síly pro různé posuvy při vrtání do Vzorku B.

Z Tab. 12 a Graf 9 vyplývá, že největší řezné síly za konstantních řezných podmínek dle Tab. 4. bylo dosaženo u řezného nástroje z HSS při posuvu 0,1mm/ot. Naopak nejnižší řezné síly bylo dosaženo při posuvu 0,075 mm/ot u nástroje z HSS+.



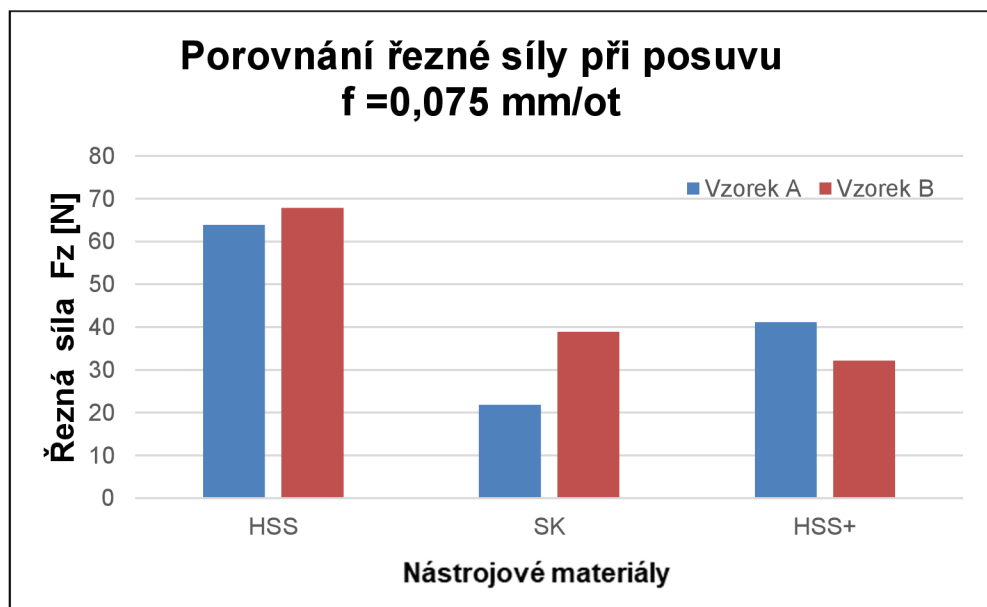
Graf 10 Naměřené hodnoty řezné síly Vzorku B.

Z Graf 10 vyplývá, že řezný nástroj z SK při posuvu 0,1 mm/ot a nástroj z HSS + při posuvu 0,075 a 0,05 mm/ot dosáhly nejnižších hodnot řezné síly.



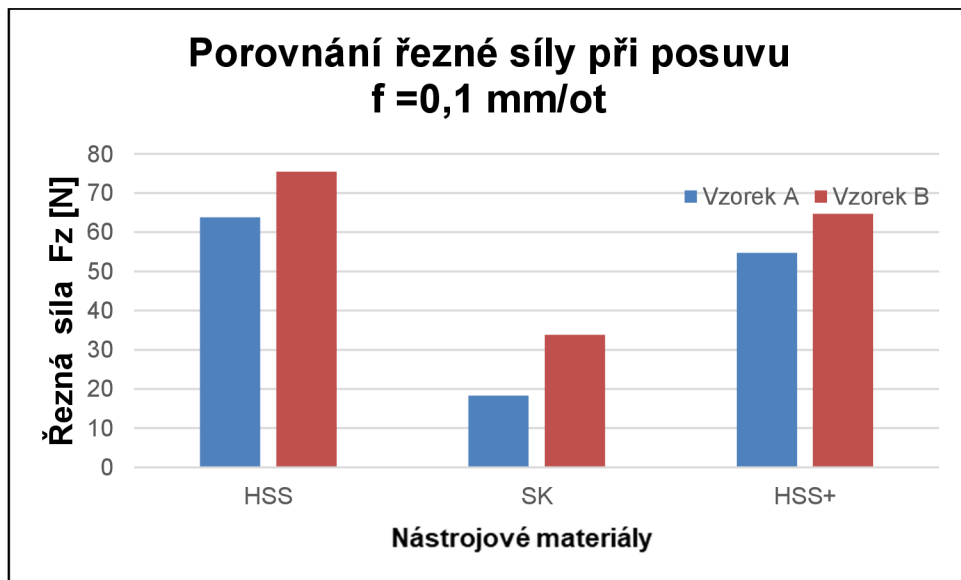
Graf 11 Porovnání řezné síly při posuvu $f = 0,05$ [mm/ot].

Z Graf 11 vyplývá, že řezná síla při posuvu $f = 0,05$ [mm/ot] má nejnižší hodnotu při vrtání do Vzorku A s řezným nástrojem z SK. Naopak nejvyšší řezné síly bylo dosaženo při vrtání do Vzorku B s nástrojem z HSS.



Graf 12 Porovnání řezné síly při posuvu $f = 0,075$ [mm/ot].

Z Graf 12 vyplývá, že řezná síla při posuvu $f = 0,075$ [mm/ot] má nejnižší hodnotu při vrtání do Vzorku A s řezným nástrojem z SK. Naopak nejvyšší řezná síla byla naměřena při vrtání do Vzorku B s nástrojem z HSS.



Graf 13 Porovnání řezné síly při posuvu $f = 0,1$ [mm/ot].

Z Graf 13 vyplývá, že řezná síla při posuvu $f = 0,1$ [mm/ot] má nejnižší hodnotu při vrtání do Vzorku A s řezným nástrojem z SK. Naopak nejvyšší řezné síly bylo dosaženo při vrtání do Vzorku B s nástrojem z HSS.

5. DISKUZE

Hlavním cílem této práce bylo zjištění opotřebenění řezného nástroje, delaminace, řezné síly a tvorby třísky při vrtání do kompozitního materiálu vyztuženého skelnými vlákny.

Pro dosažení výsledků v bakalářské práci bylo nutné navrhnout vhodné řezné podmínky a následně metodiku pro měření požadovaných hodnot v rámci plánovaného výzkumu.

Základní informace vztahující se k problematice vrtání do kompozitních materiálů jsou uvedeny v kapitole 2. Tato kapitola obsahuje informace o problematice vrtání do kompozitních materiálů (podkapitola 2.1.) a dále udává informace o volbě řezného nástroje (podkapitola 2.2.), geometrii řezného nástroje (podkapitola 2.3.) a volbě materiálu řezného nástroje (podkapitola 2.4.). Nedílnou součástí kapitoly 2 jsou informace o řezných podmínkách (podkapitola 2.5.) o poruchách vzniklých během vrtání (podkapitola 2.6.) a tvorbě třísky (podkapitola 2.7.).

Dosažení stanoveného cíle práce je věnována celá kapitola 3, která obsahuje veškeré informace o jednotlivých etapách plánovaného experimentu přípravy, popisu řezných podmínek a použitých zařízení pro celkové měření.

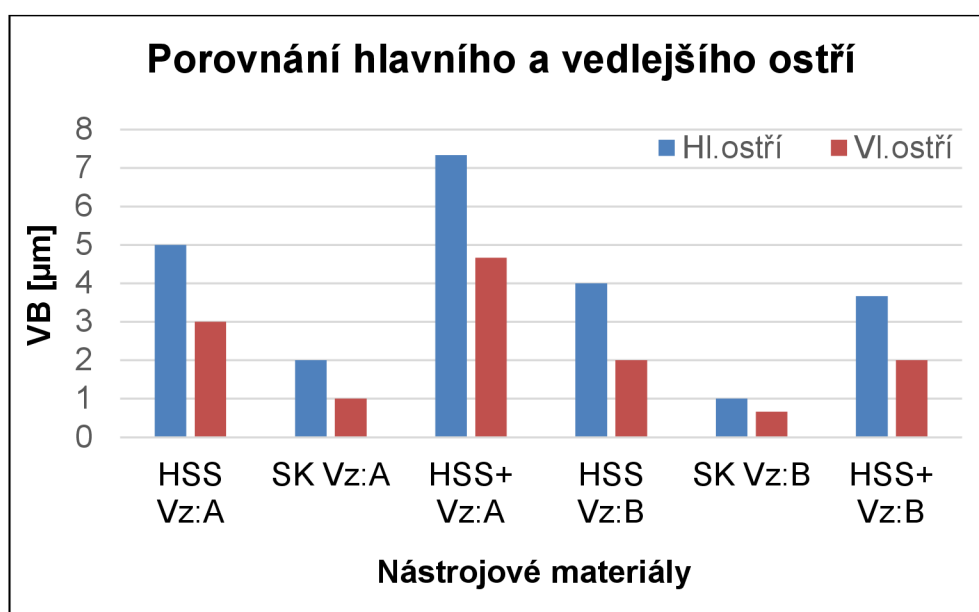
Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků lze poukázat na následující:

- **Opotřebenění VB**

Měření opotřebenění hlavního a vedlejšího ostří bylo provedeno na 3D laserovém bezkontaktním profiloměru Keyence VK-X3000 (Obr. 14), kapitola 3.5, a na dílenském mikroskopu ZEISS (Obr 15), kapitola 3.6. Opotřebenění bylo měřeno na každém nástrojovém materiálu po 45ti otvorech a naměřené hodnoty byly následně zpracovány v softwaru Excel do tabulek a grafů (kap. 3.9.).

Nejnižší naměřené hodnoty opotřebení hlavního a vedlejšího ostří byly u řezného nástroje z SK při vrtání do Vzorku B. Hodnota opotřebení hlavního ostří činila $1 \pm 3,04 \mu\text{m}$ a vedlejšího ostří $0,66 \pm 1,76 \mu\text{m}$. Při vrtání do Vzorku A byla hodnota nejnižšího opotřebení hlavního ostří $2 \pm 1,76 \mu\text{m}$ a vedlejšího ostří $1 \pm 3,04 \mu\text{m}$ u nástroje z SK.

Nevyšší hodnoty opotřebení hlavního a vedlejšího ostří dosáhl řezný nástroj z HSS+ při vrtání do Vzorku A. Hodnota u hlavního ostří byla $7,33 \pm 3,5 \mu\text{m}$ a vedlejšího ostří $4,67 \pm 1,76 \mu\text{m}$. Nejvyšší hodnota při vrtání do Vzorku B byla také u nástroje z HSS+. Hodnota pro hlavní ostří činila $4,67 \pm 1,76 \mu\text{m}$ a vedlejšího ostří $2 \pm 3,04 \mu\text{m}$.



Graf 14 Porovnání hlavního a vedlejšího ostří

- **Delaminace**

Pro každý řezný nástroj bylo vrtáno 45 otvorů do každého vzorku. Následně byl každý otvor při vstupu a výstupu proměřen na 3D laserovém bezkontaktním profiloměru Keyence VK-X3000 (Obr. 14), kapitola 3.5.

Nejnižší delaminace vznikla při vrtání do Vzorku A s řezným nástrojem z SK. Hodnota naměřené delaminace byla $4,87 \pm 0,159 \text{ mm}$ (Obr. 24). Při vrtání do Vzorku B bylo dosaženo čistého řezu s nepatrně odloupenou vrchní vrstvou (Obr. 25).

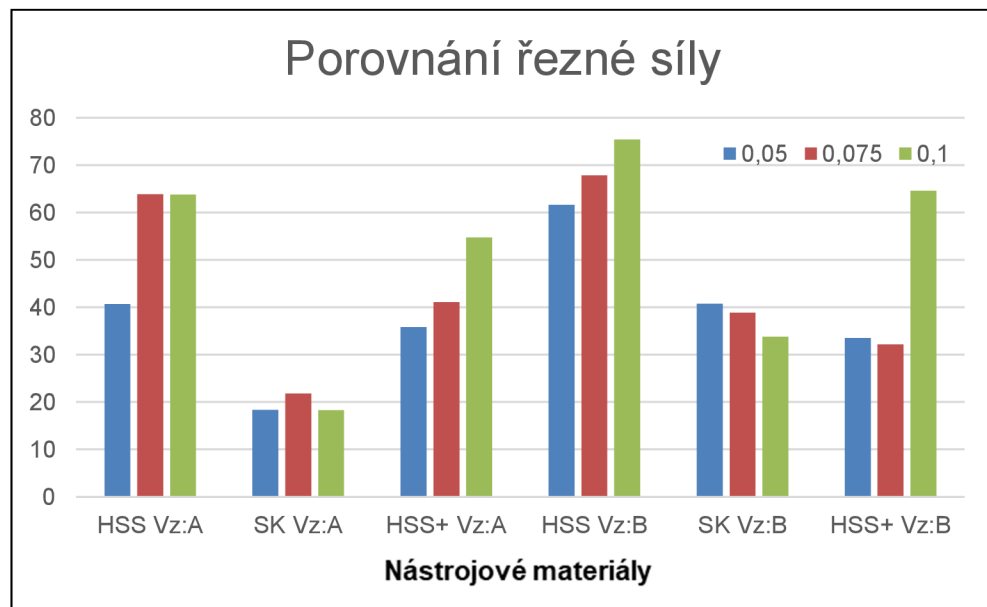
Nejvyšší delaminace byla naměřena u Vzorku A při použití nástroje z HSS - TiAlN. Vlákna nebyla řezaná, ale ohýbaná nebo vyrvaná. Hodnota delaminace $4,52 \pm 0,788$ mm.

- **Řezná síla**

Řezná síla byla měřena piezoelektrickým dynamometrem KISTLER (Obr. 16). Princip měření a zpracování dat viz kapitola 3.11. Naměřené hodnoty v softwaru LabVIEW 6.1, byly následně vyhodnoceny v softwaru Excel.

Nejmenší řezné síly při vrtání za konstantních řezných podmínek byly naměřeny pro Vzorek A téměř pro všechny posuvy u řezného nástroje z SK. Hodnoty sil se pohybovaly v rozmezí 18–38,9N. Výjimka nastala pouze u Vzorku B, kdy řezným nástrojem z HSS - TiAlN při posuvu 0,05 mm/ot byla hodnota 33,52 N a při posuvu 0,075 ot/mm, jehož hodnota byla 32,16 N.

Největší řezné síly při vrtání za konstantních řezných podmínek byly naměřeny téměř u obou vzorků z řezného nástroje z HSS při posuvu 0,1 mm/ot. Hodnoty řezných sil se pohybovaly 40,69 – 75,45 N.



Graf 15 Porovnání řezné síly u všech grafů

6. ZÁVĚR

Předkládaná bakalářská práce na téma Problematika vrtání kompozitních systémů na bázi epoxidové pryskyřice a skelných vláken s ohledem na tvorbu třísky, přispívá k rozšíření poznatků o obrábění těchto materiálů se specifickými vlastnostmi.

Hlavním problémem při obrábění GFRP desek je delaminace vrstev (v rámci ořezů) a trvalé poškození nástroje vlivem nevhodného výběru materiálu. Tato bakalářská práce zkoumala vliv opotřebení vybraných vrtáků (vrták HSS, SK, HSS-TiAlN), delaminaci a řeznou sílu pro vrtání GFRP desek s tkaninou keprové vazby v závislosti na tvorbu třísky.

Práce byla členěná do 6ti kapitol. První kapitola je úvod. Druhá seznamovala se současným stavem poznání do problematiky. Třetí kapitola měla za cíl seznámit s metodickými prvky bakalářské práce, bez kterých by nebylo možné realizovat plánované experimenty. Čtvrtá kapitola popisuje výsledky experimentu. Pátá a šestá kapitola prezentuje výsledky. Získané údaje a poznatky byly vyvozeny v závěrečné části.

Jednalo se o:

1. Nejnižší hodnoty opotřebení hlavního a vedlejšího ostří bylo dosaženo při vrtání do Vzorku A s nástrojem z SK. Hodnota opotřebení na hlavním ostří dosáhla $2 \pm 1,76 \mu\text{m}$ a na vedlejším ostří $1 \pm 3,04 \mu\text{m}$. Pro porovnání se Vzorkem B kde nejlepších výsledků dosáhl stejný nástroj opotřebení hlavního ostří $1 \pm 3,04 \mu\text{m}$ a vedlejšího ostří $1 \pm 1,76 \mu\text{m}$.
2. Nejvyšší hodnota opotřebení na hlavním ostří činila $7,33 \pm 3,5 \mu\text{m}$ a na vedlejším ostří $4,67 \pm 1,76 \mu\text{m}$, při vrtání do Vzorku A s nástrojem z HSS – TiAlN.
3. Nejhorší delaminace nastala při obrábění Vzorku A s nástrojem z HSS – TiAlN, kde byla zaznamenána hodnota $4,52 \pm 0,788 \text{ mm}$.
4. Při procesu vrtání do obou vzorků byla vytvořena dlouhá vinutá tříška, která přecházela na drobnou (jemný prášek). Při vrtání do Vzorku A bylo zjištěno, že vlákna mají sklon 45° u řezných nástrojů z HSS a SK (Obr. 28). U nástroje z HSS + bylo dosaženo, že vlákna byla ohnutá, což vede k nárůstu delaminace.

5. Nejnižších hodnot řezné síly bylo dosaženo nástrojem z SK u Vzorku A. Síly se pohybovaly v rozmezí 18,27 – 21,8 N. Pro porovnání, nejnižší řezné síly u Vzorku B bylo dosaženo nástrojem z HSS - TiAlN, kde se hodnota pohybovala 31,17 - 33,52 N při posuvech 0,05 a 0,075 mm/ot.

Nejvhodnějším nástrojem při stanovených řezných podmínkách dosáhl řezný nástroj z SK. Dosáhl nejmenšího opotřebení, delaminace a řezné síly při vrtání do Vzorku A. Vlákna nebyla ohýbána či vytrhávána (Obr. 23). Naopak při vrtání za použití řezného nástroje z HSS – TiAlN došlo k největšímu výskytu poruch, jak delaminace tak opotřebení nástroje.

Tab. 13 Porovnání celkových rozdílů při vrtání obou vzorků

Nástroj	Opotřebení hlavního ostří			Opotřebení vedlejšího ostří		
	Vz:A	Vz:B	Koef.	Vz:A	Vz:B	Koef.
HSS	5	4	80%	3	2	67%
SK	2	1	50%	1	0,66	66%
HSS+	7,33	3,67	50%	4,67	2	43%
Nástroj	Řezná síla			Delaminace		
	Vz:A	Vz:B	Koef.	Vz:A	Vz:B	Koef.
HSS	63,78	75,45	118%	4,85	4,98	103%
SK	18,27	33,8	185%	4,87	4,89	100%
HSS+	54,71	64,63	118%	4,52	4,98	110%

V Tab.13 je celkové porovnání vrtání obou vzorků. Ve srovnání je vidět, že opotřebení obou ostří je výrazně větší u vzorku A (Kompozit GFRP). Dále si můžeme povšimnout řezné síly a její nárůst při vrtání do vzorku B (Epoxidová pryskyřice). V poslední části Tab. 13 delaminace ukazuje, až na 10% rozdíl mezi vzorky.

Seznam obrázků

Obr. 1 Různé geometrie vrtáků při vrtání do kompozitních materiálů [4]	11
Obr. 2 Různé geometrie vrtáků při vrtání do kompozitních materiálů [4]	14
Obr. 3 Jádrové vrtáky [4].....	14
Obr. 4 Delaminace při vrtání kompozitů (a) odlupující se delaminace; (b) vytlačující se delaminace.[1].....	18
Obr. 5 Mechanismus růstu delaminace při obrábění abrazivním vodním paprskem [1].....	19
Obr. 6 (a) Tvorba otřepů při vrtání; (b) snímek otřepů z optického mikroskopu. [1].....	19
Obr. 7 Schéma průhybu obrobku při vrtání [1]	20
Obr. 8 Vznik třísky [9].....	20
Obr. 9 Vzorek A	22
Obr. 10 Vzorek B	22
Obr. 11 Řez Vzorkem A - zvětšený výřez přibližně 5mm	23
Obr. 12 Operace zarovnání	24
Obr. 13 Frézka FNG 32	25
Obr. 14 Řezné nástroje.....	25
Obr. 15 Konfokální mikroskop s pracovní stanicí.....	26
Obr. 16 Dílenský mikroskop ZEISS	26
Obr. 17 Dynamometr.	27
Obr. 18 Nábojový zesilovač.	27
Obr. 19 Grafické řešení ze softwaru LabVIEW 6.1.	29
Obr. 20 Opotřebení hlavního ostří řezných nástrojů při vrtání do Vzorku A. ...	31
Obr. 21 Opotřebení vedlejšího ostří řezných nástrojů při vrtání do Vzorku A. ...	32
Obr. 22 Opotřebení hlavního ostří řezných nástrojů při vrtání do Vzorku B. ...	34
Obr. 23 Opotřebení vedlejšího ostří řezných nástrojů při vrtání do Vzorku B. ...	35
Obr. 24 Delaminace při vrtání do Vzorku A.....	37
Obr. 25 Bez delaminace při vrtání do Vzorku B.	39
Obr. 26 Proces tvorby třísky	40
Obr. 27 Tříška při vrtání do Vzorku A	40
Obr. 28 Tříška nástroje HSS, SK, HSS+.....	41
Obr. 29 Tříška při vrtání do Vzorku B.	41

Seznam grafů

Graf 1 Naměřené hodnoty opotřebení na hlavním ostří při vrtání do Vzorku A.	32
Graf 2 Naměřené hodnoty opotřebení na vedlejším ostří při vrtání do Vzorku A.	33
Graf 3 Naměřené hodnoty opotřebení na hlavním ostří při vrtání do Vzorku B.	35
Graf 4 Naměřené hodnoty opotřebení na vedlejším ostří při vrtání do Vzorku B.	36
Graf 5 Naměřené hodnoty delaminace při vrtání do Vzorku A.	38
Graf 6 Naměřené hodnoty delaminace při vrtání do Vzorku B.	39
Graf 7 Naměřené hodnoty řezné síly pro různé posuvy při vrtání do Vzorku A.	42
Graf 8 Naměřené hodnoty řezné síly při vrtání do Vzorku A.	43
Graf 9 Naměřené hodnoty řezné síly pro různé posuvy při vrtání do Vzorku B.	44
Graf 10 Naměřené hodnoty řezné síly Vzorku B.	44
Graf 11 Porovnání řezné síly při posuvu $f = 0,05$ [mm/ot].	45
Graf 12 Porovnání řezné síly při posuvu $f = 0,075$ [mm/ot].	45
Graf 13 Porovnání řezné síly při posuvu $f = 0,1$ [mm/ot].	46
Graf 14 Porovnání hlavního a vedlejšího ostří.	48
Graf 15 Porovnání řezné síly u všech grafů.	49

Seznam tabulek

Tab. 1 Doporučené úhly nástrojů pro obrábění kompozitních materiálů [6]....	16
Tab. 2 Parametry frézky FNG 32	24
Tab. 3 Řezné podmínky pro měření opotřebení a delaminace	28
Tab. 4 Řezné podmínky pro měření řezné síly	28
Tab. 5 Naměřené opotřebení hlavního ostří za konstantních řezných podmínek při vrtání do Vzorku A.....	30
Tab. 6 Naměřené opotřebení vedlejšího ostří za konstantních řezných podmínek při vrtání do Vzorku A.....	31
Tab. 7 Naměřené opotřebení hlavního ostří za konstantních řezných podmínek při vrtání do Vzorku B.....	33
Tab. 8 Naměřené opotřebení vedlejšího ostří za konstantních řezných podmínek do Vzorku B.....	34
Tab. 9 Naměřené hodnoty delaminace při vrtání do Vzorku A.....	36
Tab. 10 Naměřené hodnoty delaminace při vrtání do Vzorku B.....	38
Tab. 11 Naměřené hodnoty řezné síly při vrtání do Vzorku A.....	42
Tab. 12 Naměřené hodnoty řezné síly při vrtání do Vzorku B.....	43
Tab. 13 Porovnání celkových rozdílů při vrtání obou vzorků.....	51

Seznam použité literatury

- [1] JOHN, K. M. a S. THIRUMALAI KUMARAN, 2020. Backup support technique towards damage-free drilling of composite materials: A review. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* [online]. **3**(4), 357–364 [vid. 2023-01-12]. ISSN 2588-8404. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijlmm.2020.06.001
- [2] Anon., [b.r.]. Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů | MM Průmyslové spektrum. www.mmspektrum.com [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [2] KNAP, Artur; DVORÁČKOVÁ, Štěpánka; KNÁPEK, Tomáš. Study of the Machining Process of GFRP Materials by Milling Technology with Coated Tools. *Coatings*, **12**(9), 1354
- [4] RAMPAL, Gaurav KUMAR, Sanjay Mavinkere RANGAPPA, Suchart SIENGCHIN a Sunny ZAFAR, 2022. A review of recent advancements in drilling of fiber-reinforced polymer composites. *Composites Part C: Open Access* [online]. **9**, 100312 [vid. 2023-01-12]. ISSN 2666-6820. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcomc.2022.100312
- [5] MEI-TALK, [b.r.]. *Classification and Selection of Cutting Tool Materials - Heygotools - High Quality Drill Bits Manufacturers and Suppliers in China* [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://heygotools.com/classification-and-selection-of-cutting-tool-materials/>
- [6] SEDLÁČEK, Jan. Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů: Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2010
- [7] BARCLAYKEITH, 2014. Composite Materials and PCD Tooling. *GDP Tooling* [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://gdptooling.com/cutting-composites/>
- [8] Zacharenko, Roman. Výroba otvorů při obrábění kompozitních materiálů. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní.
- [9] *Tvorba a tvarování třísek* [onlibe]. [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_02.pdf

- [10] Anon., 2022. *Drilling Composites – What To Look Out For - Composite Envisions* [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://compositeenvisions.com/document/drilling-composites-what-to-look-out-for/>
- [11] GEIER, Norbert, J. Paulo DAVIM a Tibor SZALAY, 2019. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. **125**, 105552 [vid. 2023-01-12]. ISSN 1359-835X. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compositesa.2019.105552](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105552)
- [12] KHASHABA, U. A., 2022. A novel approach for characterization of delamination and burr areas in drilling FRP composites. *Composite Structures* [online]. **290**, 115534 [vid. 2023-01-12]. ISSN 0263-8223. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compstruct.2022.115534](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115534)
- [13] NEJMAN, Dominik. Studie vhodných řezných nástrojů pro vrtání do kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní
- [14] Anon., [b.r.]. Composites | School of Materials Science and Engineering - UNSW Sydney. *UNSW Sites* [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.unsw.edu.au/science/our-schools/materials/engage-with-us/high-school-students-and-teachers/online-tutorials/composites>
- [15] JANDERA, Tomáš. Diagnostický systém kompozitních materiálů. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektronická
- [16] Anon., [b.r.]. [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://romeorim.com/what-are-composites/>
- [17] SAYS, Rick Coglianese, 2013. Composite Matrix Materials. *AZoM.com* [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9814>
- [18] Anon., [b.r.]. *Polymer Matrix Composites (introduction) [SubsTech]* [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=polymer_matrix_composites_introduction

- [19] Anon., [b.r.]. *What is Epoxy Resin Used For? | Dalchem* [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://dalchem.com.au/how-to/what-is-epoxy-resin-used-for/>
- [20] Anon., [b.r.]. *Faserverbundwerkstoff* [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/verbundwerkstoffe/11-faserverbundwerkstoff>
- [21] CEVAHIR, Aref, 2017. 5 - Glass fibers. In: M. Özgür SEYDIBEYOĞLU, Amar K. MOHANTY a Manjusri MISRA, ed. *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, s. 99–121. ISBN 9780081018712. [vid. 2023-01-12] Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-101871-2.00005-9
- [22] Anon., [b.r.]. *Materials & Processes: Fibers for composites* [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/the-fiber>
- [23] Anon., [b.r.]. *Materiály pro laminování rotorových listů - ČSVE - Wind power-plants | Wind energy* [online] [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://csve.cz/en/clanky/materialy-pro-laminovani-rotorovych-listu/316>

PŘÍLOHY

Příloha č. 1 – CD

Příloha č. 2 - Teorie kompozitních materiálů