



## **Diplomová práce**

# **Obrábění kompozitních materiálů pro stavebnictví**

*Studijní program:*

N0715A270015 Materiály a technologie

*Autor práce:*

**Bc. Pavel Drda**

*Vedoucí práce:*

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

Liberec 2023



## Zadání diplomové práce

# Obrábění kompozitních materiálů pro stavebnictví

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Bc. Pavel Drda</b>
<i>Osobní číslo:</i>	S20000209
<i>Studijní program:</i>	N0715A270015 Materiály a technologie
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra obrábění a montáže
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

### Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o problematice vrtání do kompozitních materiálů se zaměřením na řezné podmínky, materiál nástroje a geometrii, orientaci vláken a analýzu vlivu opotřebení nástroje a delaminaci.
2. Volba obráběného materiálu (kompozitní tyč), řezných nástrojů (vrtáky) a řezných podmínek bez procesního média.
3. Návrh metodiky experimentů pro vrtání do kompozitních tyčí z hlediska opotřebení použitého nástroje, orientaci vláken obráběného materiálu a vzniklé delaminaci.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje v závislosti na použitém nástroji, na orientaci vláken obráběného materiálu a vzniklé delaminaci.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

*Rozsah grafických prací:*

*Rozsah pracovní zprávy:*

*Forma zpracování práce:*

*Jazyk práce:*

tištěná/elektronická

Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

1. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
2. BILÍK, O. Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění. Ostrava: Vysoká škola báňská TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.
4. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
5. Firemní podklady k nástrojům a obráběnému materiálu.

*Vedoucí práce:*

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

*Datum zadání práce:*

2. října 2022

*Předpokládaný termín odevzdání:* 2. dubna 2024

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

L.S.

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

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou 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.

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. za vstřícnost, trpělivost, cenné připomínky a odborné rady při vypracování této práce.

Dále pak:

- Ing. Pavel Kejzlarovi, Ph.D. za pomoc při EDS měření vzorků
- Bc. Martinu Váňovi za připomínky a pomoc při realizaci experimentu
- zástupcům firem Orlitech a Jordahl & Pfeifer za poskytnutí vzorků a firemních materiálů
- všem, kteří přede mnou zpracovali související témata ať už knižně, v člancích a jiných pracích – zásadní v seznamu použité literatury a mnozí další jako inspirace
- a nakonec těm co působili jako morální opora a drželi palce

## **ANOTACE:**

Předkládaná diplomová práce poskytuje informace o obrábění kompozitních materiálů určených pro použití ve stavebnictví.

Diplomová práce se zabývá vzájemným vztahem mezi opotřebením nástroje a vzniklou delaminací materiálů s danou orientací vláken na jedné straně a vhodným materiálem nástroje a řeznými podmínkami na druhé straně.

Nezbytné základní pojmy spojené s problematikou obrábění těchto materiálů zvolenou technologií jsou uvedeny v teoretické části včetně informací o volbě nástrojů, řezných podmínek a vzniku delaminace obráběného materiálu a opotřebením nástroje.

Experimentální část obsahuje informace o použitých materiálech, nástrojích, strojích a zařízeních vč. řezných podmínek a metodice měření provádění zvolených experimentů.

Na konci práce v diskuzi a závěru je uvedeno vyhodnocení získaných výsledků.

Klíčová slova: vrtání, kompozitní materiál, řezné podmínky, opotřebením, delaminace.

## **ANNOTATION:**

The presented diploma thesis provides information on the machining of composite materials intended for use in the construction industry.

The diploma thesis deals with the mutual relationship between tool wear and the resulting delamination of materials with a given fiber orientation on the one hand and the appropriate tool material and cutting conditions on the other.

Necessary basic concepts related to the issue of machining these materials with the chosen technology are presented in the theoretical part, including information on the choice of tools, cutting conditions and the occurrence of delamination of the machined material and tool wear.

The experimental part contains information about the materials, tools, machines and devices used, incl. cutting conditions and measurement methodology for performing selected experiments.

At the end of the thesis, in the discussion and conclusion, an evaluation of the obtained results is given.

Key words: drilling, composite material, cutting conditions, wear, delamination.

Katedra obrábění a montáže

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Drda**

Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Ph.D. Štěpánka Dvořáčková

Konzultanti: Ing. Tomáš Knápek  
Bc. Martin Váňa

Počet stran: 76

Počet příloh: 1

Počet tabulek: 31

Počet obrázků: 59

Počet grafů: 20

## Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	11
<b>2. Teoretická část</b> .....	12
2.1. Kompozit .....	12
2.2. Vrtání do kompozitních materiálů.....	13
2.3. Řezné podmínky.....	13
2.4. Materiál nástroje.....	14
2.5. Geometrie nástroje.....	15
2.6. Orientace vláken.....	16
2.7 Delaminace.....	19
2.8 Opotřebení nástroje.....	22
<b>3. Metodika experimentů</b> .....	24
3.1. Obráběný materiál.....	24
3.1.1. Materiálové složení vzorků.....	26
3.2. Řezné nástroje.....	27
3.3. Obráběcí stroj.....	28
3.4. Řezné podmínky.....	28
3.5. Vrtání kompozitního materiálu.....	28
3.5.1. Uchycení a montáž nástroje.....	29
3.5.2. Proces vrtání.....	29
3.6. Použité pomocné strojní a přístrojové vybavení .....	30
3.6.1. Dělení polotovarů.....	30
3.6.2. Zhotovení vzorků.....	30
3.7. Měření opotřebení.....	32
3.8. Měření delaminace.....	33
<b>4. Realizace experimentů</b> .....	37
4.1. Opotřebení nástroje.....	37
4.2. Delaminace vzorků.....	46
4.2.1. Delaminace okrajů otvorů.....	46
4.2.2. Délky volných vláken výztuže.....	56
4.3. Ekonomické hledisko.....	66
<b>5. Diskuze</b> .....	68
<b>6. Závěr</b> .....	72



Seznam použité literatury.....	74
Seznam příloh.....	76

## Seznam použitých zkratk a symbolů

<i>RO</i>	[-]	rychlořezná ocel
<i>SK</i>	[-]	slinutý karbid
<i>F<sub>p</sub></i>	[N]	složka řezné síly
<i>F<sub>f</sub></i>	[N]	složka řezné síly
<i>F<sub>c</sub></i>	[N]	celková řezná síla
EDS	[-]	energo - disperzní spektrometrie
<i>HSS</i>	[-]	high speed steel (rychlořezná ocel)
<i>Co</i>	[-]	kobalt
<i>TiN</i>	[-]	titan-nitrid (povlak)
VHM-N	[-]	tvrdokov
<i>d</i>	[mm]	průměr vrtáku
<i>n</i>	[ot/min]	otáčky
<i>f</i>	[mm]	posuv na otáčku
VB	[μm]	opotřebení
<i>s</i>	[mm]	ujetá dráha nástroje
<i>t</i>	[min]	strojní čas

## 1. Úvod

Kompozitní materiály si v posledních desetiletích nachází rozličné využití s rozvojem znalostí o jejich výrobě, vlastnostech a jako odpověď na specifické požadavky, které tradiční materiály už nejsou schopny splnit.

Hlavní výhodou jsou nízká hmotnost při zachování vysokých pevností. Dále jsou to korozní odolnost, která je předurčuje k použití v exteriérech, izolační schopnosti v oblastech hluku a rázu a mnohé jiné příznivé vlastnosti. Kompozitní materiály již v dnešní době hrají nezastupitelnou roli v tak náročných odvětvích jako je letectví, kosmonautika, vojenská technika vč. výstroje, ale zasahuje i do těch běžných jako např. sportovní potřeby, automobilový průmysl a mnohé další.

Mimo výhod které kompozitní materiály přinášejí, jsou tu ovšem i nevýhody – jednou z nich je problematika obrábění těchto materiálů a to především technologie vrtání a frézování. Cílem výzkumu výrobců řezných nástrojů je určení vhodných řezných podmínek při obrábění a návrh vhodného nástroje z hlediska materiálu a geometrie břitu pro dosažení výsledné jakosti a efektivnosti nasazení.

Diplomová práce se zabývá vzájemným vztahem mezi opotřebením nástroje a vzniklou delaminací materiálů s danou orientací vláken na jedné straně a vhodným materiálem nástroje (vrtáku) a řeznými podmínkami na druhé straně.

Hlavním cílem předkládané práce bylo ověřit tyto vztahy při vrtání kompozitních materiálů zpevněných skelnými a čedičovými vlákny použitého ve stavebním průmyslu.

K dosažení vytyčeného cíle bylo nutné vytvořit kompletní metodiku pro měření opotřebením řezného nástroje a vzniklé delaminaci při obrábění včetně celkového vyhodnocení naměřených výsledků.

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

## 2. Teoretická část

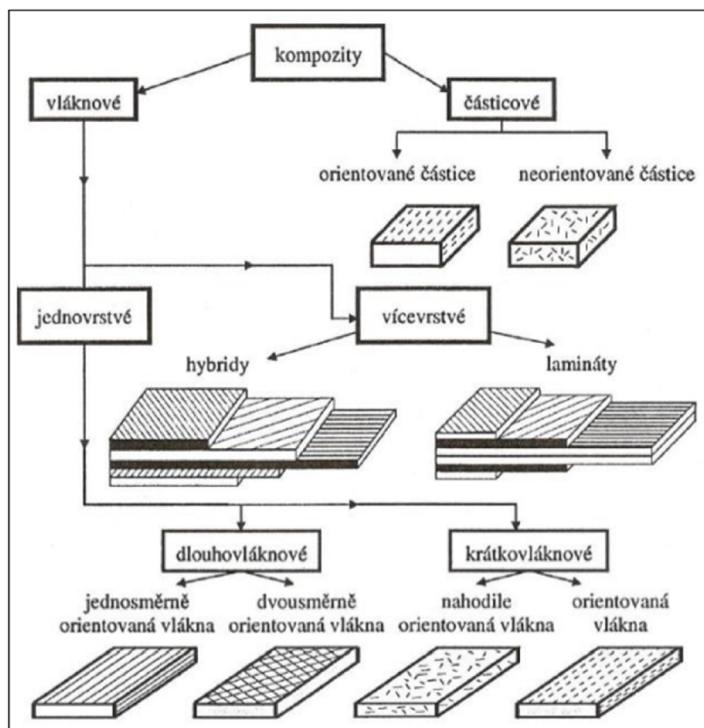
### 2.1. Kompozit

Kompozitem je každý materiál, který se skládá z minimálně dvou hlavních komponent s výrazně se lišícími fyzikálními a materiálovými vlastnostmi, z nichž každá plní jinou specifickou funkci. [1]

Jedná se o dvě složky – pojivo kompozitu tzv. **matrice** a nosná část přenášející zatížení tzv. **výztuž**. Materiálové vlastnosti matrice a výztuže musí být v souladu pro dosažení optimálních vlastností celého kompozitu.

**Matrice** - hlavní úlohou je zajištění celistvosti kompozitního tělesa, tj. dokonalé spojení nosné části a vytvoření vnějšího tvaru, který musí zajistit řádnou funkci tělesa. Materiály matrice mohou být ano- i organické materiály, kovy, keramické materiály, skla aj.

**Výztuž** – hlavní úlohou je přenos zatěžujících sil na kompozitní těleso, je tvořena buď vlákny, nebo částicemi. Materiály výztuže mohou být: vlákna skleněná, uhlíková, aramidová aj., ale také přírodní materiály jako je bavlna, celulóza, či azbest nebo čedič.



Obr. 1 - Rozdělení kompozitních materiálů [15]

## 2.2. Vrtání do kompozitních materiálů

Technologie vrtání pro tak různorodý materiál jakým kompozit je klade zvýšené nároky na správnou geometrii nástroje, na jeho materiál a použité řezné podmínky s případným použitím chladícího a mazného média (i když to jen omezeně).

Běžné konvenční obrábění kovů jako tvárného materiálu má především charakter namáhání stříhem, u kompozitu přistupuje tah / tlak i ohyb a jako zvláštní specifikum samotná struktura kompozitu – vlákna (např. vytáhnutí z matrice) i matrice (např. lom či posuv). [2]

Dalším faktorem je velmi rozmanitá struktura kompozitních materiálů z hlediska pozice a tvaru výztuže a uspořádání celého systému „matrice – výztuž“.

Výsledkem je použití mnohdy speciálních nástrojů a materiálů nebo dosavadní přizpůsobit novým podmínkám pro dosažení vysoké produktivity, požadované kvality obroběných ploch, vysoké přesnosti při obrábění a zamezit rizikům, které při obrábění mohou vzniknout. [6]

Nedílnou součástí je i vliv na životní prostředí a samotnou obsluhu během pracovního procesu obrábění, který klade zvýšené nároky na hygienu pracoviště a náležitou manipulaci s materiálem od samotné výroby polotovarů až po konečnou fázi výroby.

## 2.3. Řezné podmínky

Z hlediska řezných podmínek jsou při vrtání v kompozitech jako problematická tato hlediska:

- teplo při obrábění – podrobněji viz kapitola 2.4

Řešením je využití vhodné kombinace materiál nástroje (viz kapitola 2.4) a řezných podmínek (viz níže)

- řezné podmínky
  - řezná rychlost při obrábění kompozitních materiálů je nižší než u např. oceli – cca o 25 až 30 %.
  - posuv je oproti ocelovým materiálům vyšší – cca o 15 až 20 %.

Důvodem k vyšším hodnotám posuvů a nižším řezným rychlostem je možnost hromadění tepla - tavení matrice a snaha o zamezení vytahování vláknů výztuže. [7]

Řezné podmínky se při vrtání pohybují v širokém rozsahu a jsou závislé zejména na druhu vrtáku. [6]

Hloubka záběru při vrtání do plného materiálu je dána poloměrem nástroje, v případě vrtání do předvrtaných otvorů je určena rozdílem poloměru otvoru před a po obrábění. Jestliže požadujeme otvor s vyšší přesností a jakostí obrobené plochy, je nutno zajistit pro jednotlivé operace dostatečný přídavek na obrábění. [8]

Posuv na otáčku se pohybuje obvykle v rozsahu 0,05 až 1,1 mm/ot. Velikost posuvu závisí zejména na druhu nástroje a obráběném materiálu. [8]

## 2.4. Materiál nástroje

Při návrhu nástroje pro vrtání v kompozitních materiálech je třeba brát v úvahu:

- teplo při obrábění – u obrábění kompozitních materiálů je obtížná realizace odvodu tepla třískou a obrobkem, a tak je především na nástroji aby převzal tuto úlohu - využíváme materiály nepodléhající degradaci svých vlastností při tepelném zatížení.
- trvanlivost bříty – během obrábění dochází ke skokové změně struktury a složení materiálu (matrice a výztuže), které působí spolu s tepelným zatížením vysoce abrazivně na ostří nástroje.

V úvahu připadají tyto materiály:

- rychlořezné oceli (RO) - nejméně vhodné – kombinace vysokých teplot a abraze + nižší tepelná vodivost (cca 3 až 4x oproti SK). Pokud zvolíme RO pak je vhodné použít s povlakem zvyšující otěruvzdornost a tak snižující opotřebení nástroje. [7]
- slinutý karbid (SK) – výrazně vhodnější než RO - s jemnějším zmem karbidů a s nižším podílem pojivy získáme vysokou tvrdost, naopak hrubší zrna a vyšší podíl pojiva zlepšují houževnatost nástroje. I zde je výhodné volit materiál s povlakem (nitridy, oxidy, diamant) [9]
- diamant (polykrystalický) – nejvhodnější varianta - mimořádně otěruvzdorný, malé tepelné ovlivnění, výsledný hladký povrch. Díky výtečným vlastnostem je možné zvýšit řeznou rychlost a tedy i produktivitu cca o 50 až 100 %. [6]

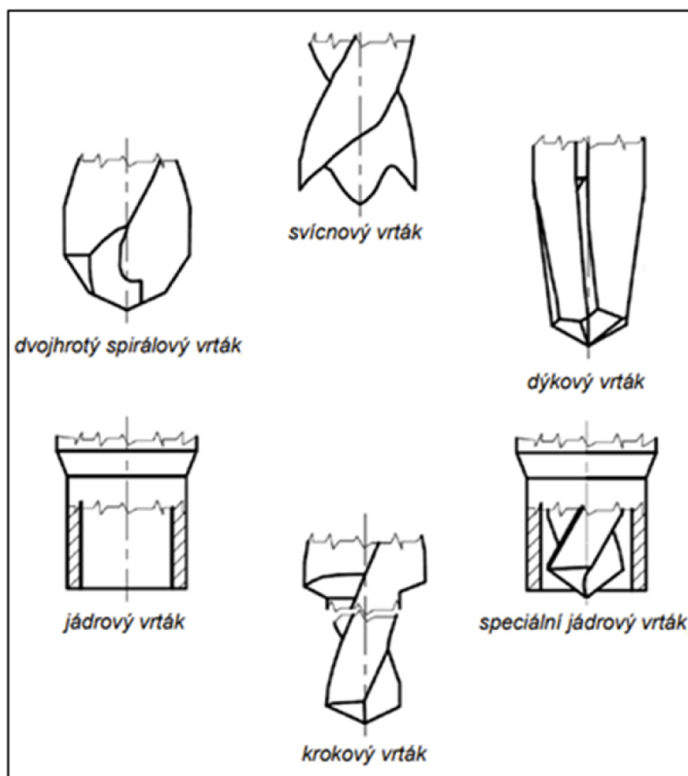
## 2.5. Geometrie nástroje

Geometrie nástroje má pro průběh obrábění a výslednou jakost obrobené plochy zásadní vliv. Použití vrtáků se standardní geometrií není vhodné vzhledem k velikosti jeho příčného ostří. Negativní úhel čela spolu s nízkou řeznou rychlostí způsobuje zvýšený odpor materiálu proti vniknutí nástroje – nástroj před sebou materiál tlačí a neřeže.

V důsledku výše uvedeného dochází ke zvýšené delaminaci (více v kapitole 2.7)

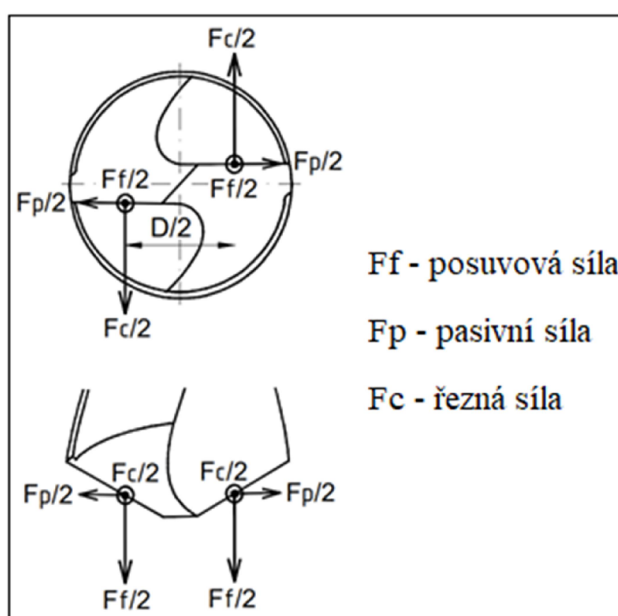
Řešením je použití speciálních vrtáků eliminujících tyto nedostatky za současného zvýšení efektivity a snížení strojních časů.

Příklady vhodných vrtáků pro obrábění kompozitních materiálů:



Obr.2 – Vhodné geometrie vrtáku pro obrábění kompozitních materiálů [5]

Typ	Vlastnosti
Dvojhrotý spirálový	příznivější (nižší) hodnoty působících sil a delaminace otvor tímto nástrojem je vyvrtán ve dvou krocích první řezná hrana otvor předvrtá a druhá dozhotoví otvor "na rozměr" pro vyšší jakost a produktivitu při obrábění bývá povlakován
Svícnový	dosahuje vysoké produktivity práce a nízké delaminace, konstrukce zajišťuje předepnutí vrtané vrstvy s následným odříznutím a vytlačení z místa řezu
Dýkový	jedná se o variantu dvojhrotého vrtáku se čtyřmi dlouhými řeznými hranami výborná kvalita povrchu je vykoupena delším strojním časem daným geometrií tohoto nástroje
Krokový	podobně jako dvojhrotý vrták tak i krokový otvor zhotoví ve dvou krocích tyto vrtáky jsou charakteristické vysokou produktivitou a nízkou delaminací
Jádrové	jedná se o duté brousící vrtáky, které brousí finální rozměry otvoru využívají diamantového abraziva a tím minimalizují velikost delaminace

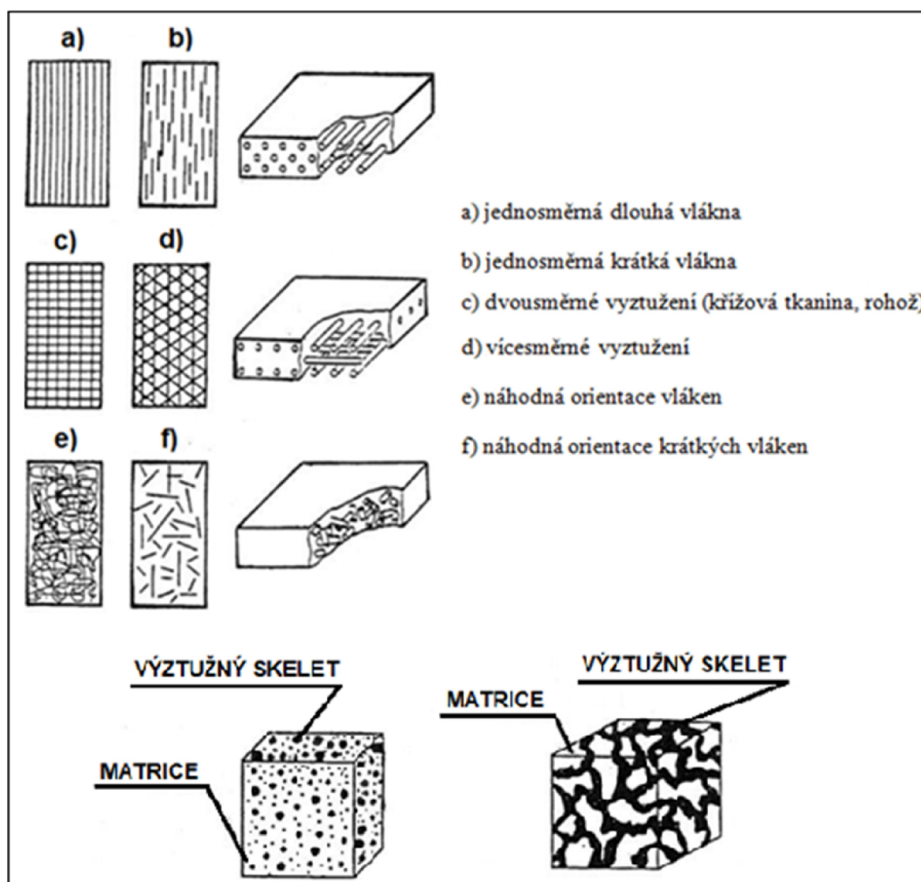


Obr.3 – Síly vznikající při vrtání u šroubového vrtáku [10]

## 2.6. Orientace vláken

Dle geometrického tvaru výztuže (nosné části) dělíme kompozity na vláknové, částicové a skeletové.



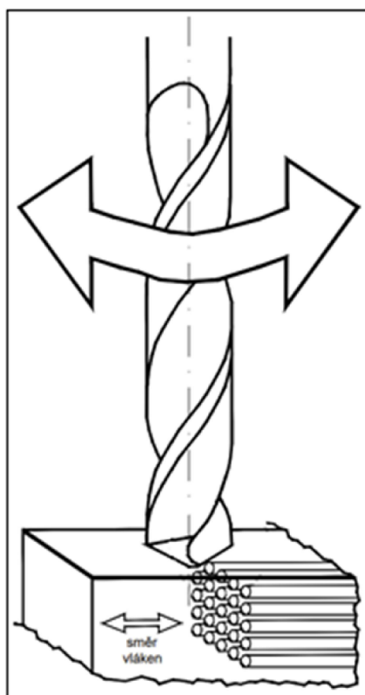


Obr. 4 – Typy vláknových vyztuží, částicový a skeletový kompozitní materiál [15]

U částicových kompozitních materiálů jsou vyztužující částice dispergovány v matrici.

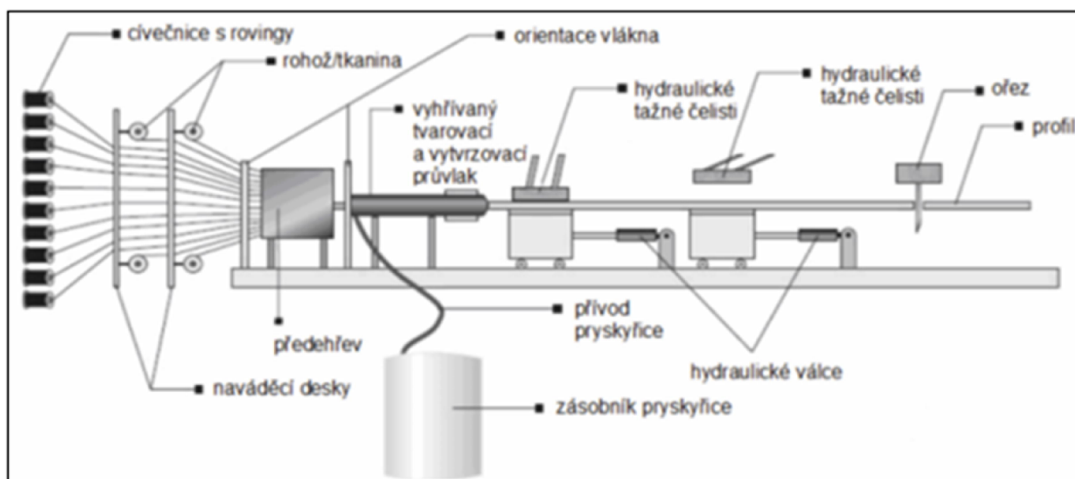
Skeletový kompozitní materiál je tvořen pórovitou matricí prostoupenou souvislým nosným skeletem. [15]

Pro obrábění kompozitních materiálů je dále důležitá orientace vláken a jejich poloha vůči nástroji. Pro redukci vytahování vláken vyztuže z matrice a omezení delaminace okolí obráběné plochy je mimo vhodných řezných podmínek i nutné správné orientace nástrojů a směru vláken vyztuže v kompozitním materiálu.



Obr.5 – Osa vrtáku je kolmá vůči směru vláken kompozitního materiálu

Výroba obou zkoumaných vzorků je pomocí pultruze (tažení)



Obr.6 – Linka pro výrobu materiálu pultruzí [14]

Touto technologií lze vyrábět velmi efektivně kontinuálním způsobem různé plné, duté i tvarové profily s vysokým obsahem výztuže (až 80%).

Výztuže, nejčastěji skelné, ale i uhlíkové nebo jiné pramence prochází pryskyřičnou lázní a po prosycení jsou tvarovány do požadovaného průřezu. Zároveň je celý takto vzniklý kompozit vytvrzen v kontinuální vytvrzovací hlavě.

Jedná se prakticky o kompletní výrobní linku, kde na začátku vstupují do procesu vyztužující vlákna a na konci vystupuje hotový kompozitní profil požadovaného průřezu a délky. [14]

## 2.7 Delaminace

Častý problém při obrábění kompozitních materiálů je delaminace. Nejběžněji se sní lze setkat u vrtání nebo frézování vrstvených kompozitů. Delaminace se objevuje jak na vstupu tak i výstupu nástroje do a z materiálu.

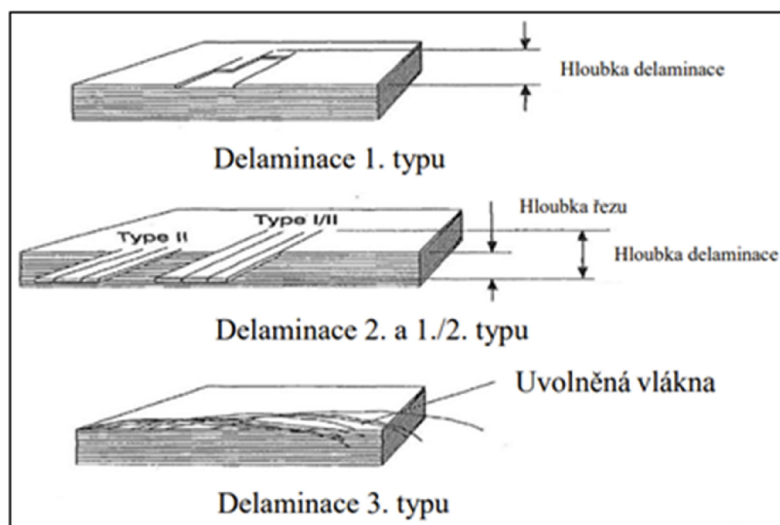
Tyto vady jsou nejčastěji způsobeny nedostatečnou kvalitou ostří, případně mohou být způsobeny špatně zvolenými reznými podmínkami. Delaminace se vyznačuje odlupováním jednotlivých vrstev kompozitu. [11]

Odlupování se v kompozitním materiálu tvoří několika různými mechanismy a dle nich se dělí do 3 základních typů. (Obr.7)

Delaminace prvního typu – při něm se jednotlivé vrstvy materiálu odlamují až za hranici obrobeného materiálu a značně zhoršují kvalitu povrchu. Odstranit tuto vadu lze pouze opětovným obrobením povrchu.

Delaminace druhého typu – průvodním jevem jsou volně trčící částmi vrstvy ven z materiálu. Tuto vadu má lze lehce odstranit bez nutnosti opětovného obrábění a nijak nepoškozuje obrobený povrch.

Delaminace třetího typu – průvodním jevem jsou uvolněná vlákna a je obdobou delaminace druhého typu kdy vlákna materiálu přesahují do volného prostoru. Vzniká v důsledku nedostatečné řezivosti nástroje – vlákno výztuže není odříznuto ale vytaženo z materiálu. [17]

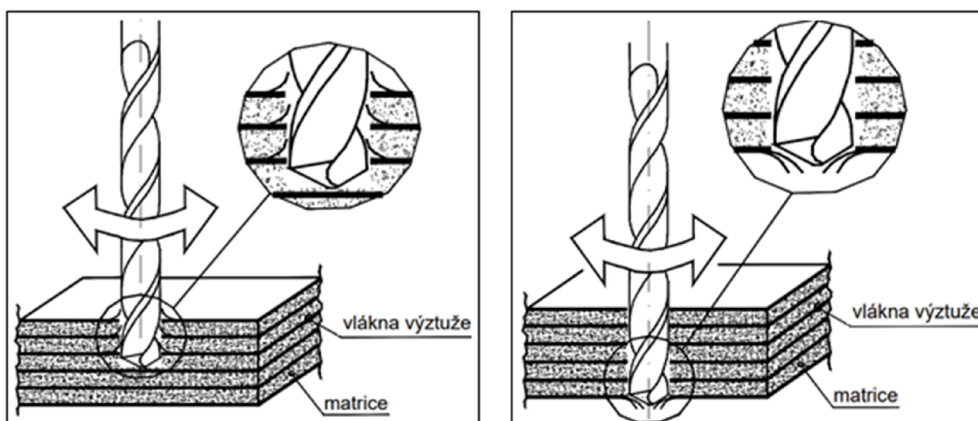


Obr.7 – Typy delaminace [17]

Delaminace se odehrává v těchto fázích:

1. Nástroj vniká do materiálu příčným ostřím, drtí matrici a ohýbá vlákna směrem do materiálu. V momentě počátku řezu se neodříznutá vlákna výztuže snaží vrátit do původní polohy z výroby a vyhnou se zpět. (Obr.8)

2. Nástroj prostoupí materiálem a příčné ostří tlačí na povrch a prohýbá vnější vrstvu, pronikne ven a neodříznutá vlákna výztuže se ohýbají ve směru posuvu nástroje. (Obr.9)



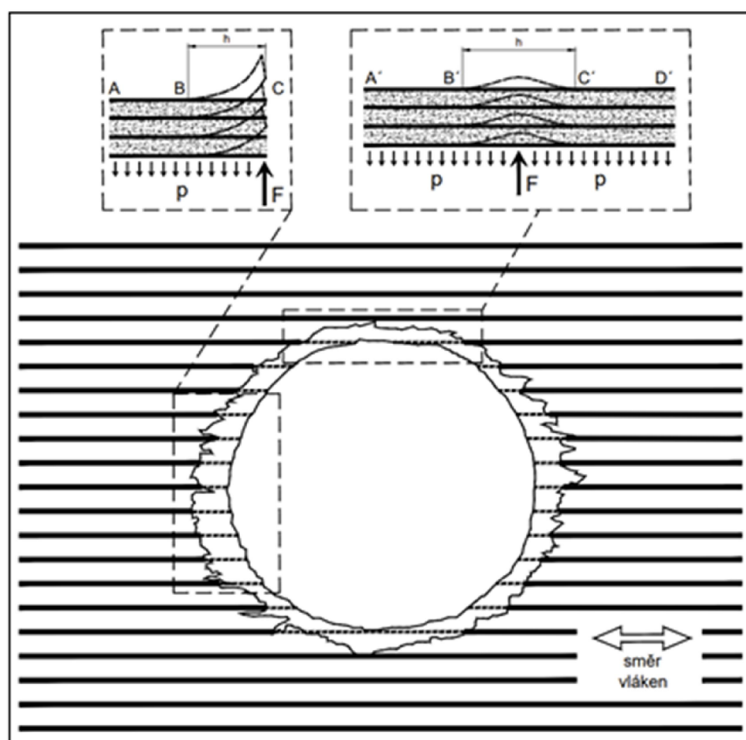
Obr.8 + 9 – Postup delaminace při vrtání – pozice vláken [9]

vniknutí vrtáku do kompozitního materiálu (IN) a opuštění vrtáku materiál (OUT)

Příčné ostří řeze materiál obrobku s velkým negativním úhlem a tvoří přes 50 % posuvové síly (tím sehrává klíčovou roli při procesu). [12]

U aplikace vrtání se potvrdil výrazný vliv axiální síly na vznik a rozvoj delaminace v okolí vstupní a výstupní hrany otvoru pro zmenšení tohoto rizika se doporučuje použít nástroj s lomeným ostřím. [13]

Předejít delaminaci (nebo ji alespoň zmírnit) je jedna z základních podmínek úspěšného obrobění kompozitního materiálu.



Obr.10 – Delaminace okraje otvorů při vrtání [9]

„řezná“ oblast – ve směru vláken a „tlačná“ oblast – kolmo na směr vláken

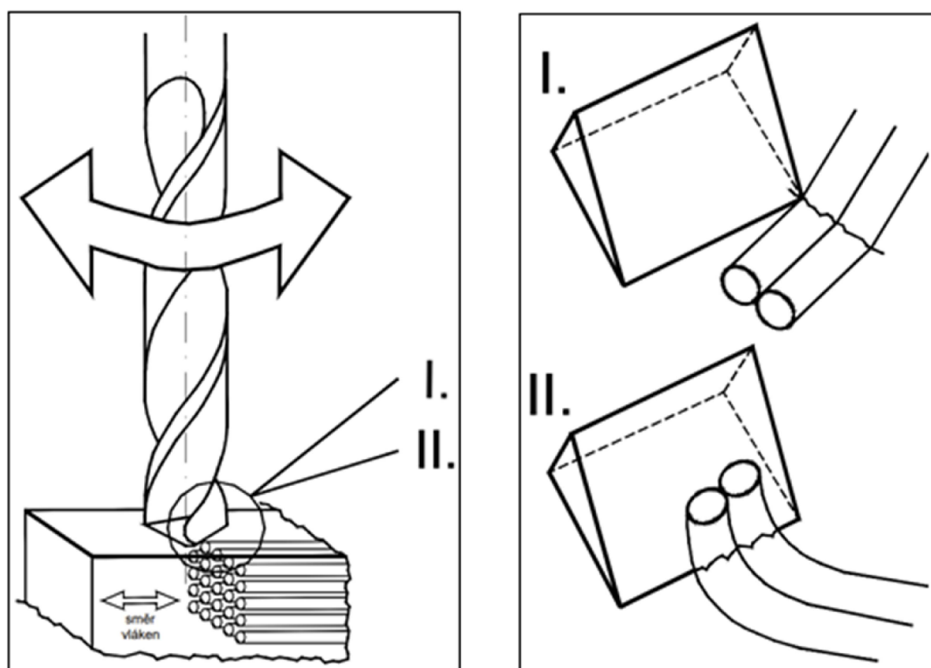
Z delaminace okrajů otvorů jsou patrné oblasti s vyšší mírou poškození horní vrstvy vlivem jednostrannou orientací vláken výztuže.

V „čele“ z pohledu směru vláken dochází k axiálnímu tření a odlupování vláken od bodu C směrem k B a dochází k ohybové deformaci. Na „boku“ z pohledu směru vláken nedochází k odlupování a pouze je vrstva tlačena. Délka odlupu vrstev resp. otláčení je značena „h“ - vzdálenost mezi body BC resp. B'C'. [9]

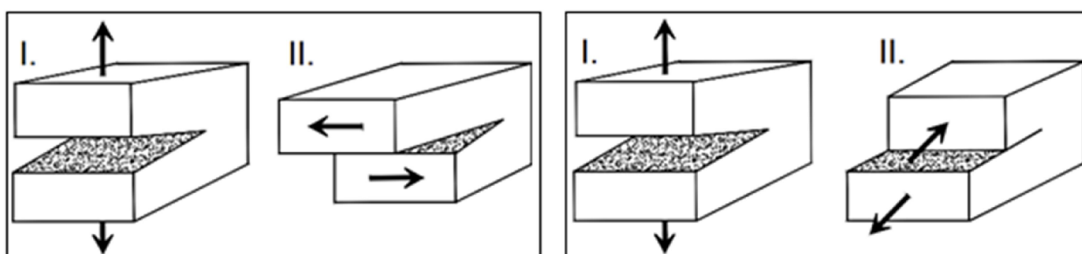
## 2.8 Opotřebení nástroje

V důsledku vnikání řezného nástroje do obrobku a v následném mechanickém, tepelném a chemickém namáhání vzniká na nástroji opotřebení snižující trvanlivost nástroje, zhoršující parametry výsledného produktu a prodlužují výrobní čas.

V případě našeho experimentu se jedná především o abrazivní opotřebení (I.) v důsledku skokových změn v tvrdosti obráběného materiálu. Měkká složka - matrice (pryskyřice) je střídána tvrdou složkou - výztuží (skelné / čedičové vlákno). Dalším mechanismem opotřebení je otěr (II.) neodříznutých vláken výztuže, které se snaží zůstat v původním směru daném výrobou a odírají nástroj. (Obr.11 + 12)

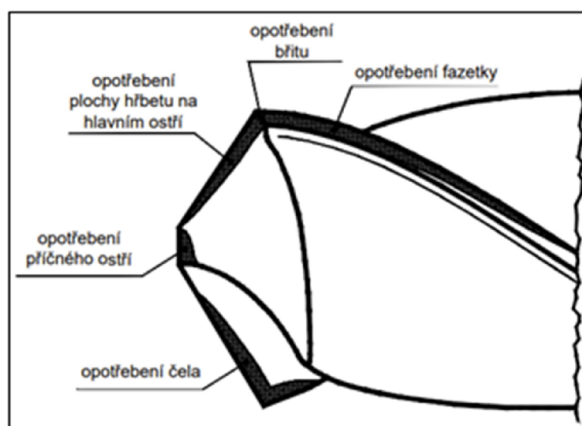


Obr.11 + 12 – Druhy opotřebení při vrtání – abraze a otěr [9]



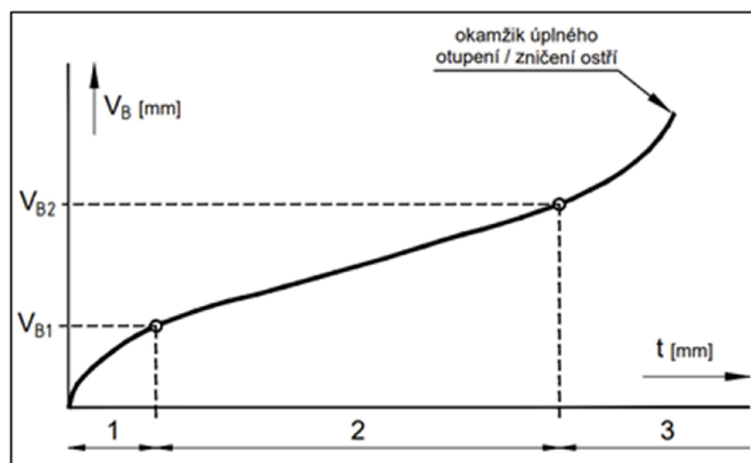
Obr.13 + 14 – Druhy opotřebení při vrtání – abraze (I.) a otěr (II.) [9]

## Opotřebení vrtáku



Obr.15 – Opotřebení na šroubovém vrtáku [16]

## Časový průběh opotřebení nástroje



Obr.16 – Závislost opotřebení na čase [2]

1. oblast zrychleného záběhového opotřebení – je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích mikronerovností povrchu hřbetu a určitou defektností povrchové vrstvy
2. oblast lineárního opotřebení – intenzita opotřebení je konstantní
3. oblast zrychleného nadměrného opotřebení – dosažení limitní teploty řezání a výrazného poklesu tvrdosti rezného materiálu, nastává lavinovité opotřebení [18]

Nadměrné opotřebení vrtáku má za následek zhoršenou kvalitu vyvrtaných děr z hlediska rozměru a povrchu a zvyšuje velikost delaminace.

### 3. Metodika experimentů

Experimentální část je zaměřena na experiment samotný, který zkoumá vliv geometrie řezného nástroje a řezných podmínek na proces vrtání, řezné síly a drsnost obrobených ploch. V této kapitole jsou popsány vzorky, dále nástroje, stroje použité k experimentu a k přípravě vzorků včetně nezbytných pomůcek. V závěru této podkapitoly samotná metodika experimentu.

Experiment a měření probíhala v laboratořích KOM - katedra obrábění a montáže na TUL v Liberci.

Přípravná fáze – dělení tyčových polotovarů na vzorky pro experiment se realizovala v zámečnické dílně fa Průmstav.

#### 3.1. Obráběný materiál

V rámci experimentu byly použity 2 typy materiálu

Prvním s označením „O“ je materiál od firmy ORLITECH, jedná se o kompozitní alternativu ocelové výztuže do betonu s drsným povrchem.

Materiálem matrice je epoxidová pryskyřice, materiál výztuže je čedičové vlákno a povrch pro lepší přilnutí betonové směsi tvoří křemičitý písek



*Obr.17 – Vzorek „O“ firmy ORLITECH*



Tab.1 – Technické parametry kompozitu „O“ [3]

<b>materiál „O“ fa ORLITECH - kompozit s čedičovým vláknem</b>	
vyráběný průměr	4 - 32 mm
pevnost v tahu	1.200 MPa
obsah čedičového vlákna	cca 70 %
modul pružnosti	50 - 55 Mpa
tepelná vodivost	< 0,46 W / m <sup>2</sup>
hustota	2.000 kg / m <sup>3</sup>
elektrická vodivost	nevodivý materiál
požární odolnost	do 150 °C
magnetická charakteristika	nemagnetický materiál

Druhým s označením „JP“ je materiál od firmy Jordahl–Pfeiffer, jedná se o smykový trn s hladkým povrchem

Materiálem matrice je vinylesterová pryskyřice, materiál výztuže je skelné vlákno a povrch v tomto případě je bez úpravy.



Obr.18 – Vzorek „JP“ firmy JORDAHL & PFEIFER

Tab.2 – Technické parametry kompozitu „JP“ [4]

<b>materiál „JP“ fa JORDAHL &amp; PFEIFER - kompozit se skelným vláknem</b>	
vyráběný průměr	25 - 45 mm
obsah skelného vlákna	cca 81 %
pevnost ve smyku	160 MPa
modul pružnosti	50 Mpa
hustota	2.000 kg / m <sup>3</sup>
elektrická vodivost	nevodivý materiál
magnetická charakteristika	nemagnetický materiál

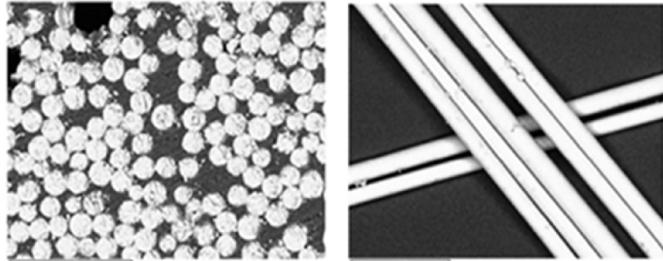
### 3.1.1. Materiálové složení vzorků

Mimo samotné obrábění (vrtání) kompozitů byly vzorky podrobeny zkoumání pomocí EDS pro bližší určení chemického složení použitých materiálů.

Použitým přístrojem je elektronový mikroskop Carl Zeiss ULTRA Plus od firmy OXFORD Instrument.

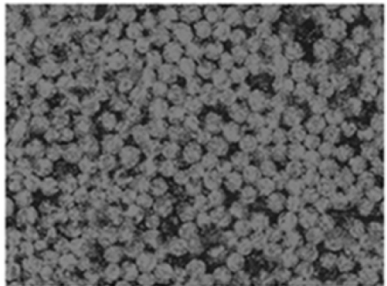
	<b>elektronový mikroskop Carl Zeiss ULTRA Plus</b>	
	rozlišení	1nm při 15 kV; 1,6 nm při 1 kV
	zvětšení	12–1 000 000 x v SE módu
	určeno pro	EDS + WDS + EBSD
<p><i>Obr.19 – Elektronový mikroskop Carl Zeiss ULTRA Plus</i></p>		<p><i>Tab.3 – Technické parametry mikroskopu Carl Zeiss ULTRA Plus</i></p>

#### vzorek „O“ firmy ORLITECH

	<b>prvek</b>	<b>zastoupení [%]</b>
	O	52,9
	Si	17,5
	C	13
	Al	6,7
	Ca	2,9
	Fe	2,6
	Mg	1,9
	Na	1,4
	K	0,7
	Ti	0,3

*Obr.20 – Zobrazení vzorku a vlákna v mikroskopu + zastoupení jednotlivých prvků ve vláknu*

#### vzorek „JP“ firmy JORDAHL & PFEIFER

	<b>prvek</b>	<b>zastoupení [%]</b>
	C	36,8
	O	32,9
	Si	15,7
	Ca	9,1
	Al	4,2
	Na	0,4

*Obr.21 – Zobrazení vzorku v mikroskopu + zastoupení jednotlivých prvků ve vláknu*

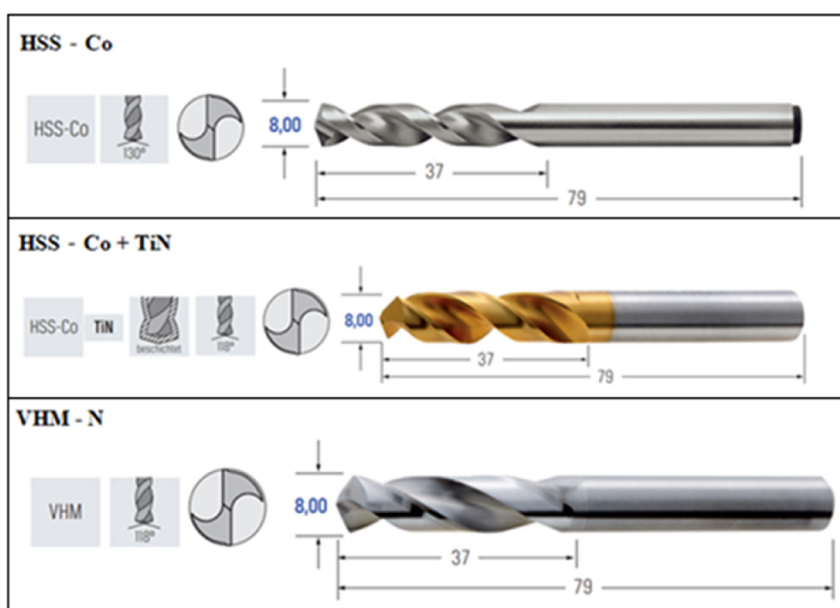
### 3.2. Řezné nástroje

V rámci experimentu byly použity 3 typy nástrojů, jednalo se o:

Tab.4 – Použité vrtáky

Vrták	Označení
rychlořezná ocel	HSS - Co
rychlořezná ocel s povlakem	HSS – Co + TiN
tvrdokov	VHM - N


Všechny nástroje – vrtáky jsou od PRECITOOLu - firmy PREMUS –  $\phi d = 8 \text{ mm}$



Obr.22 – Použité vrtáky

### 3.3. Obráběcí stroj

Obrábění – vrtání otvorů probíhalo na frézce FNG 32 od firmy TOS Olomouc.

	<b>frézka FNG 32</b>	
	výkon motoru - hlavního	4.000 W
výkon motoru - pro posuv	1.100 W	
rozměr stolu	800 × 400 mm	
pracovní zdvih X / Y / Z	600 / 400 / 400 mm	
zatižení stolu	max 350 kg	
upínací drážky	7 drážek tvaru T	
Obr.23 – Nástrojařská frézka FNG 32	Tab.5 – Technické parametry frézky FNG 32	

### 3.4. Řezné podmínky

Řezné podmínky byly zvoleny s ohledem na typy nástrojů a zkoumaný materiál následující:

Tab.6 – Použité řezné podmínky

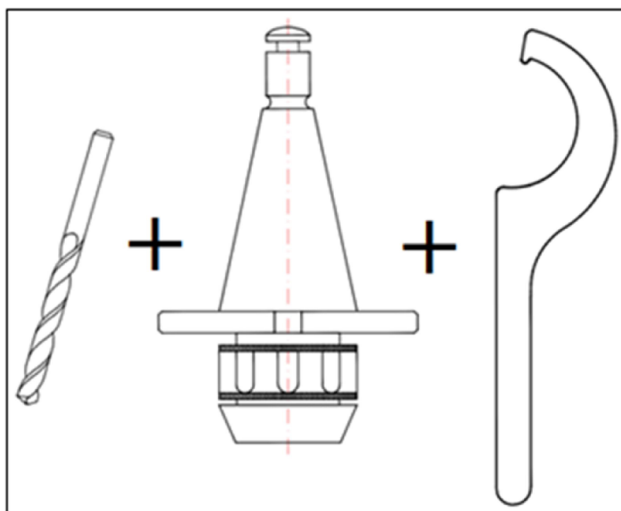
Řezné podmínky	Otáčky - n	Posuv - f
1	250 ot / min	25 mm / min
2	500 ot / min	50 mm / min

Během procesu vrtání nebylo použité žádné procesní medium.

### 3.5. Vrtání kompozitního materiálu

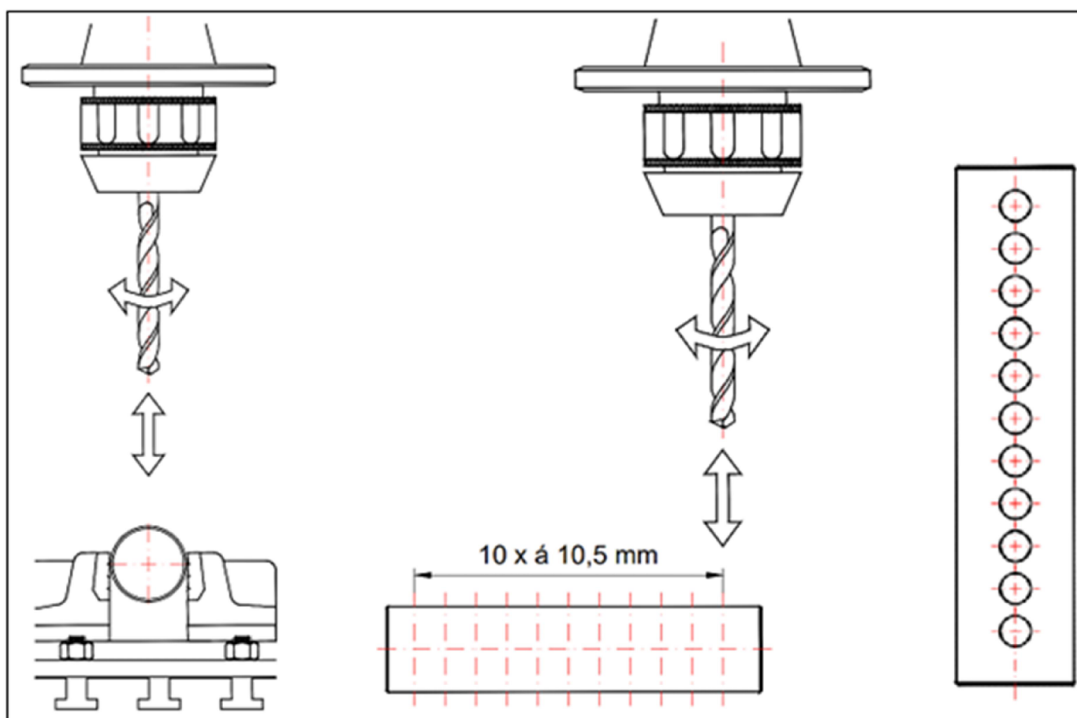
Oba vzorky („O“ i „JP“) byly vrtány za pomoci řezných nástrojů uvedených v kapitole 3.2 a řezných rychlostí v kapitole 3.4.

#### 3.5.1. Uchycení a montáž nástroje



Obr.24 – Nástroj (vrták) + Sklíčidlo s kleštinou + Klíč

### 3.5.2. Proces vrtání




Obr.25 – Vrtání + Rozvržení otvorů ve vzorku + Vzorek po experimentu

### 3.6. Použité pomocné strojní a přístrojové vybavení

#### 3.6.1. Dělení polotovarů

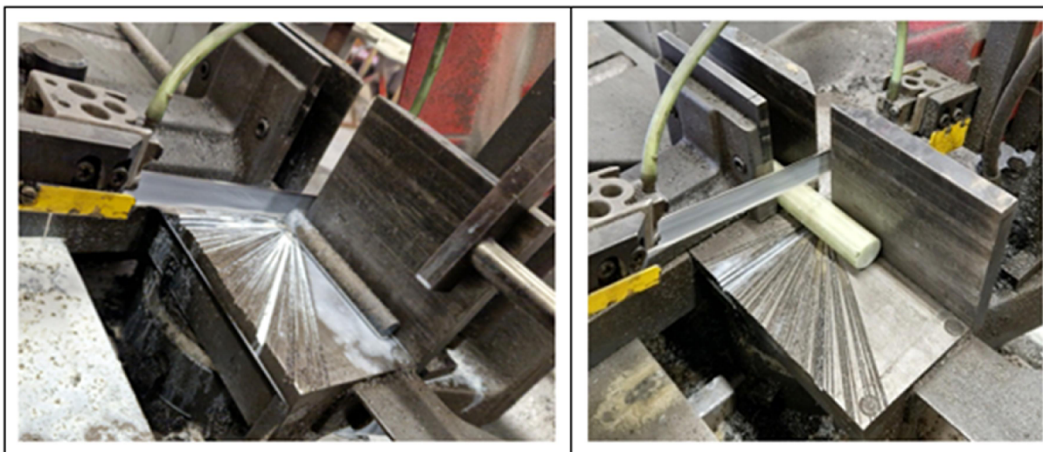
Tyčový materiál byl k vyzvednutí u výrobce v délkách 6 a 12 m – pro dělení na transportní velikost cca 1 m bylo užito ruční úhlové brusky firmy Hilti s řezným kotoučem firmy Würth.

	<b>akumulátorová úhlová bruska AG 125 – A22</b>	
	jmenné napětí	21,6 V
	průměr kotouče	125 mm
	hloubka řezu	až 34 mm
	řezná rychlost nástroje	9.500 ot/ min bez zatižení
	hladina akustického zvuku	83 dB
	rozměry / hmotnost	351 x 93 x 131 mm / 2,7 kg
<p>Obr.26 - Akumulátorová úhlová bruska AG 125 – A22</p>		<p>Tab.7 – Technické parametry brusky AG 125 – A22</p>

	<b>segmentovaný diamantový kotouč 125 x 2,2</b>	
	průměr kotouče	125 mm
	středový otvor	ø 22,2 mm
	výška segmentu	10 mm
	tloušťka segmentu	2,2 mm
	počet segmentů	10 ks
	spojení segmentů	laser
	max. rychlost otáčení	12.250 ot / min
max. obvodová rychlost	80 m / s	
<i>Obr.27 - Segmentovaný diamantový kotouč ø 125 x 2,2 mm</i>		<i>Tab.8 – Technické parametry kotouče 125 x 2,2</i>


### 3.6.2. Zhotovení vzorků


Dělení tyčí cca 1 m tyčí na pro experiment požadovanou délku cca 130 mm pásovou pilou firmy BOMAR s použitím procesní kapaliny.



*Obr. 28 – Řezání vzorku „O“*

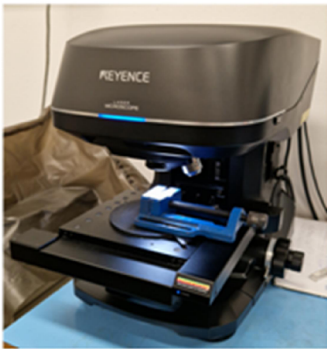
*Obr. 29 – Řezání vzorku „JP“*

	<b>pásová pila Bomar Ergonomic 320.258 DG</b>	
	výkon motoru	1.500 W
	rychlost pásu	20 - 120 m / min
	rozměr pásu	2 910 × 25 (27) × 0,9 mm
	úhlový rozsah stroje	-45° až +60°
	ložná výška materiálu	751 mm
rozměry / hmotnost	1.700 x 1.480 x 2.000 mm / 390 kg	
<i>Obr.30 – Pásová pila Bomar Ergonomic 320.258 DG</i>		<i>Tab.9 – Technické parametry pásové pily Bomar Ergonomic 320.258 DG</i>

	<b>procesní kapalina ECOCOOOL MK3</b>	
	médium pro mísení	H <sub>2</sub> O
	použití pro	ocel, litina, Fe kovy, ne FE kovy
	poměr ředění	2,5 - 10 % dle druhu obrábění
	obsah	5 l
<i>Obr.31 – Procesní kapalina ECOCOOOL MK3</i>	<i>Tab.10 – Technické parametry procesní kapaliny ECOCOOOL MK3</i>	

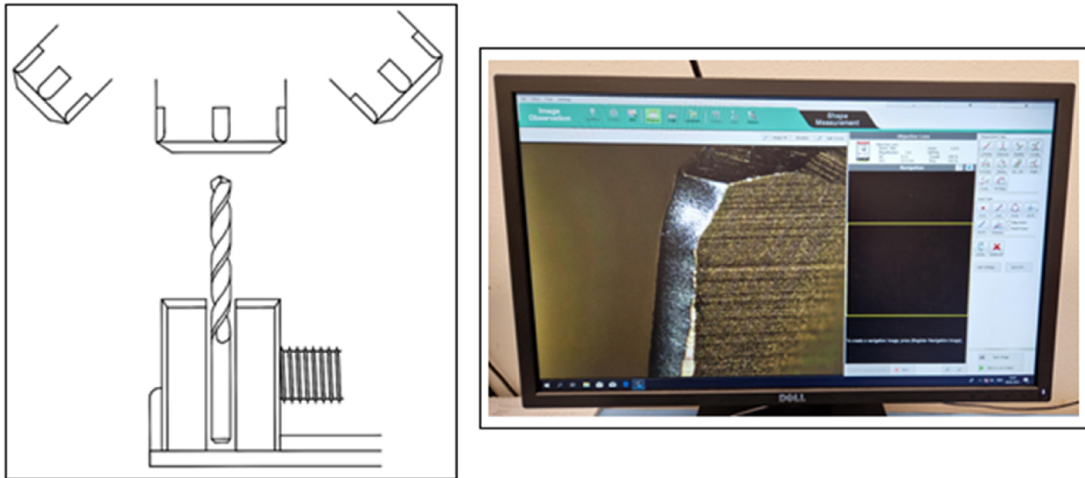
### 3.7. Měření opotřebení

Měření se provádělo na mikroskopu s 3D laserovým skenováním VK-X3000 firmy Keyence v měřicím a vyhodnocovacím softwaru VK Viewer.

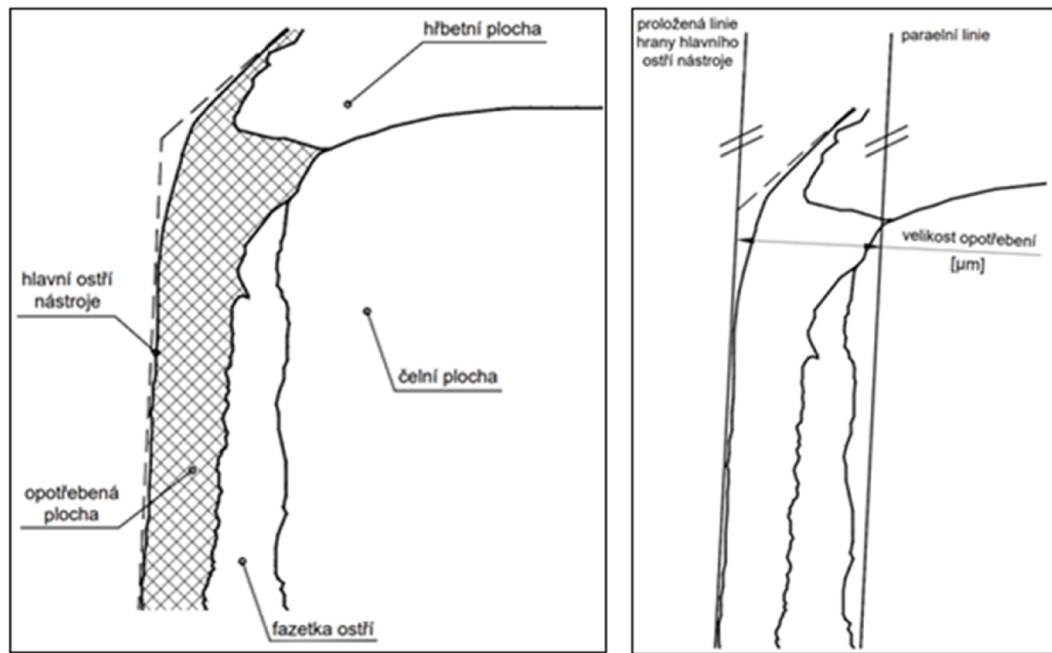
	<b>mikroskop VK-X3000</b>	
	výkon laseru	max 0,9 mW
	zvětšení	42 - 28.800 x
	objektivy	2,5 x / 5 x / 10 x
	rozsah ovládání	100 x 100 mm
	vlnová délka laseru	polovodičový laser - 404 nm
<i>Obr.32 – Mikroskop VK-X3000</i>	<i>Tab.11 – Technické parametry mikroskopu VK-X3000</i>	

Nástroje byly zpočátku experimentu měřeny po každém zhotoveném otvoru, při lineárním nárůstu bylo měření prováděno vždy po několika otvorech až do předem stanoveného opotřebení.

Po zhotovení otvorů byly nástroje umístěny do držáku mikroskopu a hodnoty opotřebení ostří změřeny pomocí vhodných objektivů a proložených linií opotřebení.



Obr.33 + 34 – Měření opotřebení vrtáku na mikroskopu + Vizualizace opotřebení



Obr.35 – Měření opotřebení vrtáku – vizualizace opotřebení + určení velikosti opotřebení

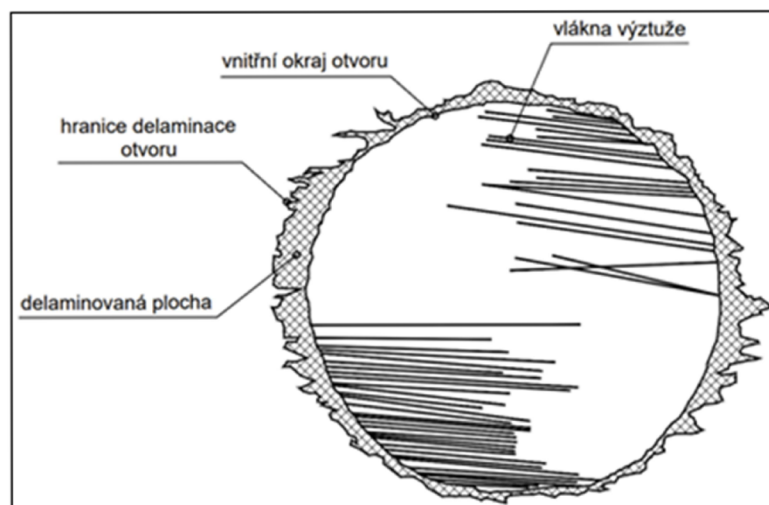
### 3.8. Měření delaminace

Velikost delaminace byla měřena mikroskopem firmy KEYENCE.

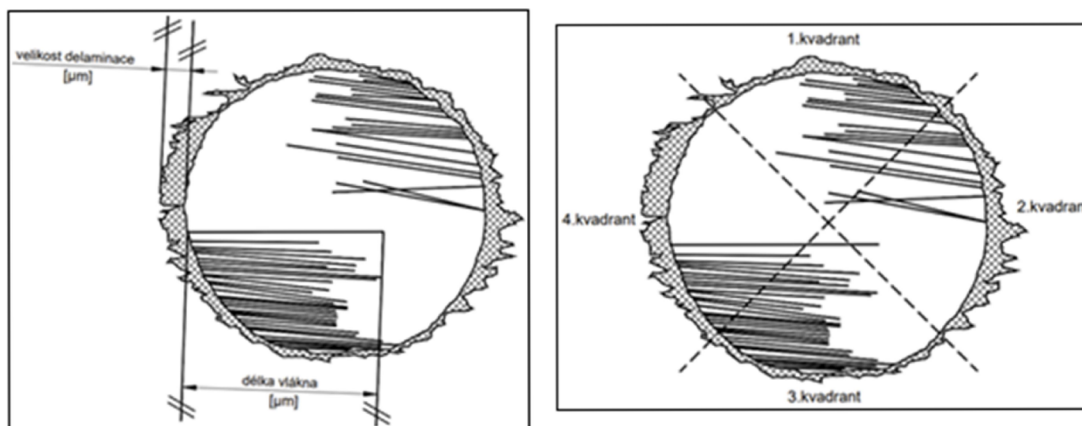
Po zhotovení otvorů byly vzorky umístěny do držáku mikroskopu a hodnoty delaminace změřeny pomocí vhodných objektivů a proložených linií opotřebení. Pro každý materiál vzorku, řezné podmínky a nástroj byl změřen první, poslední a několik otvorů v průběhu a to jak při vstupu nástroje (IN) tak i výstupu nástroje (OUT) z materiálu.



Pokud velikosti delaminace překročily možná pozorovací rozsah byly změřeny posuvným měřítkem.

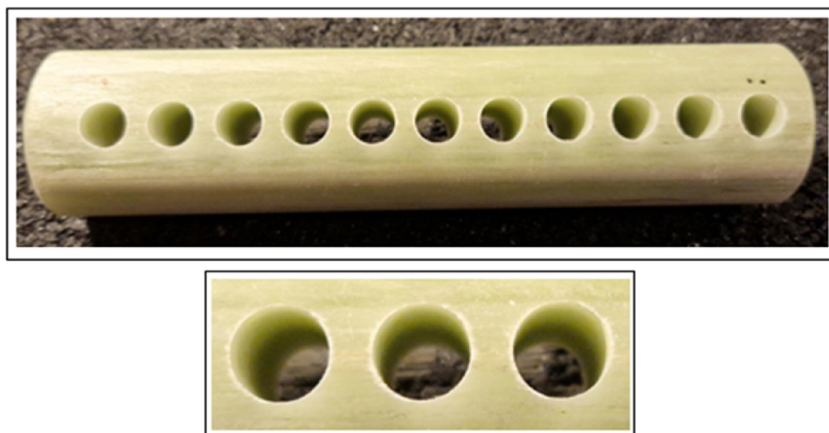


Obr. 36 – Měření delaminace – vizualizace delaminace hrany a vláken

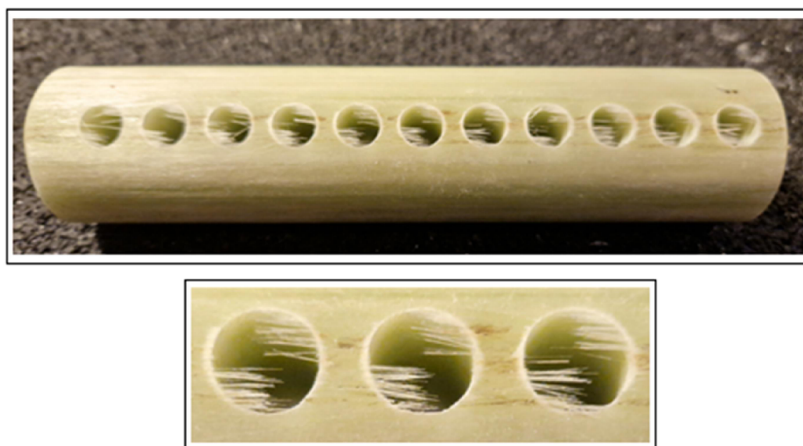


Obr. 37 + 38 – Měření delaminace – určení její velikosti a délek vláken výztuže vytažených z matrice a určení pozice

vzorek „JP“

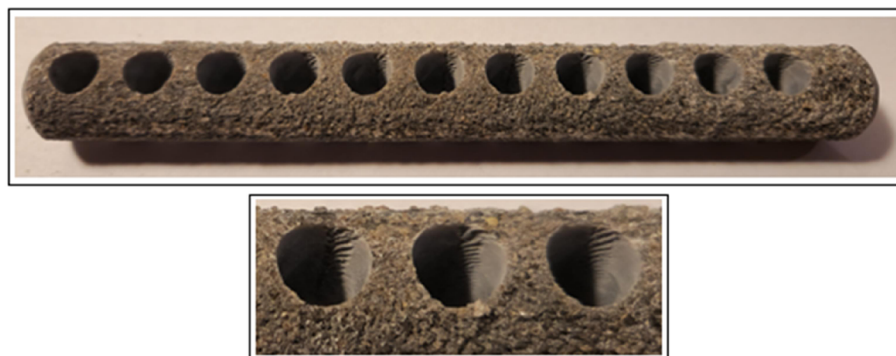


*Obr. 39 + 40 – „vstupní“ vzhled zhotovených otvorů – minimální delaminace \_ a \_ detail*



*Obr. 41 + 42 – „výstupní“ vzhled zhotovených otvorů – výrazná delaminace \_ a \_ detail*

vzorek „O“



*Obr. 43 + 44 – „vstupní“ vzhled zhotovených otvorů – minimální delaminace \_ a \_ detail*



*Obr. 45 + 46 – „výstupní“ vzhled zhotovených otvorů – výraznější delaminace \_ a \_ detail*

## 4. Realizace experimentů

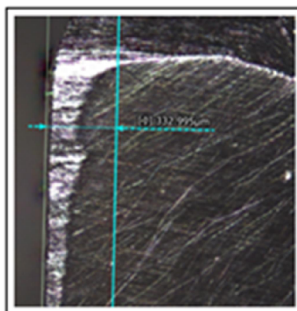
Tato kapitola obsahuje vlastní měření opotřebení, určení ekonomického hlediska a stanovení delaminace vzorků.

Základním kritériem experimentu pro opotřeбенý nástroj byla hodnota  $v_B = 600 \mu\text{m}$  na základě doporučení výrobce nástroje

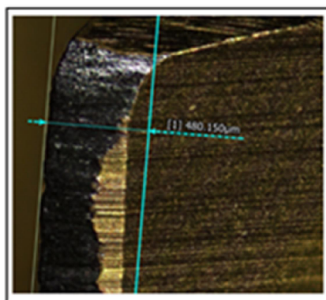
pozn. pro obrábění tvrdokovem (VHM – N) nebyla tato hodnota dosažena ani zdaleka – experiment by byl časově náročný a byl ukončen po dráze nástroje 1,5 m a strojním čase 1 h

### 4.1. Opotřebení nástroje

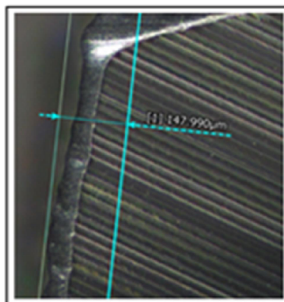
Měření opotřebení nástroje bylo realizováno dle metodiky popsané v kapitole 3.7.



Obr.47 – Opotřebení na vrtácích HSS – Co






Obr.48 – Opotřebení na vrtácích HSS – Co + TiN

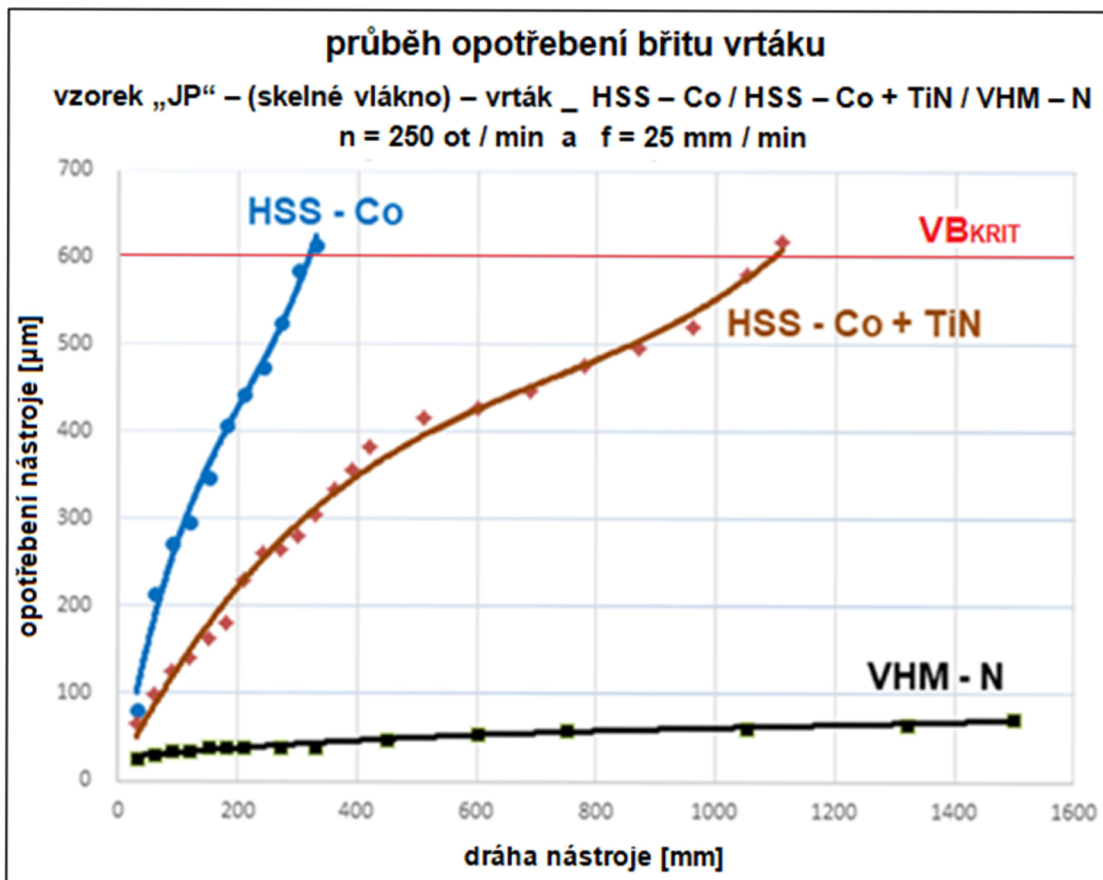


Obr.49 – Opotřebení na vrtácích VHM- N

## Tabulky naměřených hodnot a grafické znázornění

Tab.12 – Opotřebení na vrtácích u vzorku „JP“ při řezných podmínkách „250 / 25“




řezné podmínky - n = 250 ot / min a f = 25 mm / min			
vzorek "JP" - se skelným vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	opotřebení VB [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
30	82 $\pm$ 1,25	65 $\pm$ 1,15	25 $\pm$ 0,91
60	215 $\pm$ 1,28	98 $\pm$ 1,61	30 $\pm$ 1,36
90	272 $\pm$ 1,35	125 $\pm$ 1,74	35 $\pm$ 1,21
120	297 $\pm$ 1,31	141 $\pm$ 1,92	34 $\pm$ 1,67
150	349 $\pm$ 1,68	164 $\pm$ 2,12	38 $\pm$ 2,18
180	407 $\pm$ 1,73	182 $\pm$ 2,04	38 $\pm$ 2,01
210	444 $\pm$ 1,97	230 $\pm$ 2,11	39 $\pm$ 2,37
240	474 $\pm$ 2,02	261 $\pm$ 1,37	-
270	526 $\pm$ 2,21	265 $\pm$ 1,49	38 $\pm$ 1,96
300	586 $\pm$ 1,99	282 $\pm$ 1,91	-
330	614 $\pm$ 2,16	306 $\pm$ 1,97	-
360	-	334 $\pm$ 2,27	-
390	-	356 $\pm$ 1,94	-
420	-	384 $\pm$ 2,34	-
450	-	-	47 $\pm$ 2,73
510	-	416 $\pm$ 1,87	-
600	-	429 $\pm$ 2,91	55 $\pm$ 1,97
690	-	449 $\pm$ 2,44	-
750	-	-	60 $\pm$ 1,73
780	-	476 $\pm$ 2,13	-
870	-	496 $\pm$ 2,16	-
960	-	522 $\pm$ 1,98	-
1050	-	581 $\pm$ 1,68	62 $\pm$ 2,66
1110	-	620 $\pm$ 2,37	-
1320	-	-	65 $\pm$ 2,11
1500	-	-	72 $\pm$ 1,78

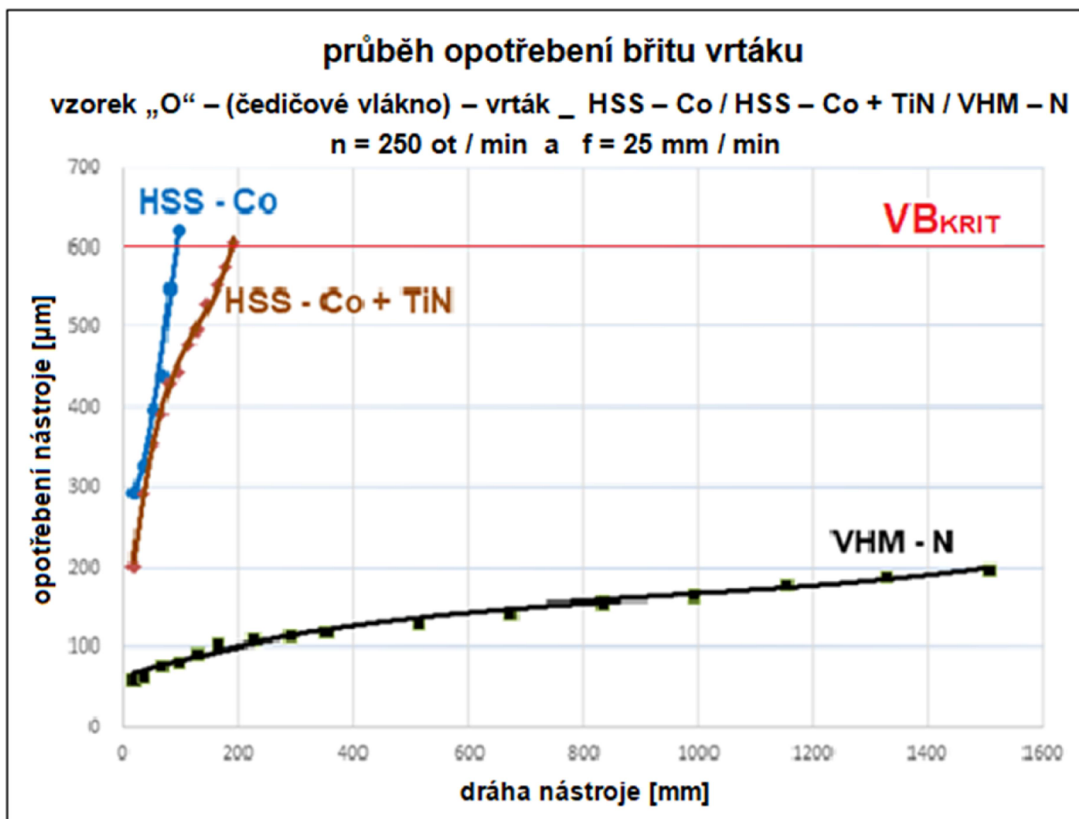


Graf.1 – Opotřebení na vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „JP“ při „250/25“

Graf. 1 znázorňuje za daných řezných podmínek (250/25) a materiálu (pryskyřice se skelným vláknem) výrazně vyšší míru opotřebení vrtáků z HSS oproti tvrdokovu. Pokud bude použit HSS má povlakování (zde TiN) význam – v tomto případě zvětšení trvanlivosti 3-4x oproti nepovlakované HSS.

Tab.13 – Opatření na vrtácích u vzorku „O“ při řezných podmínkách „250 / 25“

řezné podmínky - n = 250 ot / min a f = 25 mm / min			
vzorek "O" - s čedičovým vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	opotřebení VB [μm] ± nejistota U [μm]		
16	295 ± 1,76	202 ± 2,08	60 ± 2,74
32	328 ± 1,47	293 ± 2,52	65 ± 2,37
48	398 ± 2,29	355 ± 1,85	
64	442 ± 2,37	392 ± 1,17	78 ± 1,99
80	550 ± 2,71	431 ± 1,94	
96	622 ± 1,97	445 ± 2,34	82 ± 2,16
112	-	480 ± 2,11	
128	-	496 ± 2,18	93 ± 3,11
144	-	529 ± 2,25	
160	-	553 ± 3,27	104 ± 2,27
176	-	576 ± 2,73	-
192	-	605 ± 2,16	-
224	-	-	110 ± 2,14
288	-	-	115 ± 1,98
352	-	-	120 ± 1,76
512	-	-	131 ± 1,89
672	-	-	144 ± 2,67
832	-	-	156 ± 2,34
992	-	-	166 ± 1,91
1152	-	-	179 ± 1,75
1328	-	-	189 ± 2,37
1504	-	-	197 ± 2,47






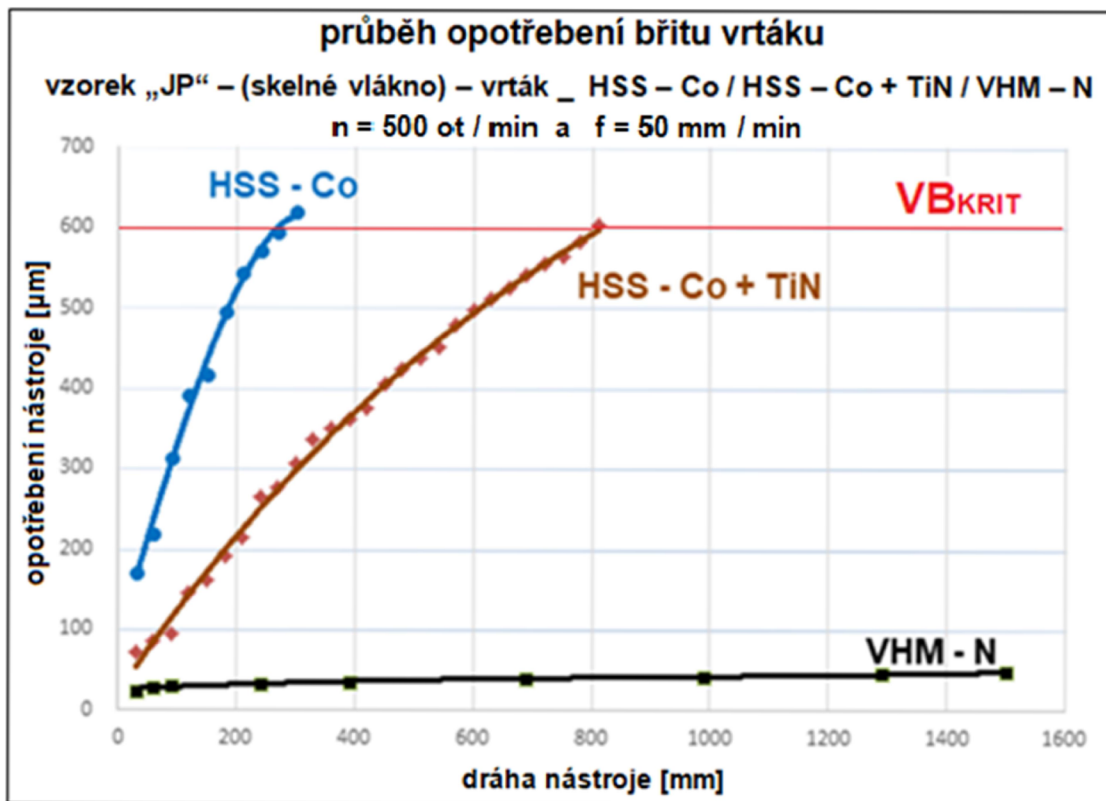
Graf.2 – Opotřebení na vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „O“ při „250/25“

Graf.2 při řezných podmínkách (250/25) a materiálu (pryskyřice s čedičovým vláknem) znázorňuje velkou míru opotřebení vrtáků z HSS oproti tvrdokovu. V tomto případě povlakování nemá tak výrazný účinek na zvýšení trvanlivosti oproti nepovlakované HSS.



Tab.14 – Opotřebení na vrtácích u vzorku „JP“ při řezných podmínkách „500 / 50“




řezné podmínky - n = 500 ot / min a f = 50 mm / min			
vzorek "JP" - se skelným vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	opotřebení VB [μm] ± nejistota U [μm]		
30	171 ± 1,25	71 ± 2,16	24 ± 2,22
60	220 ± 1,25	85 ± 2,37	28 ± 2,37
90	313 ± 1,25	94 ± 1,85	31 ± 1,98
120	392 ± 1,25	145 ± 1,75	-
150	416 ± 1,25	161 ± 1,47	-
180	495 ± 1,25	191 ± 2,25	-
210	543 ± 1,25	215 ± 2,39	-
240	572 ± 1,25	264 ± 3,16	33 ± 2,74
270	594 ± 1,25	276 ± 3,22	-
300	619 ± 1,25	306 ± 1,95	-
330	-	336 ± 1,64	-
360	-	350 ± 2,11	-
390	-	362 ± 2,37	35 ± 3,16
420	-	375 ± 3,24	-
450	-	406 ± 2,75	-
480	-	424 ± 1,95	-
510	-	438 ± 2,27	-
540	-	451 ± 2,34	-
570	-	479 ± 1,97	-
600	-	497 ± 1,87	-
630	-	512 ± 2,29	-
660	-	525 ± 2,74	-
690	-	541 ± 1,98	40 ± 2,44
720	-	556 ± 2,76	-
750	-	565 ± 3,16	-
780	-	582 ± 2,29	-
810	-	603 ± 3,74	-
990	-	-	42 ± 2,37
1290	-	-	46 ± 3,01
1500	-	-	48 ± 2,07

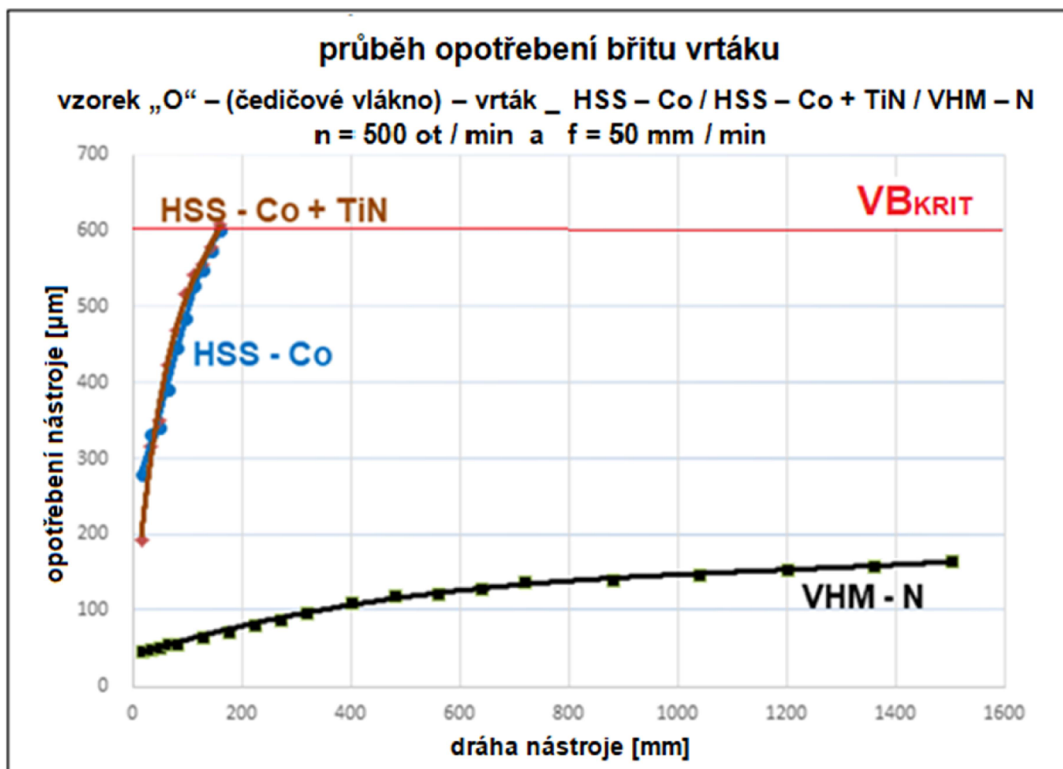


Graf.3 – Opotřebení na vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „JP“ při „500/50“

Graf.3 při řezných podmínkách (500/50) a materiálu (pryskyřice se skelným vláknem) znázorňuje výrazně vyšší míru opotřebení vrtáků z HSS oproti tvrdokovu. Zvýšení hodnot řezných podmínek má minimální vliv na změnu opotřebení nástroje vyjma povlakované HSS kde se trvanlivost snížila cca o 30%.

Tab.15 – Opotřebení na vrtácích u vzorku „O“ při řezných podmínkách „500 / 50“

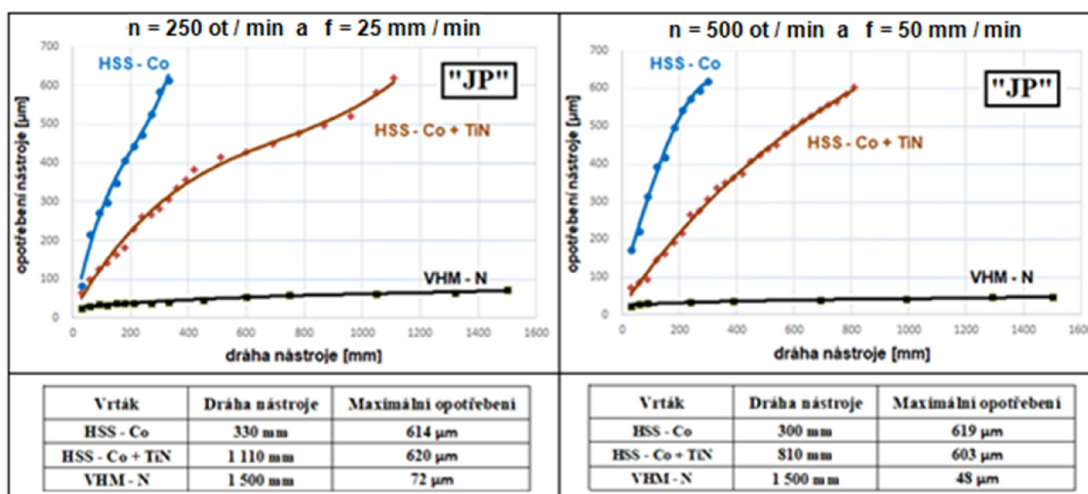
řezné podmínky - n = 500 ot / min a f = 50 mm / min			
vzorek "O" - s čedičovým vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	opotřebení VB [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
16	280 $\pm$ 1,38	192 $\pm$ 2,07	47 $\pm$ 2,16
32	333 $\pm$ 1,97	315 $\pm$ 2,72	49 $\pm$ 2,02
48	342 $\pm$ 2,86	351 $\pm$ 1,97	52 $\pm$ 1,76
64	392 $\pm$ 2,44	424 $\pm$ 3,22	56 $\pm$ 1,44
80	445 $\pm$ 3,18	469 $\pm$ 2,58	57 $\pm$ 1,87
96	485 $\pm$ 2,04	517 $\pm$ 3,07	-
112	528 $\pm$ 2,49	541 $\pm$ 3,87	-
128	549 $\pm$ 1,76	556 $\pm$ 2,47	64 $\pm$ 2,14
144	573 $\pm$ 2,73	579 $\pm$ 1,98	-
160	602 $\pm$ 3,01	608 $\pm$ 2,39	-
176	-	-	73 $\pm$ 2,19
224	-	-	81 $\pm$ 1,67
272	-	-	88 $\pm$ 1,87
320	-	-	98 $\pm$ 2,03
400	-	-	110 $\pm$ 2,86
480	-	-	119 $\pm$ 2,65
560	-	-	122 $\pm$ 1,75
640	-	-	128 $\pm$ 1,93
720	-	-	137 $\pm$ 2,19
880	-	-	141 $\pm$ 1,55
1040	-	-	148 $\pm$ 2,10
1200	-	-	153 $\pm$ 1,37
1360	-	-	158 $\pm$ 2,12
1504	-	-	165 $\pm$ 3,16



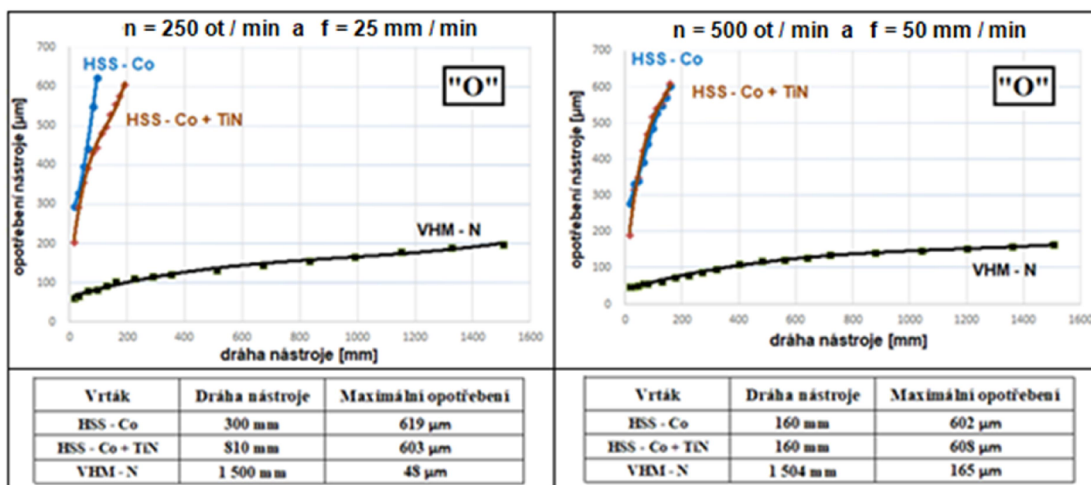
Graf.4 – Opatření na vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „O“ při „500/50“

Graf.4 při řezných podmínkách (500/50) a materiálu (pryskyřice s čedičovým vláknem) znázorňuje velkou míru opotřebení vrtáků z HSS oproti tvrdokovu. Zvýšení hodnot řezných podmínek má minimální vliv na změnu opotřebení nástroje a u HSS je vliv povlakování velmi malý.

Porovnání opotřebení nástrojů:



Obr.50 – Opatření nástrojů při obrábění vzorků „JP“ při „250/25“ a „500/50“



Obr.51 – Opotřebení nástrojů při obrábění vzorků „O“ při „250/25“ a „500/50“

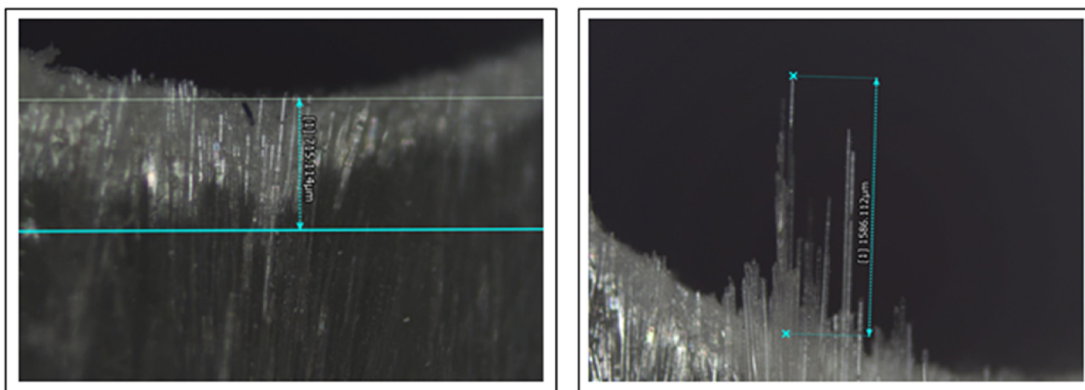
Porovnání materiálů vzorků, vrtáků a řezných podmínek poukazuje na následující:

- RO (HSS – Co) pro různé materiály i řezné podmínky má velmi nízkou dobu trvanlivosti bříty a vykazuje vysoká opotřebení.
- RO s povlakem (HSS – Co + TiN) pro materiál „JP“ vykazuje výrazně vyšší trvanlivost bříty než RO bez povlaku i při změně řezných podmínek, změna materiálu na „O“ má za následek velmi nízkou dobu trvanlivosti bříty a vykazuje vysoká opotřebení velmi podobná RO bez povlaku.
- Tvrdokov (VHM – N) pro různé materiály i řezné podmínky má vysokou dobu trvanlivosti bříty a vykazuje nízká opotřebení.

## 4.2. Delaminace vzorků

### 4.2.1. Delaminace okrajů otvorů



Měření opotřebení nástroje bylo realizováno dle metodiky popsané v kapitole 3.8.

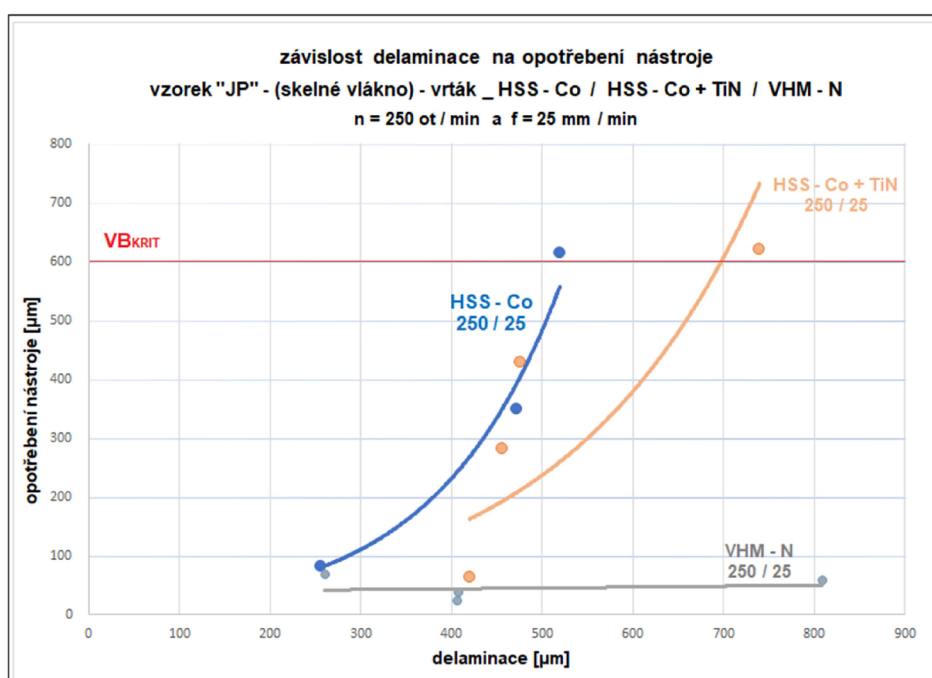


Obr.52 + 53 – Velikost delaminace na hraně otvoru + Délka vlákna výztuže vytažených z matrice

- horní (vstupní) vrtaná plocha



Tab.16 – Delaminace okrajů otvorů u vzorku „JP“ při řezných podmínkách „250 / 25“

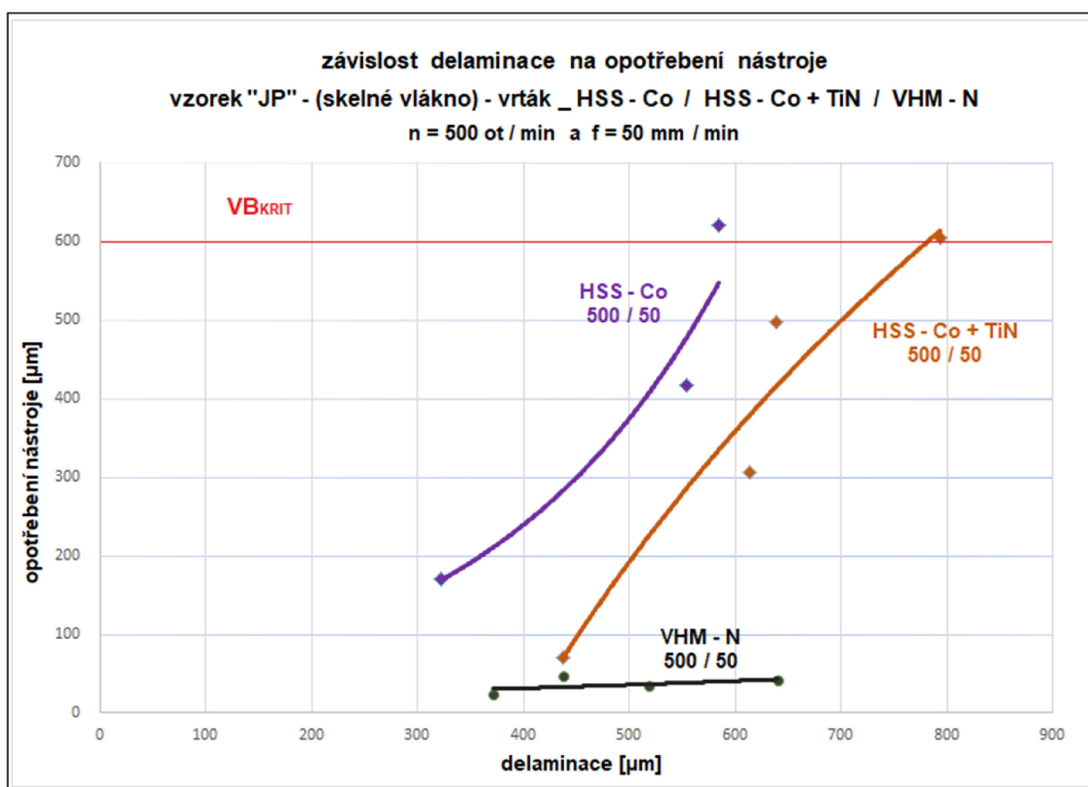
řezné podmínky - n = 250 ot / min a f = 25 mm / min			
vzorek "JP" - se skelným vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	delaminace [μm] ± nejistota U [μm]		
30	256 ± 1,25	420 ± 1,15	406 ± 1,91
150	472 ± 2,45	-	-
300	-	456 ± 2,34	407 ± 2,42
330	520 ± 2,35	-	-
600	-	476 ± 2,09	-
810	-	740 ± 2,69	-
900	-	-	809 ± 2,13
1410	-	-	260 ± 2,01



Graf.5 – Závislost delaminace okraje otvoru na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „JP“ při „250/25“



Tab.17 – Delaminace okrajů otvorů u vzorku „JP“ při řezných podmínkách „500 / 50“

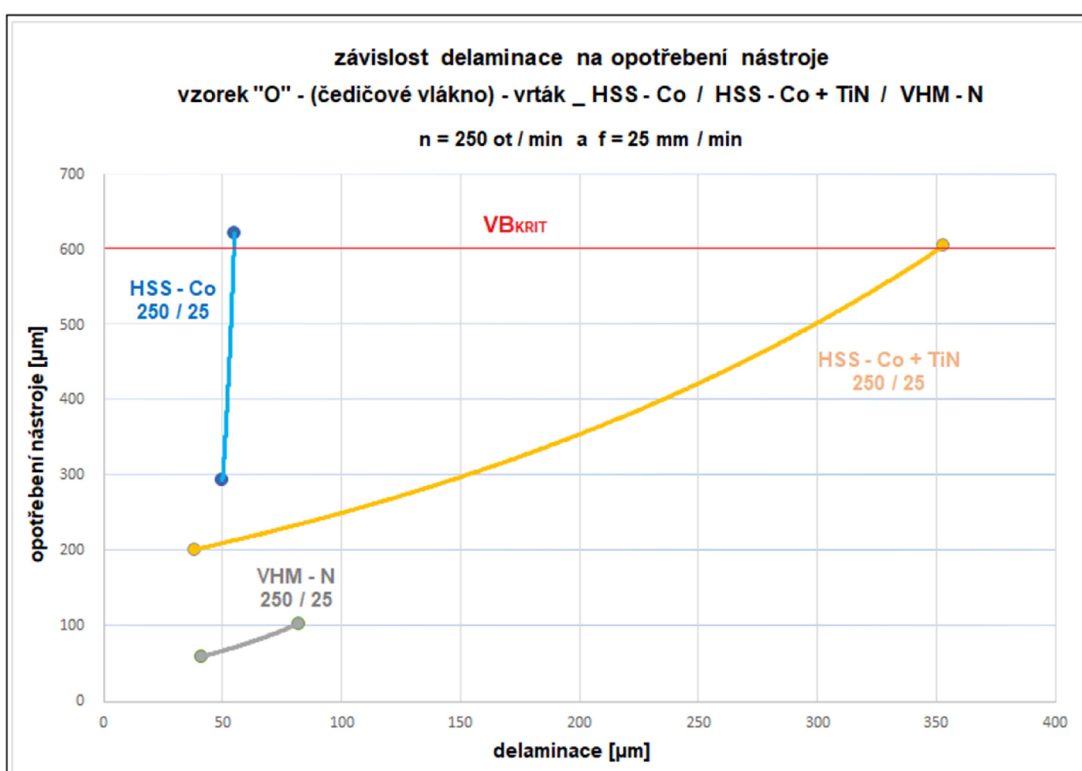
řezné podmínky - n = 500 ot / min a f = 50 mm / min			
vzorek "JP" - se skelným vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	delaminace [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
30	322 $\pm$ 1,71	437 $\pm$ 2,35	371 $\pm$ 1,76
150	555 $\pm$ 2,11	-	-
300	-	614 $\pm$ 2,11	519 $\pm$ 2,97
330	585 $\pm$ 1,89	-	-
600	-	639 $\pm$ 2,76	-
810	-	794 $\pm$ 2,91	-
900	-	-	640 $\pm$ 2,01
1410	-	-	437 $\pm$ 1,97



Graf.6 – Závislost delaminace okraje otvoru na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „JP“ při „500/50“

Tab.18 – Delaminace okrajů otvorů u vzorku „O“ při řezných podmínkách „250 / 25“

řezné podmínky - n = 250 ot / min a f = 25 mm / min			
vzorek "O" - s čedičovým vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	delaminace [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
16	55 $\pm$ 1,67	38 $\pm$ 1,41	41 $\pm$ 1,97
96	50 $\pm$ 1,91	-	-
160	-	-	82 $\pm$ 2,16
176	-	524 $\pm$ 2,29	-

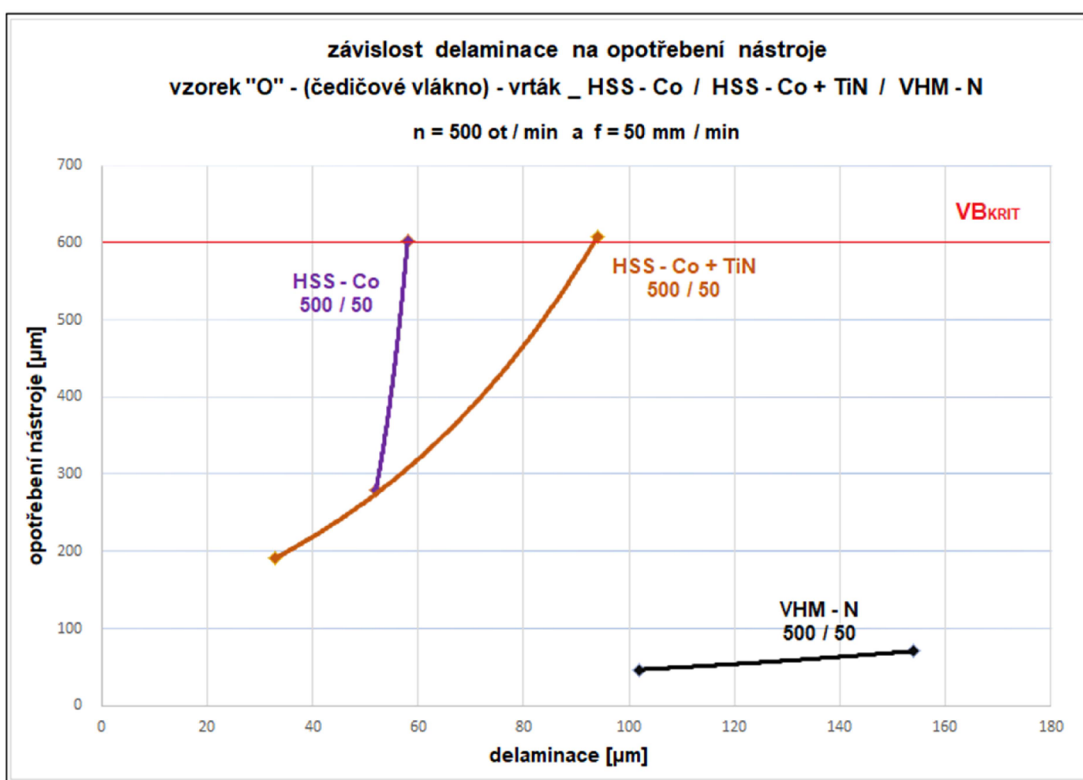


Graf.7 – Závislost delaminace okraje otvoru na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „O“ při „250/25“

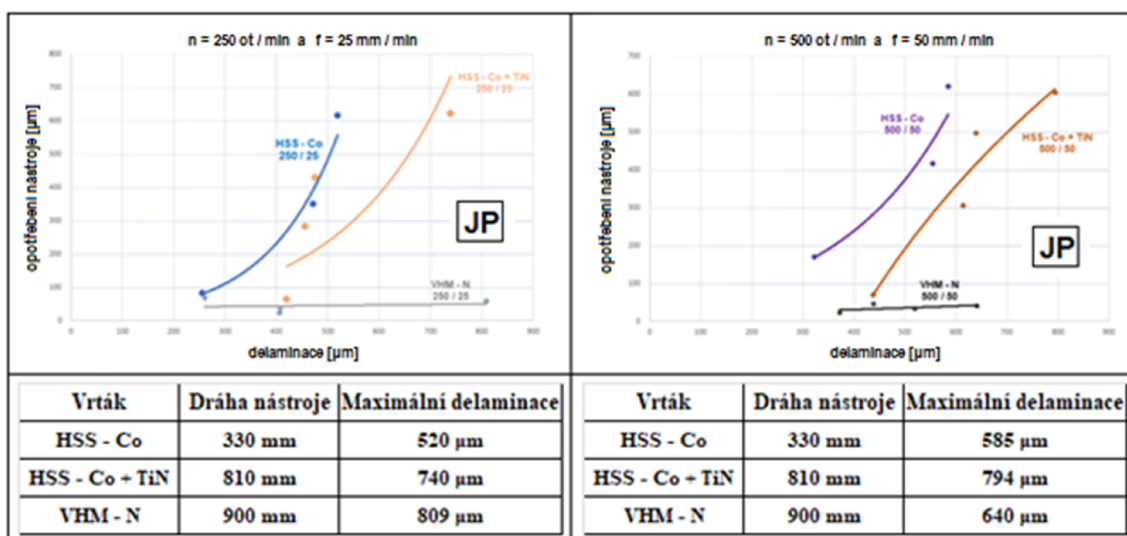


Tab.19 – Delaminace okrajů otvorů u vzorku „O“ při řezných podmínkách „500 / 50“

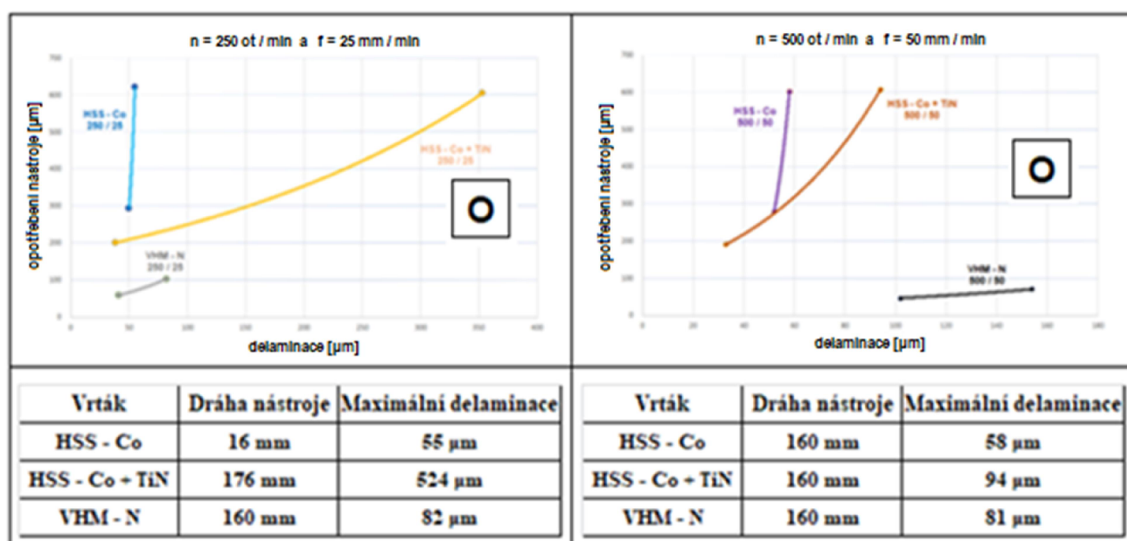
řezné podmínky - n = 500 ot / min a f = 50 mm / min			
vzorek "O" - s čedičovým vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	delaminace [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
16	52 $\pm$ 1,99	94 $\pm$ 2,11	42 $\pm$ 1,37
160	58 $\pm$ 2,03	33 $\pm$ 1,54	81 $\pm$ 1,87



Graf.8 – Závislost delaminace okraje otvoru na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „O“ při „500/50“



Obr.54 – Delaminace okrajů otvorů vzorků „JP“ při „250/25“ a „500/50“





Obr.55 – Delaminace okrajů otvorů vzorků „O“ při „250/25“ a „500/50“

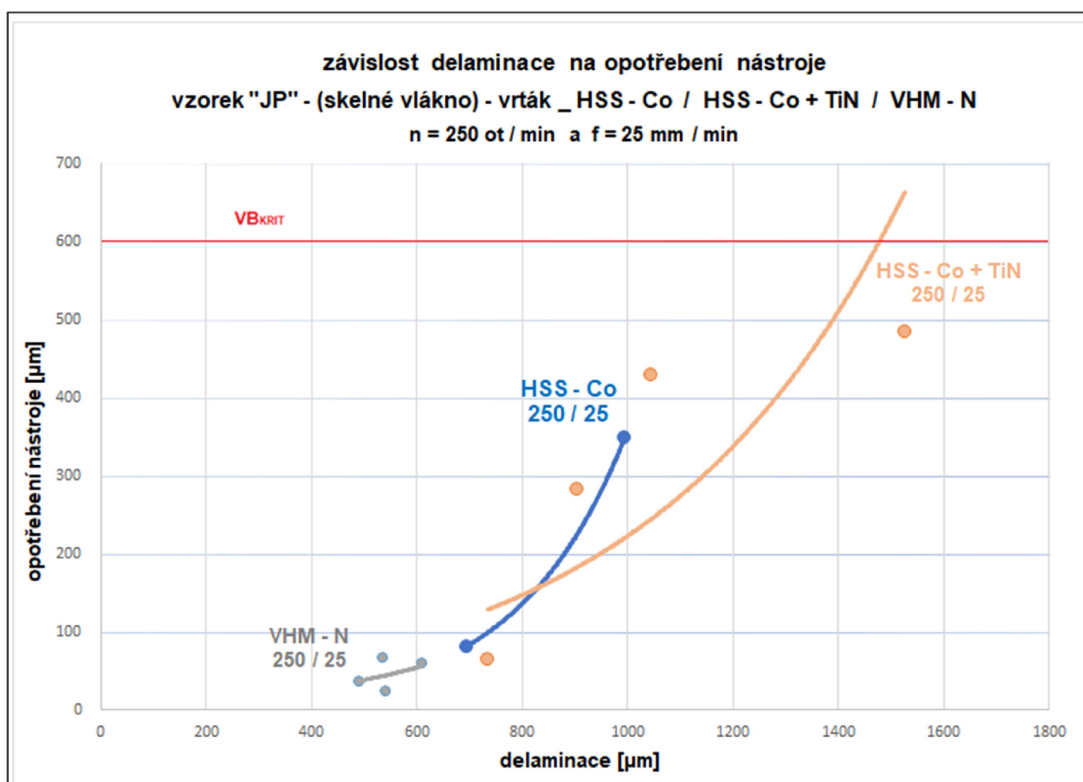
Porovnání materiálů vzorků, vrtáků a rezných podmínek poukazuje na následující:

Je ověřen vztah zvětšující se delaminace se zvyšujícím se opotřebením nástroje, zvětšení rezných podmínek mělo minimální vliv na velikost delaminace u vzorku „JP“, u vzorku „O“ je velikost delaminace lokálně ovlivněna vyštípnutím zrn pískového ochranného obalu zkoumaného materiálu. Velikost delaminace u vzorku „O“ je výrazně menší než u vzorku „JP“.

- spodní (výstupní) vrtaná plocha




Tab.20 – Delaminace okrajů otvorů u vzorku „JP“ při řezných podmínkách „250 / 25“

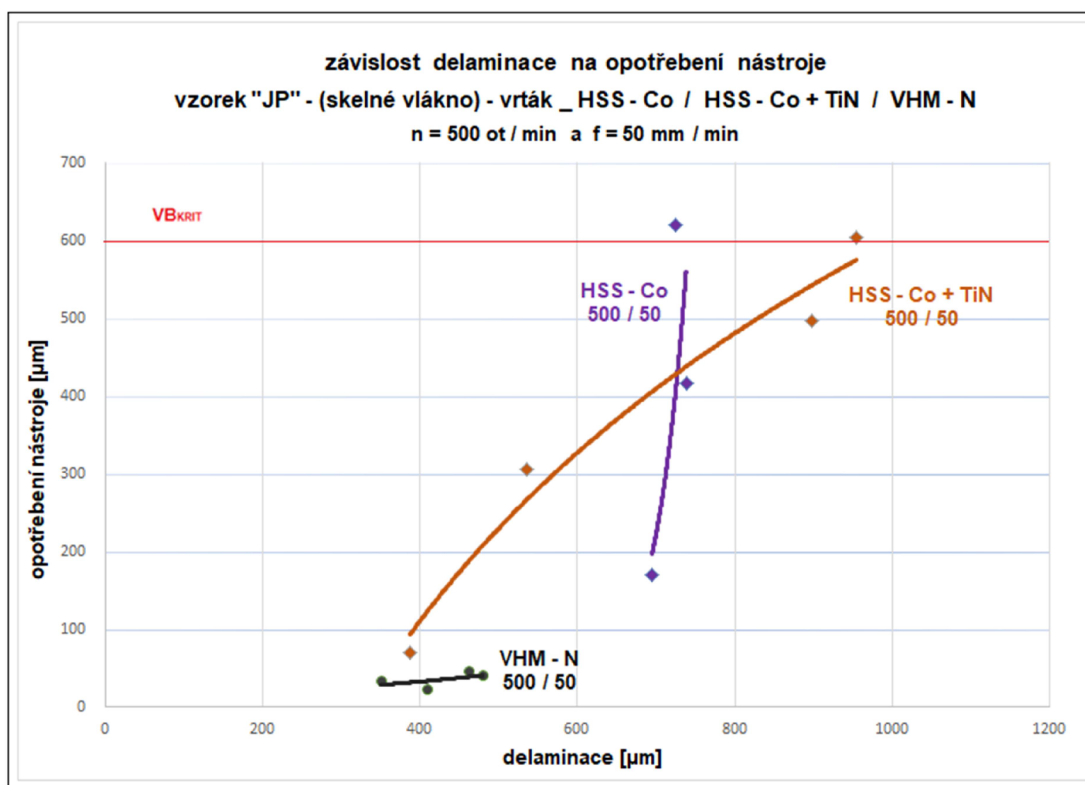
řezné podmínky - n = 250 ot / min a f = 25 mm / min			
vzorek "JP" - se skelným vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	delaminace [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
30	695 $\pm$ 2,15	734 $\pm$ 2,75	540 $\pm$ 2,86
150	995 $\pm$ 2,78	-	-
300	-	905 $\pm$ 2,98	488 $\pm$ 2,12
330	-	-	-
600	-	1044 $\pm$ 3,01	-
810	-	1526 $\pm$ 2,37	-
900	-	-	609 $\pm$ 2,08
1410	-	-	533 $\pm$ 2,19



Graf.9 – Závislost delaminace okraje otvoru na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „JP“ při „250/25“

Tab.21 – Delaminace okrajů otvorů u vzorku „JP“ při řezných podmínkách „250 / 25“

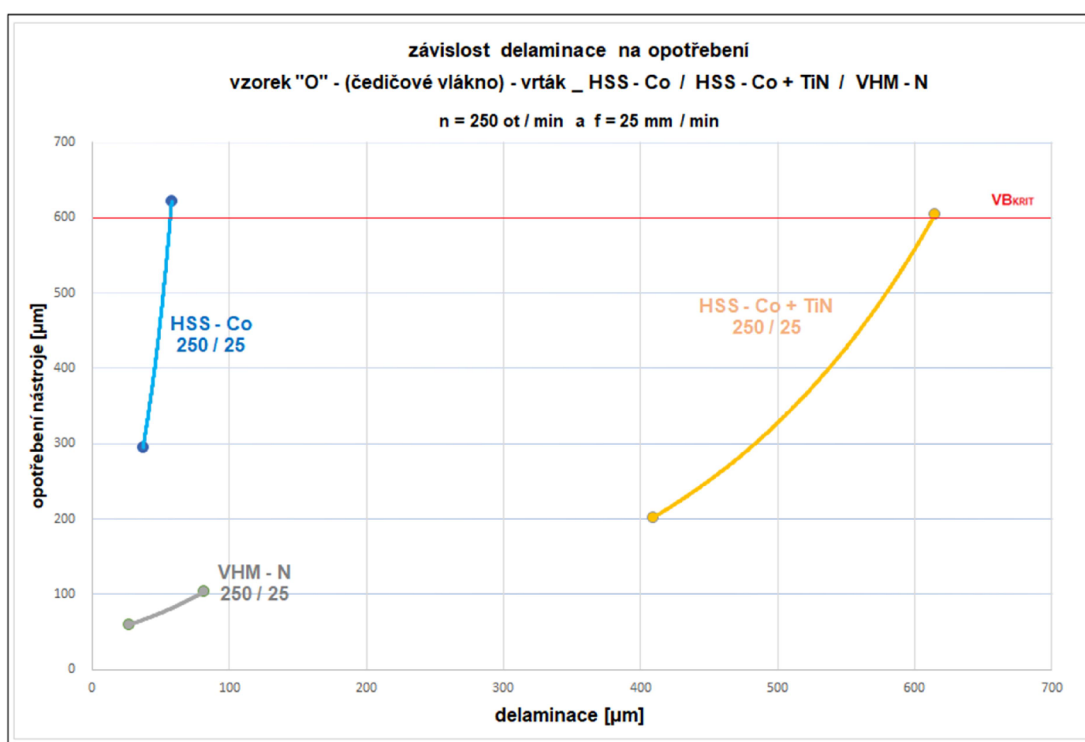
řezné podmínky - n = 500 ot / min a f = 50 mm / min			
vzorek "JP" - se skelným vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	delaminace [μm] ± nejistota U [μm]		
30	695 ± 1,97	387 ± 1,58	409 ± 1,38
150	738 ± 2,33	-	-
300	-	535 ± 1,76	350 ± 2,75
330	724 ± 2,56	-	-
600	-	898 ± 2,12	-
810	-	954 ± 2,38	-
900	-	-	479 ± 2,31
1410	-	-	461 ± 2,65



Graf.10 – Závislost delaminace okraje otvoru na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „JP“ při „500/50“

Tab.22 – Delaminace okrajů otvorů u vzorku „O“ při řezných podmínkách „250 / 25“

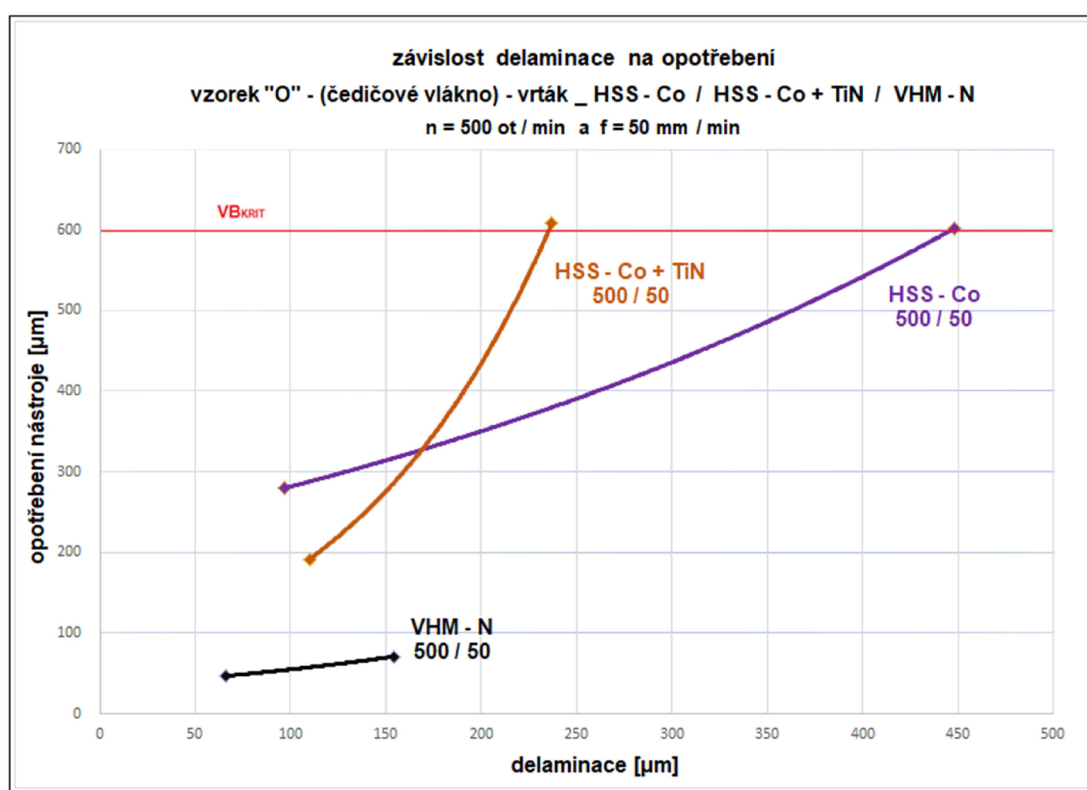
řezné podmínky - n = 250 ot / min a f = 25 mm / min			
vzorek "O" - s čedičovým vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	delaminace [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
16	37 $\pm$ 1,79	409 $\pm$ 2,98	27 $\pm$ 1,27
96	58 $\pm$ 1,55	-	-
160	-	-	82 $\pm$ 1,97
176	-	615 $\pm$ 3,01	-



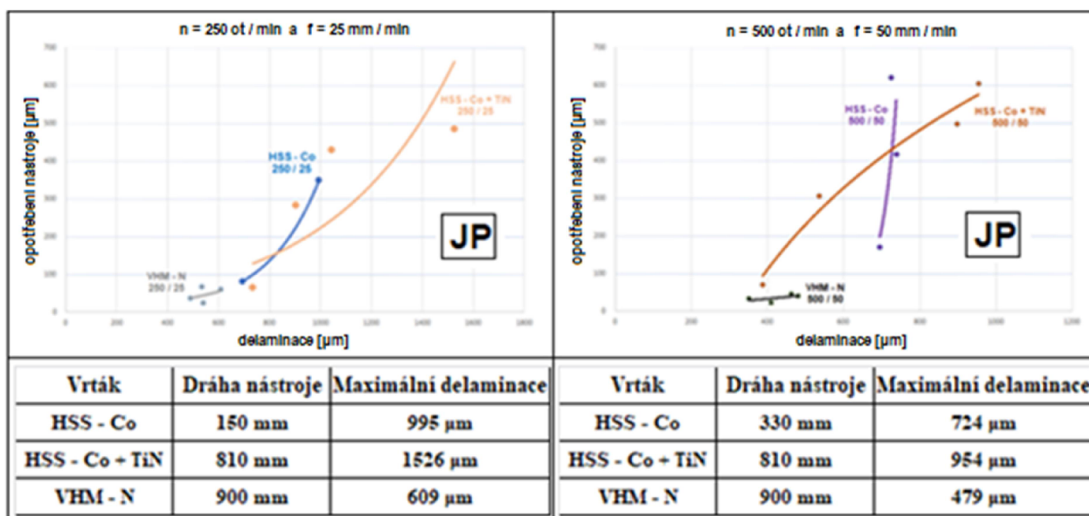
Graf.11 – Závislost delaminace okraje otvoru na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „O“ při „250/25“

Tab.23 – Delaminace okrajů otvorů u vzorku „O“ při řezných podmínkách „500 / 50“

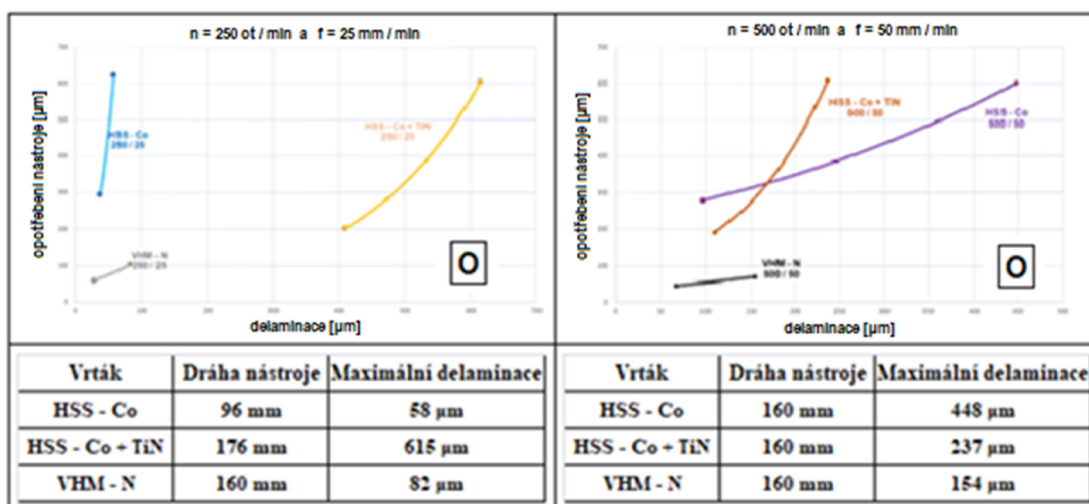
řezné podmínky - n = 500 ot / min a f = 50 mm / min			
vzorek "O" - s čedičovým vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	delaminace [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
16	97 $\pm$ 2,01	110 $\pm$ 1,68	66 $\pm$ 1,29
160	448 $\pm$ 3,16	237 $\pm$ 2,45	154 $\pm$ 1,91



Graf.12 – Závislost delaminace okraje otvoru na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „O“ při „250/25“



Obr.54 – Delaminace okrajů otvorů vzorků „JP“ při „250/25“ a „500/50“



Obr.55 – Delaminace okrajů otvorů vzorků „O“ při „250/25“ a „500/50“

Porovnání materiálů vzorků, vrtáků a řezných podmínek poukazuje na následující:



Je ověřen vztah zvětšující se delaminace se zvyšujícím se opotřebením nástroje, zvětšení řezných podmínek mělo minimální vliv na velikost delaminace u vzorku „JP“, u vzorku „O“ je velikost delaminace lokálně ovlivněna vyštípnutím zrn pískového ochranného obalu zkoumaného materiálu. Velikost delaminace u vzorku „O“ je výrazně menší než u vzorku „JP“.

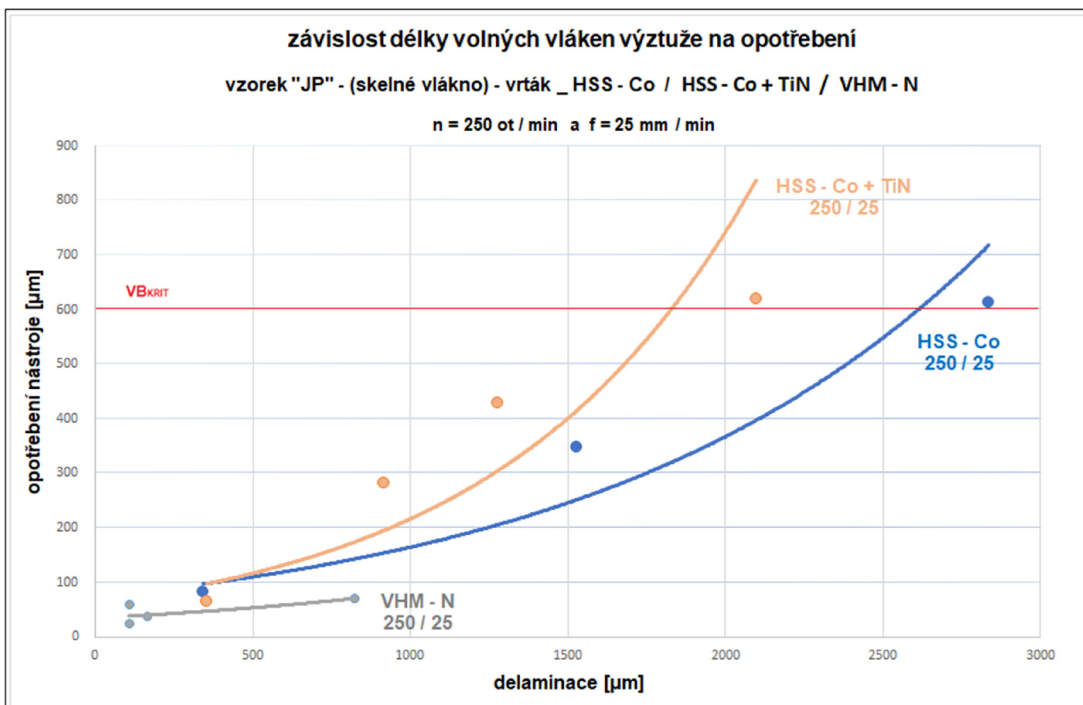
#### 4.2.2. Délky volných vláken výztuže

Měření opotřebení nástroje bylo realizováno dle metodiky popsané v kapitole 3.8.

- horní (vstupní) vrtaná plocha

Tab.24 – Délka vláken výztuže u vzorku „JP“ při řezných podmínkách „250 / 25“



řezné podmínky - n = 250 ot / min a f = 25 mm / min			
vzorek "JP" - se skelným vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	délka vláken výztuže [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
30	342 $\pm$ 1,31	355 $\pm$ 1,77	105 $\pm$ 1,54
150	1529 $\pm$ 2,38	-	-
300	-	916 $\pm$ 2,42	165 $\pm$ 2,14
330	2835 $\pm$ 2,91	-	-
600	-	1277 $\pm$ 2,97	-
810	-	2097 $\pm$ 3,41	-
900	-	-	105 $\pm$ 2,01
1410	-	-	822 $\pm$ 3,42

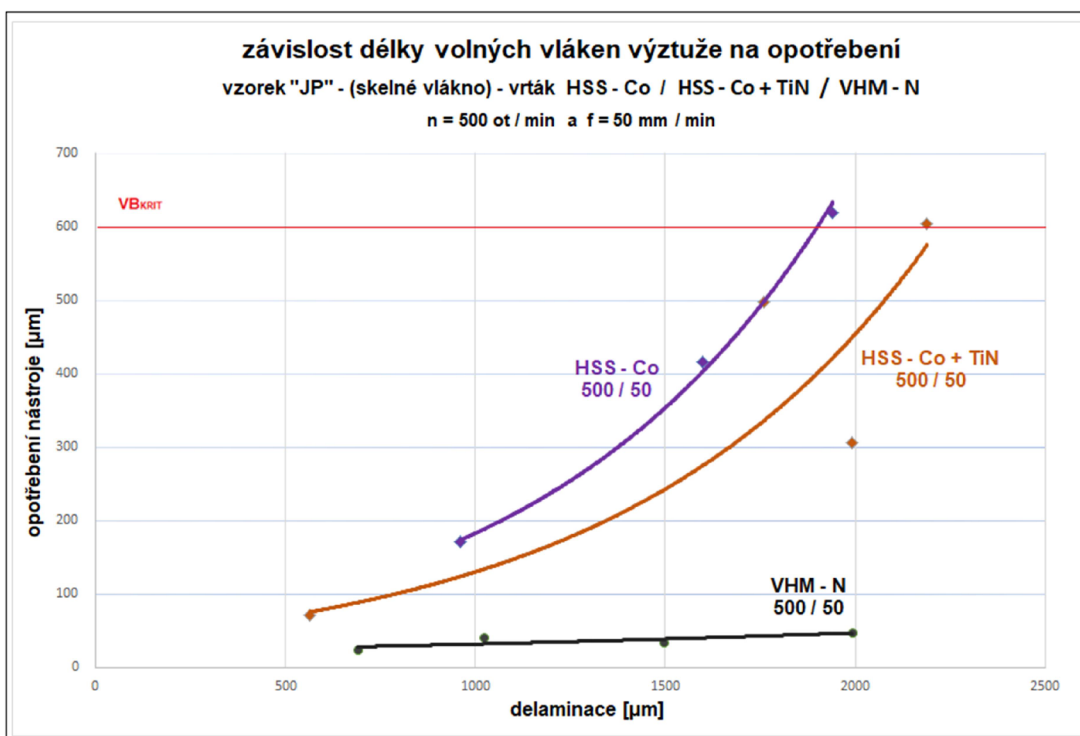


Graf.13 – Závislost délky volných vláken výztuže na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „JP“ při „250/25“





Tab.25 – Délka vláken výztuže u vzorku „JP“ při řezných podmínkách „500 / 50“

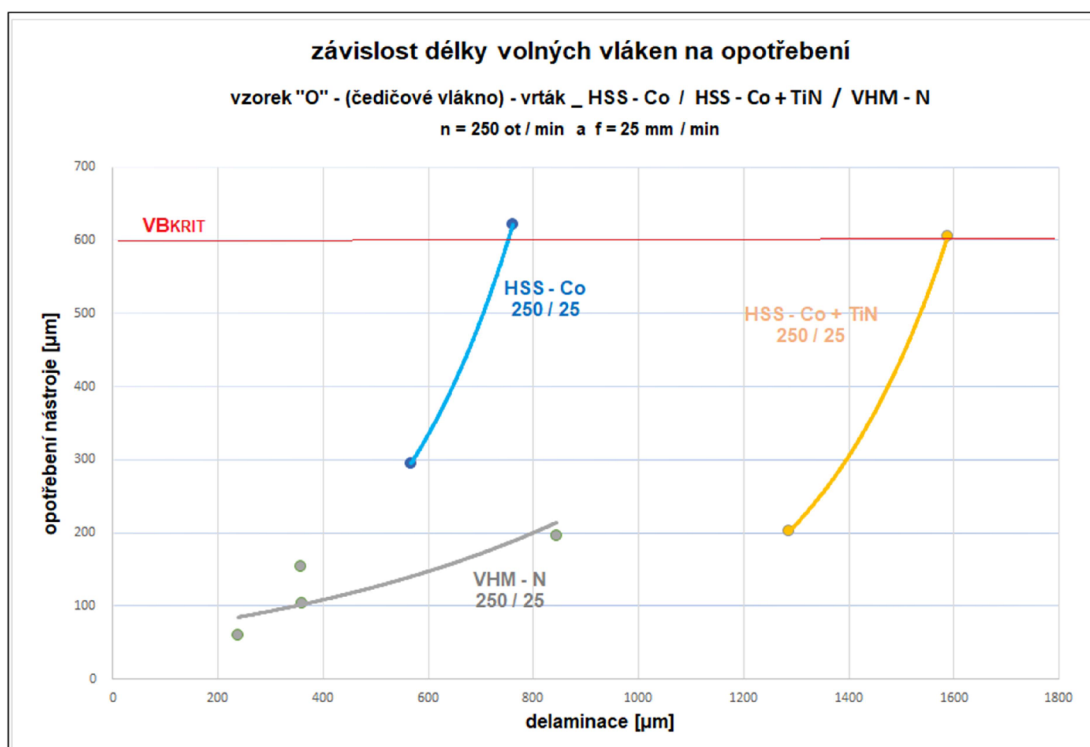
řezné podmínky - n = 500 ot / min a f = 50 mm / min			
vzorek "JP" - se skelným vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	délka vláken výztuže [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
30	960 $\pm$ 2,21	564 $\pm$ 2,14	689 $\pm$ 2,75
150	1597 $\pm$ 2,42	-	-
300	1941 $\pm$ 2,77	1992 $\pm$ 2,79	1496 $\pm$ 3,02
330	-	-	-
600	-	1792 $\pm$ 2,96	-
810	-	2189 $\pm$ 3,32	-
900	-	-	1020 $\pm$ 2,74
1410	-	-	1993 $\pm$ 2,43



Graf.14 – Závislost délky volných vláken výztuže na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „JP“ při „500/50“



Tab.26 – Délka vláken výztuže u vzorku „O“ při řezných podmínkách „250 / 25“

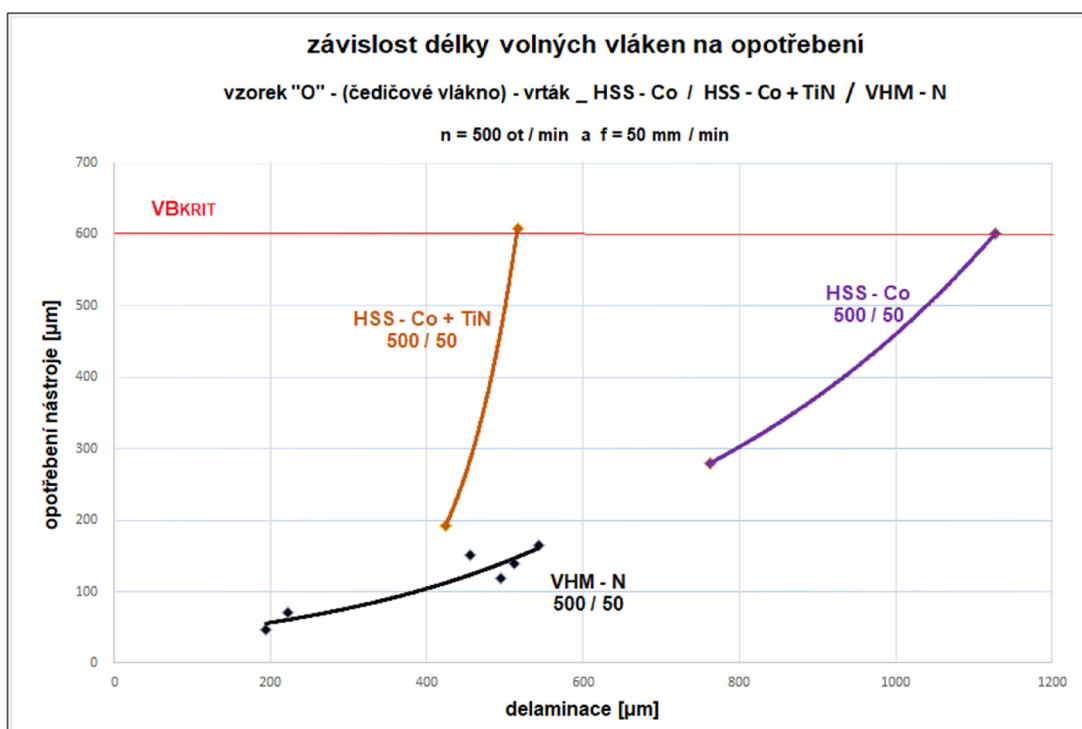
řezné podmínky - n = 250 ot / min a f = 25 mm / min			
vzorek "O" - s čedičovým vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	délka vláken výztuže [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
16	564 $\pm$ 1,98	1286 $\pm$ 3,34	238 $\pm$ 1,72
96	761 $\pm$ 2,76	-	-
160	-	-	359 $\pm$ 2,24
176	-	1588 $\pm$ 3,75	-
800	-	-	357 $\pm$ 2,75
1536	-	-	844 $\pm$ 3,01



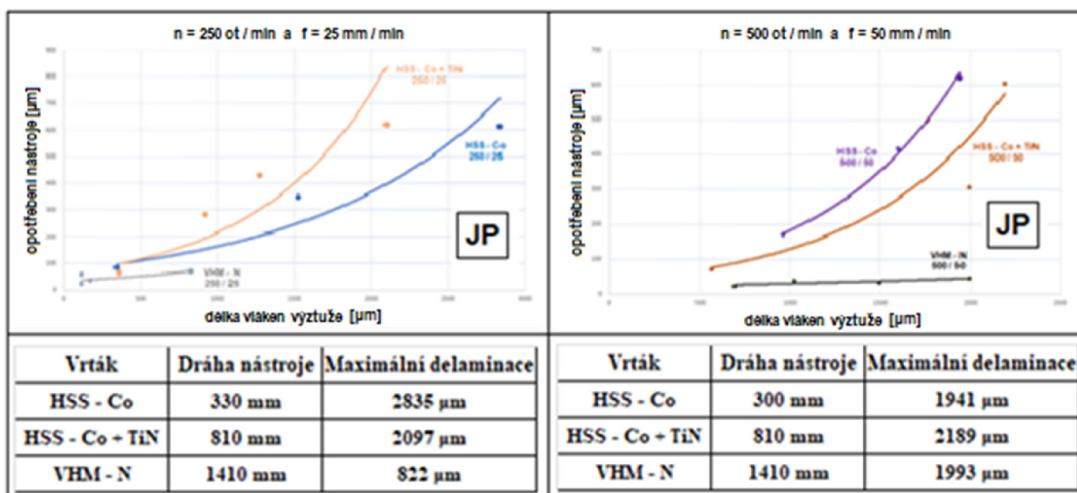
Graf.15 – Závislost délky volných vláken výztuže na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „O“ při „250/25“

Tab.27 – Délka vláken výztuže u vzorku „O“ při řezných podmínkách „500 / 50“

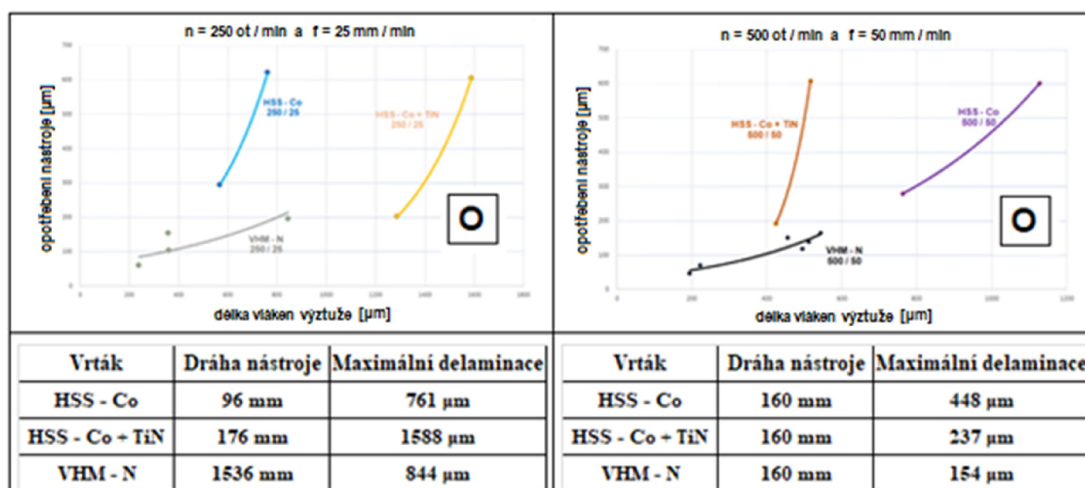
řezné podmínky - n = 500 ot / min a f = 50 mm / min			
vzorek "O" - s čedičovým vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	délka vláken výztuže [μm] ± nejistota U [μm]		
16	763 ± 2,76	424 ± 1,35	194 ± 1,37
160	1128 ± 3,52	516 ± 2,02	222 ± 1,46
480	-	-	495 ± 2,13
800	-	-	512 ± 2,87
1120	-	-	456 ± 1,89
1536	-	-	543 ± 3,23



Graf.16 – Závislost délky volných vláken výztuže na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „O“ při „250/25“



Obr.56 – Délky volných vláken výztuže u vzorků „JP“ při „250/25“ a „500/50“





Obr.57 – Délky volných vláken výztuže u vzorků „O“ při „250/25“ a „500/50“

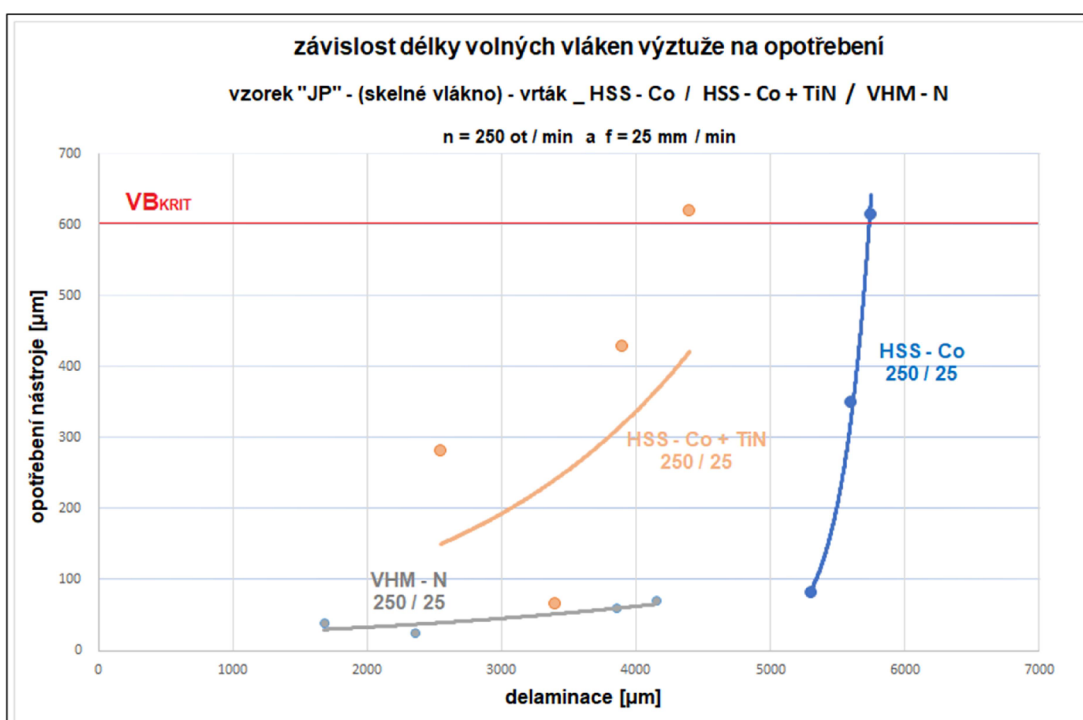
Porovnání materiálů vzorků, vrtáků a rezných podmínek poukazuje na následující:

Je ověřen předpoklad výrazně delších volných vláken výztuže u vzorku „JP“ – změna velikosti rezných podmínek má malý vliv na změnu délky, u vzorku „O“ jsou tato volná vlákna početně i velikostně výrazně menší oproti vzorku „JP“.

- spodní (výstupní) vrtaná plocha



Tab.28 – Délka vláken výztuže u vzorku „JP“ při řezných podmínkách „250 / 25“

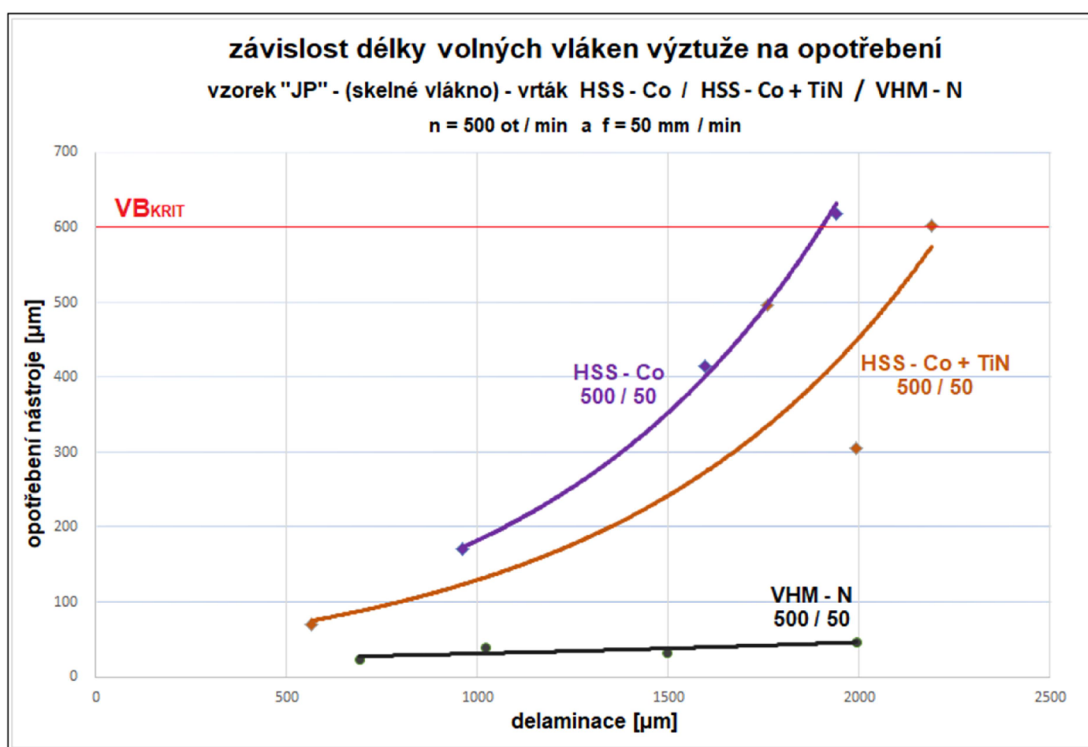
řezné podmínky - n = 250 ot / min a f = 25 mm / min			
vzorek "JP" - se skelným vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	délka vláken výztuže [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
30	5300 $\pm$ 3,42	3400 $\pm$ 3,75	2350 $\pm$ 2,97
150	5600 $\pm$ 4,01	-	-
300	-	3550 $\pm$ 2,98	1675 $\pm$ 2,84
330	5750 $\pm$ 3,78	-	-
600	-	3900 $\pm$ 3,86	-
810	-	4400 $\pm$ 349	-
900	-	-	3850 $\pm$ 2,77
1410	-	-	4150 $\pm$ 3,02



Graf.17 – Závislost délky volných vláken výztuže na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „JP“ při „250/25“



Tab.29 – Délka vláken výztuže u vzorku „JP“ při řezných podmínkách „500 / 50“

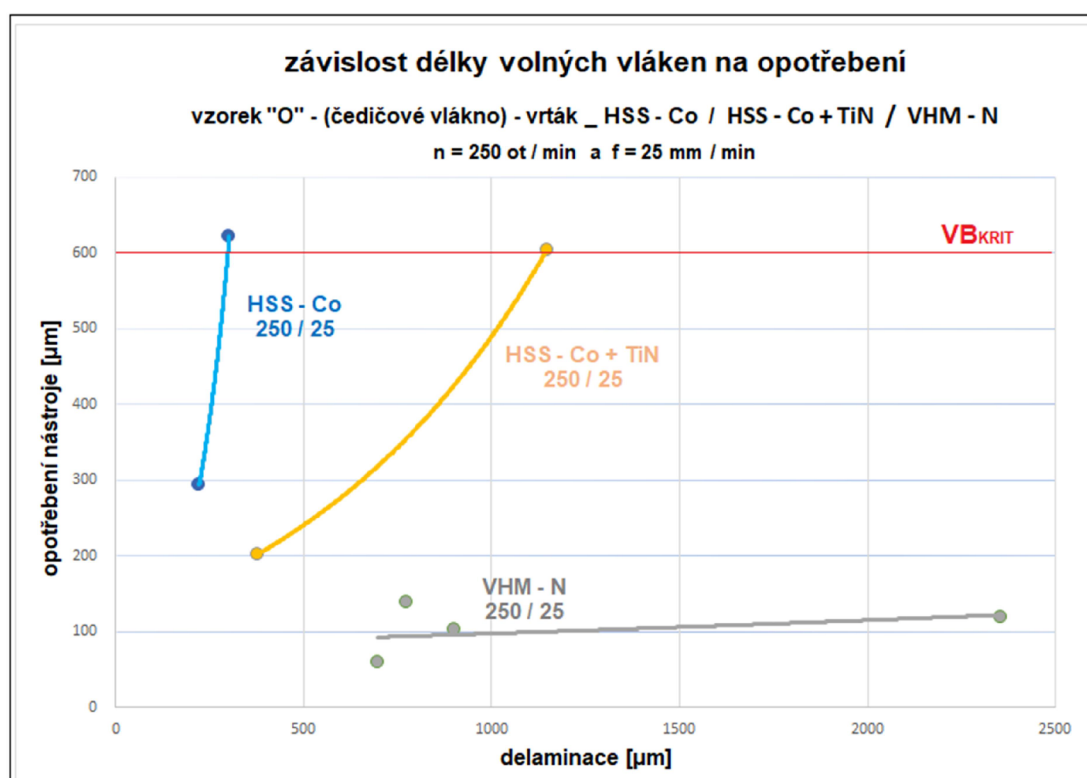
řezné podmínky - n = 500 ot / min a f = 50 mm / min			
vzorek "JP" - se skelným vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	délka vláken výztuže [μm] ± nejistota U [μm]		
30	3850 ± 2,86	2180 ± 3,02	3650 ± 2,97
150	4100 ± 3,76	-	-
300	3650 ± 3,46	3825 ± 2,91	2853 ± 2,75
330	-	-	-
600	-	4150 ± 3,87	-
810	-	4100 ± 3,93	-
900	-	-	3650 ± 3,74
1410	-	-	4300 ± 3,01



Graf.18 – Závislost délky volných vláken výztuže na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „JP“ při „500/50“



Tab.30 – Délka vláken výztuže u vzorku „O“ při řezných podmínkách „250 / 25“

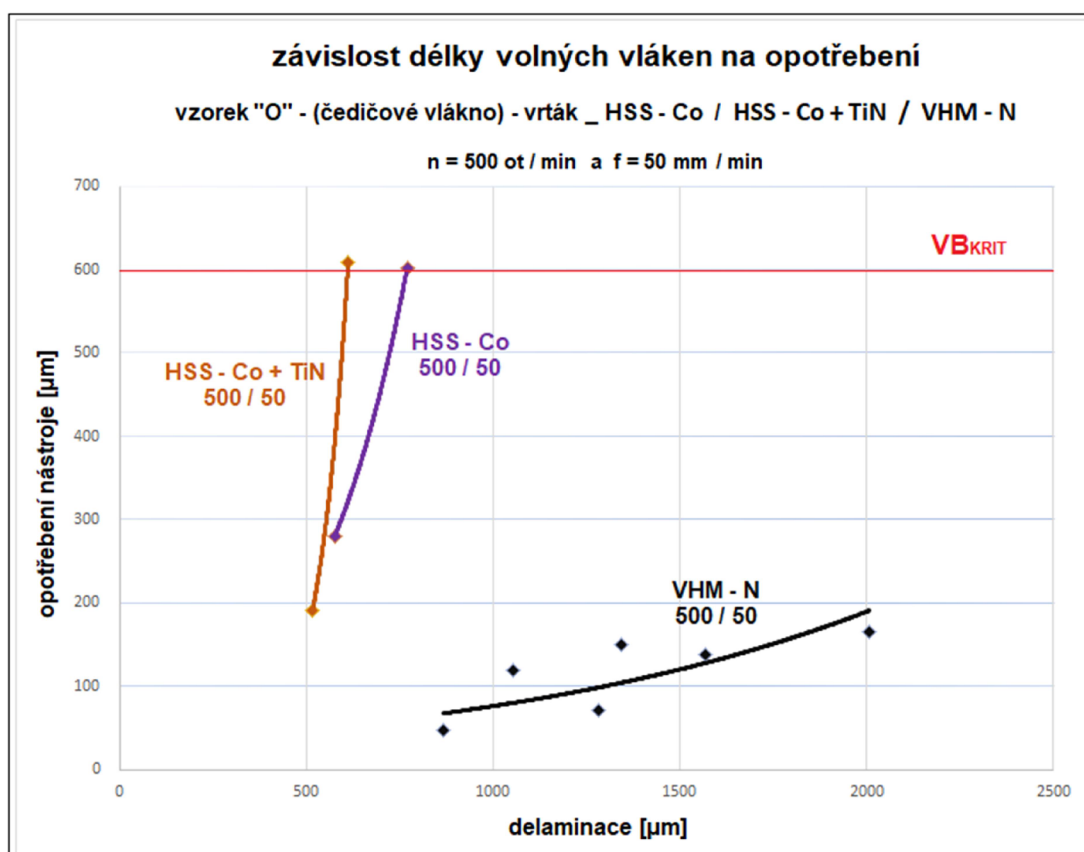
řezné podmínky - n = 250 ot / min a f = 25 mm / min			
vzorek "O" - s čedičovým vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	délka vláken výztuže [μm] ± nejistota U [μm]		
16	222 ± 1,74	375 ± 2,11	659 ± 1,24
96	302 ± 2,76	-	-
160	-	-	900 ± 2,52
176	-	1148 ± 3,01	-
480	-	-	2354 ± 4,01
800	-	-	772 ± 2,16
1120	-	-	1906 ± 4,08
1536	-	-	2,165 ± 3,78



Graf.19 – Závislost délky volných vláken výztuže na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „O“ při „250/25“

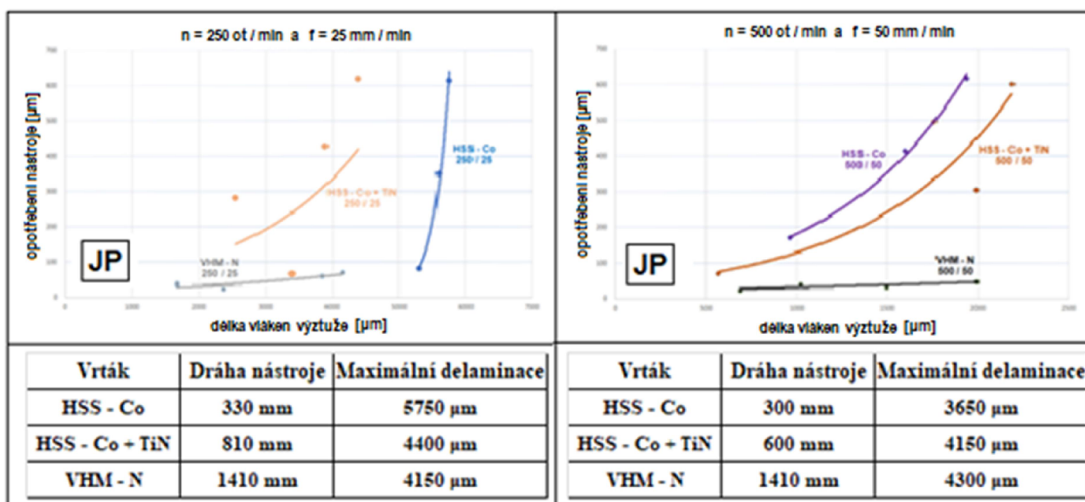
Tab.31 – Délka vláken výztuže u vzorku „O“ při řezných podmínkách „500 / 50“

řezné podmínky - n = 500 ot / min a f = 50 mm / min			
vzorek "O" - s čedičovým vláknem			
vrták	HSS - Co	HSS - Co + TiN	VHM - N
			
dráha nástroje [mm]	délka vláken výztuže [ $\mu\text{m}$ ] $\pm$ nejistota U [ $\mu\text{m}$ ]		
16	575 $\pm$ 3,01	516 $\pm$ 1,96	867 $\pm$ 2,23
160	769 $\pm$ 2,47	611 $\pm$ 2,29	1283 $\pm$ 3,46
480	-	-	1053 $\pm$ 3,11
800	-	-	1569 $\pm$ 3,05
1120	-	-	1345 $\pm$ 4,11
1536	-	-	2008 $\pm$ 3,74

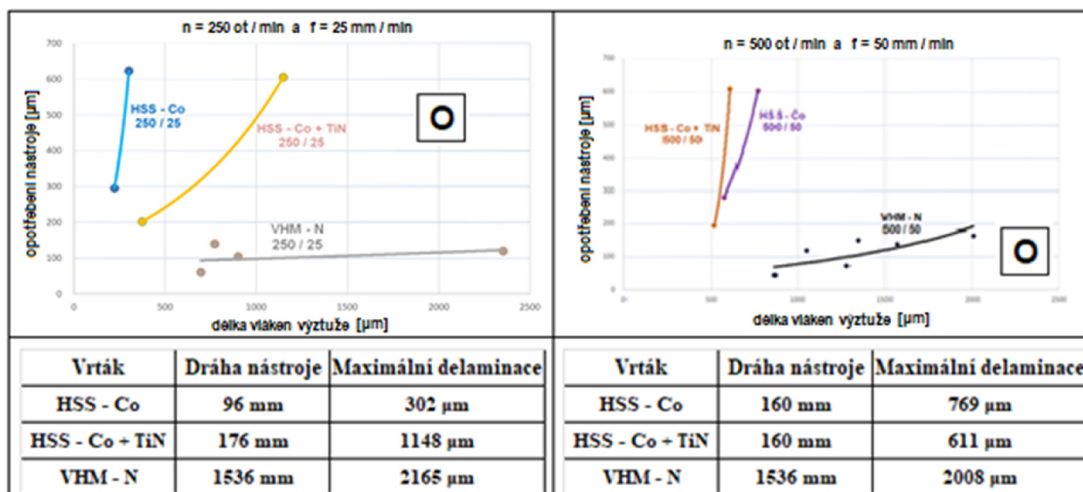


Graf.20 – Závislost délky volných vláken výztuže na opotřebení vrtáku HSS – Co / HSS – Co + TiN / VHM - N u vzorku „O“ při „500/50“





Obr.58 – Délky volných vláken výztuže u vzorků „JP“ při „250/25“ a „500/50“



Obr.59 – Délky volných vláken výztuže u vzorků „O“ při „250/25“ a „500/50“

Porovnání materiálů vzorků, vrtáků a řezných podmínek poukazuje na následující:

Je ověřen předpoklad výrazně delších volných vláken výztuže u vzorku „JP“ – změna velikosti řezných podmínek má malý vliv na změnu délky, u vzorku „O“ jsou tato volná vlákna početně i velikostně výrazně menší oproti vzorku „JP“.

### 4.3. Ekonomické hledisko

V této části bude posuzována cena strojní minuty a jednotky opotřebení nástroje u každého nástroje a vzorku s cílem porovnat jednotlivé ukazatele pro použité materiály vzorků a nástrojů a určit nejvhodnější materiál nástroje.

#### Cena nástrojů – vrtáků:

Název zboží	DPH	Jedn. cena bez DPH Kč
1. <b>100690 8,0</b> VRTAK 8,00 MM 79/37 HSS-Co DIN1897	21 %	338,00
2. <b>100720 8,00</b> VRTAK 8.00 MM 79/37 HSS-Co TiN DIN1897	21 %	383,50
3. <b>102615 8,00</b> VRTAK VHM 8,00mm KRATKY 3-4xD	21 %	1 033,50

Obr. 62 – Fragment faktury použitých vrtáků

Příklad určení cen 1 minuty strojního času a 1  $\mu\text{m}$  opotřebení:

vzorek "JP" - vrták HSS - Co	strojní čas	opotřebení
$n_1 = 250 \text{ ot / min}$ $f_1 = 25 \text{ mm / min}$	<b>13,2 min</b>	<b>614 <math>\mu\text{m}</math></b>
$n_2 = 500 \text{ ot / min}$ $f_2 = 50 \text{ mm / min}$	<b>12 min</b>	<b>619 <math>\mu\text{m}</math></b>

#### cena za 1 strojní minutu

$$250 / 25 : C_{\text{min}} = C_{\text{nástroje}} / \text{strojní čas při opotřebení } 600 \mu\text{m} = 338 \text{ Kč} / (13,2 \text{ min} \times 600 / 614) =$$

$$\mathbf{26,20 \text{ Kč}}$$

kde:  $C_{\text{nástroje}}$  – cena nástroje HSS –Co

$$500 / 50 : C_{\text{min}} = C_{\text{nástroje}} / \text{strojní čas při opotřebení } 600 \mu\text{m} = 338 \text{ Kč} / (12 \text{ min} \times 600 / 619) =$$

$$\mathbf{29,06 \text{ Kč}}$$

#### cena za 1 $\mu\text{m}$ opotřebení

$$C_{\mu\text{m}} = C_{\text{nástroje}} / 600 = 338 \text{ Kč} / 600 \mu\text{m} = \mathbf{0,56 \text{ Kč}}$$

kde:  $C_{\text{nástroje}}$  – cena nástroje HSS –Co

hodnota „600  $\mu\text{m}$ “ je limitní hodnota pro opotřebení nástroje

obdobně vypočteny ceny pro další vrtáky (HSS –Co + TiN a VHM – N) a vzorek „O“

cena za strojní minutu u jednotlivých vrtáků, materiálů a řezných podmínek:

vzorek "JP" - vrták HSS - Co	cena za strojní minutu
$n_1 = 250 \text{ ot / min} \_ f_1 = 25 \text{ mm / min}$	<b>26,20 Kč</b>
$n_2 = 500 \text{ ot / min} \_ f_2 = 50 \text{ mm / min}$	<b>29,06 Kč</b>

vzorek "JP" - vrták HSS - Co + TiN	cena za strojní minutu
$n_1 = 250 \text{ ot / min} \_ f_1 = 25 \text{ mm / min}$	<b>8,93 Kč</b>
$n_2 = 500 \text{ ot / min} \_ f_2 = 50 \text{ mm / min}$	<b>11,9 Kč</b>

vzorek "JP" - vrták VHM - N	cena za strojní minutu
$n_1 = 250 \text{ ot / min} \_ f_1 = 25 \text{ mm / min}$	<b>2,07 Kč</b>
$n_2 = 500 \text{ ot / min} \_ f_2 = 50 \text{ mm / min}$	<b>1,38 Kč</b>

vzorek "O" - vrták HSS - Co	cena za strojní minutu
$n_1 = 250 \text{ ot / min} \_ f_1 = 25 \text{ mm / min}$	<b>91,25 Kč</b>
$n_2 = 500 \text{ ot / min} \_ f_2 = 50 \text{ mm / min}$	<b>52,99 Kč</b>

vzorek "O" - vrták HSS - Co + TiN	cena za strojní minutu
$n_1 = 250 \text{ ot / min} \_ f_1 = 25 \text{ mm / min}$	<b>50,35 Kč</b>
$n_2 = 500 \text{ ot / min} \_ f_2 = 50 \text{ mm / min}$	<b>60,72 Kč</b>

vzorek "O" - vrták VHM - N	cena za strojní minutu
$n_1 = 250 \text{ ot / min} \_ f_1 = 25 \text{ mm / min}$	<b>5,64 Kč</b>
$n_2 = 500 \text{ ot / min} \_ f_2 = 50 \text{ mm / min}$	<b>4,72 Kč</b>

cena za jednotku opotřebení u jednotlivých vrtáků:

**HSS – Co:** cena za opotřebení 1  $\mu\text{m}$  = **0,56 Kč**

**HSS – Co + TiN:** cena za opotřebení 1  $\mu\text{m}$  = **0,64 Kč**

**VHM – N:** cena za opotřebení 1  $\mu\text{m}$  = **1,72 Kč**

Samozřejmě vrták není po opotřebení zničen, ale je nezbytně nutné jej znovu naostřit – nevyužití strojního času, náklady na operaci a u vrtáku HSS-Co + TiN se jedná o ztrátu povlaku na řezné části.

## 5. Diskuze

Cílem této práce bylo určení vzájemným vztahem mezi opotřebením nástroje a vzniklou delaminací materiálů s danou orientací vláken na jedné straně a vhodným materiálem nástroje (vrtáku) a řeznými podmínkami na druhé straně a ověřit tyto vztahy při vrtání kompozitních materiálů zpevněných skelnými a čedičovými vlákny použitých ve stavebním průmyslu.

Toho bylo dosaženo vhodnými řeznými podmínkami a stanovením průkazné metodiky experimentu s využitím vhodných strojů / přístrojů ke stanovení výsledků.

Jednotlivé kapitoly diplomové práce obsahují následující:

V první kapitole se stručně seznámíme s tím co to je vlastně je kompozit (2.1), následně se seznámíme s problematikou vrtání do kompozitních materiálů (2.2), co má vliv na řezné podmínky při obrábění (2.3), jaké materiály nástroje jsou vhodné (2.4), s jakou geometrií (2.5), co znamená, když mluvíme o orientaci vláken v kompozitu (1.6), jaké jsou mechanismy vzniku delaminace (2.7) a co všechno má vliv na opotřebení nástroje (2.8).

Kapitola 3 nás seznamuje s použitými vzorky pro experiment (3.1), s jejich složením chemickým pomocí metody EDS (3.2), dále pak s použitými nástroji – vrtáky (3.3) a řeznými podmínkami (3.4) při kterých byl experiment prováděn. Dále je zde uvedeno kde se jednotlivé části experimentu realizovaly, které stroje, přístroje, nástroje a pomůcky byly použity (3.5) z hlediska dělení polotovarů, přípravu samotných vzorků do finální podoby pro experiment, obráběcího stroje, použitých nástrojů vč. uchycení a měřících přístrojů pro stanovení výsledného opotřebení a v metodice (3.6) je toto stručně shrnuto.

Z výsledků měření a lze stručně uvést konečné hodnoty:

### Opotřebení nástrojů

Opotřebení nástrojů bylo měřeno na mikroskopu VK-X3000 (Obr.32). Popis zařízení a postup měření v kapitole 3.7.

Limitní hodnotou pro ukončení experimentu byla hodnota opotřebení  $V_{KRIT} = 600$   $\mu\text{m}$  pro nástroje HSS, pro tvrdokov pak 1 hodina strojního času.

Pro vzorek se skelným vláknem „JP“ a řeznými podmínkami  $n_1 = 250$  ot / min a posuvem  $f_1 = 25$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty opotřebení:

**HSS – Co:** opotřebení **614**  $\mu\text{m}$  za **13,2** min s dráhou nástroje **330** mm

**HSS – Co + TiN:** opotřebení **620**  $\mu\text{m}$  za **44,4** min s dráhou nástroje **1110** mm

**VHM - N:** opotřebení **72**  $\mu\text{m}$  za **60** min s dráhou nástroje **1.500** mm

Pro vzorek s čedičovým vláknem „**O**“ a řeznými podmínkami  $n_1 = 250$  ot / min a posuvem  $f_1 = 25$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty opotřebení:

**HSS – Co:** opotřebení **622**  $\mu\text{m}$  za **3,84** min s dráhou nástroje **96** mm

**HSS – Co + TiN:** opotřebení **605**  $\mu\text{m}$  za **7,68** min s dráhou nástroje **192** mm

**VHM - N:** opotřebení **197**  $\mu\text{m}$  za **60,16** min s dráhou nástroje **1.504** mm

Pro vzorek se skelným vláknem „**JP**“ a řeznými podmínkami  $n_1 = 500$  ot / min a posuvem  $f_1 = 50$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty opotřebení:

**HSS – Co:** opotřebení **619**  $\mu\text{m}$  za **12** min s dráhou nástroje **300** mm

**HSS – Co + TiN:** opotřebení **603**  $\mu\text{m}$  za **32,4** min s dráhou nástroje **810** mm

**VHM - N:** opotřebení **48**  $\mu\text{m}$  za **60** min s dráhou nástroje **1.500** mm

Pro vzorek s čedičovým vláknem „**O**“ a řeznými podmínkami  $n_1 = 500$  ot / min a posuvem  $f_1 = 50$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty opotřebení:

**HSS – Co:** opotřebení **602**  $\mu\text{m}$  za **6,4** min s dráhou nástroje **160** mm

**HSS – Co + TiN:** opotřebení **608**  $\mu\text{m}$  za **6,4** min s dráhou nástroje **160** mm

**VHM - N:** opotřebení **165**  $\mu\text{m}$  za **60,16** min s dráhou nástroje **1.504** mm

## **Delaminace**

Delaminace okrajů otvorů a délka volných vláken výztuže byla měřena na mikroskopu VK-X3000 (Obr.32). Popis zařízení a postup měření v kapitole 3.8.

Pro vzorek se skelným vláknem „**JP**“, vrtákem **HSS-Co**, řeznými podmínkami  $n_1 = 250$  ot / min a posuvem  $f_1 = 25$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **1.601**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **6.100**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek se skelným vláknem „**JP**“, vrtákem **HSS-Co**, řeznými podmínkami  $n_2 = 500$  ot / min a posuvem  $f_2 = 50$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **957**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **4.300**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek se skelným vláknem „**JP**“, vrtákem **HSS-Co+TiN**, řeznými podmínkami  $n_1 = 250$  ot / min a posuvem  $f_1 = 25$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **1.800**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **4.600**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek se skelným vláknem „**JP**“, vrtákem **HSS-Co+TiN**, řeznými podmínkami  $n_2 = 500$  ot / min a posuvem  $f_2 = 50$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **1.071**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **4.700**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek se skelným vláknem „**JP**“, vrtákem **VHM - N**, řeznými podmínkami  $n_1 = 250$  ot / min a posuvem  $f_1 = 25$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **1.258**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **4.500**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek se skelným vláknem „**JP**“, vrtákem **VHM - N**, řeznými podmínkami  $n_2 = 500$  ot / min a posuvem  $f_2 = 50$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **1.248**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **4.400**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek s čedičovým vláknem „**O**“, vrtákem **HSS-Co**, řeznými podmínkami  $n_1 = 250$  ot / min a posuvem  $f_1 = 25$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **72**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **795**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek s čedičovým vláknem „**O**“, vrtákem **HSS-Co**, řeznými podmínkami  $n_2 = 500$  ot / min a posuvem  $f_2 = 50$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **471**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **2.522**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek s čedičovým vláknem „**O**“, vrtákem **HSS-Co+TiN**, řeznými podmínkami  $n_1 = 250$  ot / min a posuvem  $f_1 = 25$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **852**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **2.722**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek s čedičovým vláknem „**O**“, vrtákem **HSS-Co+TiN**, řeznými podmínkami  $n_2 = 500$  ot / min a posuvem  $f_2 = 50$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **98**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **904**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek s čedičovým vláknem „O“, vrtákem **VHM - N**, řeznými podmínkami  $n_1 = 250$  ot / min a posuvem  $f_1 = 25$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **82**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **2.917**  $\mu\text{m}$

Pro vzorek s čedičovým vláknem „O“, vrtákem **VHM - N**, řeznými podmínkami  $n_2 = 500$  ot / min a posuvem  $f_2 = 50$  mm / min byly naměřeny tyto hodnoty:

maximální delaminace – **154**  $\mu\text{m}$  a maximální délka volného vlákna výztuže – **3.092**  $\mu\text{m}$

### **Ekonomické hledisko**

Byly sledovány náklady na pořízení vrtáku vztažené k jednotce opotřebení

**HSS – Co**: cena za opotřebení 1  $\mu\text{m} = 0,56$  Kč

**HSS – Co + TiN**: cena za opotřebení 1  $\mu\text{m} = 0,64$  Kč

**VHM – N**: cena za opotřebení 1  $\mu\text{m} = 1,72$  Kč

## 6. Závěr

Tato diplomová práce na téma „Obrábění kompozitních materiálů ve stavebnictví“ má pomoci k přispívání bližšímu seznámení s možnostmi obrábění těchto stále ještě ne zcela konvenčních materiálů v dané oblasti.

Práce obsahuje dvě hlavní části – teoretickou v úvodu a dále experimentální část.

Teoretická část se zabývá stručným výkladem o technologii vrtání do kompozitních materiálů, řezným podmínkám, nástrojům, jejich geometrii a průvodních jevů jako je delaminace kompozitního materiálu a opotřebení nástroje.

Experimentální část nás seznamuje s použitými materiály vzorků a dále s provedením a metodikou experimentu ve kterém nalezneme popis použitých strojů, nástrojů, měřících přístrojů a měřených a zkoumaných parametrů. Dále je tu samotný experiment s naměřenými hodnotami a jejich zpracování do tabulek a grafů.

Nedílnou součástí předkládané diplomové práce je diskuze a závěr.

Z naměřených hodnot a celého souboru vyplývá že:

1. Opotřebení nástroje je především závislé na jeho materiálu - volba kvalitního nástroje (v našem případě tvrdokovu) zásadně zvýší jeho životnost bez nutnosti výměny / přeastření a to bez ohledu na materiál vzorku tak i použité řezné podmínky - jejich změna měla pouzma malý vliv na snížení životnosti ostří nástroje. Kvalitativně z hlediska materiálu horší alternativa (v našem případě RO) má v porovnání výrazně menší životnost, které lze pomoci povlakováním. Změna řezných podmínek pro RO (z „250/25“ na „500/50“) mělo za následek další výrazné snížení životnosti a efekt povlaku se téměř stírá.

Tyto závěry se ještě znásobily s ohledem na použitý materiál vzorků - u „JP“ skelné vlákno a „O“ čedičové vlákno + křemičitý písek na povrchu, kde čedičové vlákno působilo výraznější větší opotřebení dané větší houževnatostí a odporem proti narušení oproti vláknu skelnému a povrchová vrstva rovněž napomáhala zvýšené míře opotřebení.



2. Delaminaci vzorků (okrajů otvorů) a délku volných vláken výztuže je třeba posuzovat pro každý zkoumaný vzorek (materiál) zvlášť.

- „JP“

Delaminace okrajů otvorů v materiálu se zvyšuje s opotřebením nástroje a stoupá s nižšími řeznými podmínkami. Výrazněji se to projevuje u RO oproti tvrdokovu.

Délka volných vláken výztuže je opět větší s nižšími řeznými podmínkami u RO, u tvrdokovu je tomu naopak.

U „JP“ se též výrazně projevuje nerovnoměrnost delaminace v okolí otvoru v materiálu daná orientací vláken výztuže, kde ve směru vláken je tato vyšší než ve směru kolmém na ni.

- „O“

Delaminace okrajů otvorů v materiálu se rovněž zvyšuje s opotřebením nástroje a stoupá s nižšími řeznými podmínkami u RO, u tvrdokovu je tomu naopak.

U „O“ se změna delaminace okraje otvoru daná orientací vláken výztuže takřka neprojevuje díky materiálu vzorku (především materiálu výztuže) a jeho zpevnění křemičitým pískem. V tomto případě je významným faktorem možnost vyštípnutí zrn na povrchu.

Délka volných vláken výztuže je opět větší s nižšími řeznými podmínkami jak u RO tak i u tvrdokovu.

3. Ekonomické hledisko stejně jako u zkoumaného parametru opotřebením nástroje a vzniklé delaminaci je výrazně příznivější u kvalitního materiálu nástroje (v našem případě tvrdokovu) oproti jeho horší alternativě (v našem případě RO) i přes přibližně 3 x vyšší cenu nástroje.

V souhrnu z experimentu a jeho výsledků vyplývá, že pro vrtání kompozitních materiálů je rozhodně výhodnější použití kvalitního nástroje (vrtáku) – v našem případě tvrdokov - z důvodů jeho výrazně nižšího opotřebením a vyšších hodnot u řezných podmínek (otáčky i posuv) z důvodů menších hodnot delaminace a délek volných vláken výztuže.

Pokud bude použito řezných nástrojů (vrtáků) na bázi RO, pak určitě využít materiálů povlakovaných a nižších řezných podmínek (otáčky i posuv), to se projeví na uspokojivé životnosti nástroje i přes o něco horších hodnot u delaminace a délce volných vláken výztuže.

## Seznam použité literatury

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [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] Firemní materiály fa Orlitech. *Tyče*.  
Dostupné z: <https://orlitech.cz/tyce/>
- [4] Firemní materiály Jordahl & Pfeifer. *Kompozitní výztuž FIBERNOX V-ROD – Smykový trn s hladkým povrchem*.  
Dostupné z: <https://pohlcon.cz/produkty/vyztuzovani/kompozitni-vyztuz-fibernox-v-rod>
- [5] Norbert Geier, J. Paulo Davim, Tibor Szalay. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing [online]. 2019. ISSN 1359-835X.  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X1930301X>
- [6] PLÁNIČKA, František. PKD nástroje pro efektivní obrábění kompozitů [online]. 2018 [cit. 2023-05-14].  
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pkd-nastroje-pro-efektivniobrabenikompozitu>
- [7] HUMÁR, Anton. Technologie obrábění – 2. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2004 [online]. [cit. 2023-05-14].  
Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obraben/studijni-opory/TI\\_TO2cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obraben/studijni-opory/TI_TO2cast.pdf)
- [8] NEJMAN, Dominik. Studie vhodných řezných nástrojů pro vrtání do kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní
- [9] YuanXiao Li, Feng Jiao. Research on entrance delamination characteristics and damage suppression strategy in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks [online]. [cit. 2023-05-14].  
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612522001086>

- [10] AUTOR NEUVEDEN. DTB Technologie obrábění Téma 7 VRTÁNÍ, VYVRTÁVÁNÍ, VYHRUBOVÁNÍ, VYSTRUŽOVÁNÍ A ZAHLUBOVÁNÍ. [online]. [cit. 2023-05-14].  
Dostupné z: <https://www.slideserve.com/dawson/dtb-technologie-obr-b-n-t-ma-7-vrt-n-vyvrt-v-n-vyhrubov-n-vystru-ov-n-a-zahlubov-n>
- [11] SEDLÁČEK, Jan. Problémy při obrábění kompozitních materiálů. MM Spektrum [online]. Brno, 2007, 2007(4) [cit. 2023-05-14].  
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabenikompozitnich-materialu.html>
- [12] AUTOR NEUVEDEN. Problémy při obrábění kompozitních materiálů [online]. [cit. 2023-05-14].  
Dostupné z: [https://www.secotools.com/article/p\\_02827933?language=en](https://www.secotools.com/article/p_02827933?language=en)
- [13] AUTOR NEUVEDEN. Cesty ke zvýšení efektivnosti obráběcích strojů [online]. [cit. 2023-05-14].  
Dostupné z: [https://www.technickydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-obrabecich-stroju\\_36427.html](https://www.technickydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-obrabecich-stroju_36427.html)
- [14] AUTOR NEUVEDEN. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [online]. [cit. 2023-05-14].  
Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>
- [15] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů [online]. Brno, 2008 [cit. 2023-05-14].  
Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=83340](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340)
- [16] Vrtání [online]. [cit. 2023-05-14].  
Dostupné z: <https://www.slideserve.com/indira-cunningham/vrt-n>
- [17] COLLIGAN, K.; RAMULU, M. Delamination in surface plies of graphite/epoxy caused by the edge trimming process. In: Processing and Manufacturing of composite materials. 1991. p. 113-125.
- [18] AUTOR NEUVEDEN. 5. Měření opotřebení nástrojů [online]. [cit. 2023-05-14]  
Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_05.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf)

## **Seznam příloh**

Příloha č.1: 1 x DVD