



Řezné nástroje pro hospodárné soustružení kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Jaroslav Horák**
Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav Horák**
Osobní číslo: **S16000298**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Řezné nástroje pro hospodárné soustružení kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny**
Zadávací katedra: **Katedra obrábění a montáže**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Shrnutí dosavadních poznatků o kompozitních materiálech na bázi reaktoplastů a o obrábění těchto materiálů zpevněných (nejen) uhlíkovými vlákny. Shrnutí poznatků o technologii soustružení.
2. Volba řezných nástrojů a řezných podmínek.
3. Návrh metodiky experimentů v rámci volby vhodného řezného nástroje pro soustružení kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny - studie z hlediska opotřebení řezného nástroje, teplot a sil při obrábění, tvorby třísky, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu a celkové integrity obroběného povrchu.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje, teplot a sil při obrábění, tvorby třísky, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu a celkové integrity obroběného povrchu.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací: **Obrázky, tabulky a grafy - dle potřeby.**

Rozsah pracovní zprávy: **Cca 60 - 70 stran textu.**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- 1. LIDAŘÍK, M. a kol. *Epoxidové pryskyřice*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983. 732 s.**
- 2. KOČMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.**
- 3. 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.**
- 4. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.**
- 5. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. *Jakost obráběných povrchů*. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.**


Katedra obrábění a montáže

Konzultant diplomové práce: **Ing. Miloslav Ledvina**


Katedra obrábění a montáže

Datum zadání diplomové práce: **20. listopadu 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 20. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, 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 (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: **KOM 1295**

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav Horák**

Vedoucí práce: Doc. Ing. Štěpánka Dvořáčková
Konzultant: Ing. Ph.D. Miloslav Iedvina

Počet stran: 80
Počet příloh: 6
Počet tabulek: 51
Počet obrázků: 35
Počet diagramů: 24

Řezné nástroje pro hospodárné soustružení kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny

ANOTACE:

Obsahem diplomové práce je výzkum vlivu kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny na dané nástrojové materiály. Za nástrojové materiály byly zvoleny: rychlořezná ocel, slinutý karbid, slinutý karbid s povlakem TiN a řezná keramika. Nedílnou součástí výzkumu je zhodnocení výsledků experimentálních měření a volba neoptimálnějšího nástroje pro soustružení těchto materiálů se specifickými vlastnostmi.

Klíčová slova: SOUSTRUŽENÍ, KOMPOZITNÍ MATERIÁLY, NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY, OPOTŘEBENÍ

Tool materials for economical turning of carbon fibre reinforce polymers

ANNOTATION:

The content of my thesis is to research influence of carbon fibre reinforce polymers on tooling materials. As tooling materials have been chosen: high speed steel, sintered carbide, sintered carbide coated by TiN and ceramic. Part of research is evaluation of experiments results and selection of the most optimal tool.

Key words: TURNING, COMPOSITE MATERIALS, TOOL MATERIAL, TOOL WEAR

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat zejména Doc. Štěpánce Dvořáčkové, za věcné rady a pomoc při zpracování diplomové práce.

Dále děkuji panu Ing. Ledvinovi za rady, konzultace a pomoc při provádění experimentů a panu Ing. Servinskému za výpomoc v laboratoři.

Zároveň bych chtěl poděkovat paní Doc. Doře Kroisové za pomoc při tvorbě a odlévání vzorků pro měření.

V neposlední řadě děkuji Lucii Matouškové za podporu a korekturu textů.

Obsah

1. ÚVOD	8
2. SOUČASNÝ STAV	10
2.1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	10
2.1.1. Charakteristika matrice	11
2.1.2. Polymerní matrice.....	12
2.1.3. Charakteristika výztuže.....	13
2.2. PROBLEMATIKA SOUSTRUŽENÍ.....	15
2.2.1 Obrábění CFRP.....	19
3. METODIKA MĚŘENÍ A HODNOCENÍ EXPERIMENTŮ	21
3.1 PŘÍPRAVY SMĚSÍ A FOREM.....	21
3.2 VOLBA NÁSTROJŮ A ŘEZNÝCH PODMÍNEK	24
3.3 OBROBENÍ VZORKŮ	26
3.4 MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL.....	27
3.5 MĚŘENÍ DRSNOSTI	29
3.6 MĚŘENÍ ROZMĚROVÉ PŘESNOSTI.....	30
3.7 MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ.....	30
3.8 MĚŘENÍ TEPLoty.....	30
4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	32
4.1 ŘEZNÉ SÍLY	32
4.2 POVRCHOVÁ DRSNOST.....	37
4.3 ROZMĚROVÁ PŘESNOST.....	42
4.4 OPOTŘEBENÍ	47
4.5 PROCESNÍ TEPLoty.....	52
4.6 TVORBA TRÍSKY.....	57
5. DISKUZE	62
6. ZÁVĚR	73
7. ZDROJE:	75
8. SEZNAM OBRÁZKŮ	77
9. SEZNAM TABULEK	79

Seznam symbolů a zkratk

ZKRATKA/SYMBOL	JEDNOTKY	NÁZEV
E	[Pa]	Modul pružnosti
σ	[Pa]	Mechanické napětí
F_c	[N]	Řezná síla
k_s	[N/mm ²]	Měrná řezná síla
A_D	[mm ²]	Průřez třísky
f_{ot}	[mm]	posuv na otáčku
a_p	[mm]	hloubka záběru
$k_{s1.1}$	[N/mm ²]	měrná řezná síla pro 1 mm třísky
m	[-]	Kienzleho exponent
n	[1/min]	otáčky
dsk	[-; %]	jednotka plnění užívaná v gumárenském průmyslu
CFRP		carbon fibre reinforce polymer
RO		rychlořezná ocel
SK		slinutý karbid
SKS		slinutý karbid s povlakem TiN
KER		řezná keramika
KONST.		konstantní podmínky obrábění
IP		ideální podmínky obrábění
VBD		vyměnitelná břitová destička

1. Úvod

Nároky na materiály, součásti nebo konstrukce každým dnem rostou a tlačí na výzkum nových technologií. Součástí tohoto vývoje je i následující diplomová práce na téma Řezné nástroje pro hospodárné soustružení kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny.

Kompozit na bázi reaktoplastu s uhlíkovými vlákny je materiálem se specifickými atributy. Spojením dvou různých materiálů dochází ke kombinaci vlastností a zvýšení potenciálu jejich využití. Pokud nebudou známy vlivy těchto materiálů na proces obrábění, nikdy nebudeme schopni zcela tyto materiály využít a jejich potenciál zanikne.

Vlivů ovlivňujících proces obrábění je nekonečně mnoho, předkládaná diplomová práce se zabývá tvorbou třísky, procesními teplotami, opotřebením nástrojových materiálů, průvodními silami a výslednou drsností povrchu. Tyto parametry patří mezi nejdůležitější v soustavě nástroj - obrobek a mají přímý vliv na hospodárnost výroby a ekonomiku podniku. Má-li se stát obrábění těchto materiálů stabilní složkou výroby, tak musejí být vhodně zvoleny technologické podmínky, aby nedocházelo k neekonomickému zacházení se zdroji a materiály.

Každý nástrojový materiál má své klady i zápory a nabídka nástrojů je v současné době nevyčerpatelná. Je proto obtížné volit zástupce jednotlivých tříd nástrojových materiálů tak, abychom dosahovali nejvyšších vypovídacích hodnot a splňovaly únosné pořizovací náklady. Z těchto důvodů byly zvoleny 4 nástrojové materiály: rychlořezná ocel, slinutý karbid, slinutý karbid s povlakem TiN a řezná keramika.

Na nástroji s vyměnitelnou břitovou destičkou (VBD) z daných materiálů byly zkoumány vlivy při soustružení kompozitních materiálů na bázi reaktoplastu s uhlíkovými vlákny bez vnitřního uspořádání. Experimenty probíhaly nezávisle na sobě v prostorech laboratoří Technické Univerzity v Liberci na stroji SU-50 bez procesních kapalin.

Diplomová práce je rozdělena do tří základních částí: teoretické, experimentální a závěrečné.

V teoretické části je věnována pozornost rozboru kompozitních materiálů, jejich vlastnostem a dosavadním poznatkům získaných při obrábění. Celá teoretická část vychází z odborné literatury a vědeckých článků publikovaných v tiskové formě a na internetu.

Experimentální část popisuje přípravu experimentů a jejich výsledky. Zabývá se přípravou licích směsí, tvorbou odlitků, volbou rezných nástrojů a podmínek. Dále popisuje stroje a zařízení, které byly využity v rámci měření.

Závěrečná část zhodnocuje a diskutuje výsledky získané v rámci výzkumu.

2. Současný stav

Kompozitní materiály s matricí na bázi reaktoplastu se řadí do skupiny se zvláštními vlastnostmi. Jejich obrábění je odlišné od konvenčních materiálů a nároky na nástroj jsou vyšší. Zvláště jedná-li se o kompozitní materiál na bázi polymeru s uhlíkovými vlákny. Uhlíková vlákna vykazují vysokou tvrdost a opotřebení nástroje se stává významnou součástí procesu obrábění. Materiálové a technologické vlastnosti nejen těchto materiálů jsou popsány v kapitole 2, současný stav. [1, 4, 11]

2.1. Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více fází chemicky odlišných látek. Fáze plnicí funkci pojiva se nazývá matrice. Fáze, zpravidla s vyšší tvrdostí, která se do matrice přimíchává, se nazývá výztuž. [1]

Vyztužující fáze dosahuje různých rozměrů, a proto se materiály dělí dále na makro a mikrokompozity. [1, 4]

Makrokompozity se ve strojírenství prakticky nevyskytují, ale jsou často využívány ve stavebnictví. Příkladem makrokompozitu je například železobeton vyztužený ocelovými pruty nebo polymerbeton obsahující drcené kamenivo nebo písek [1]



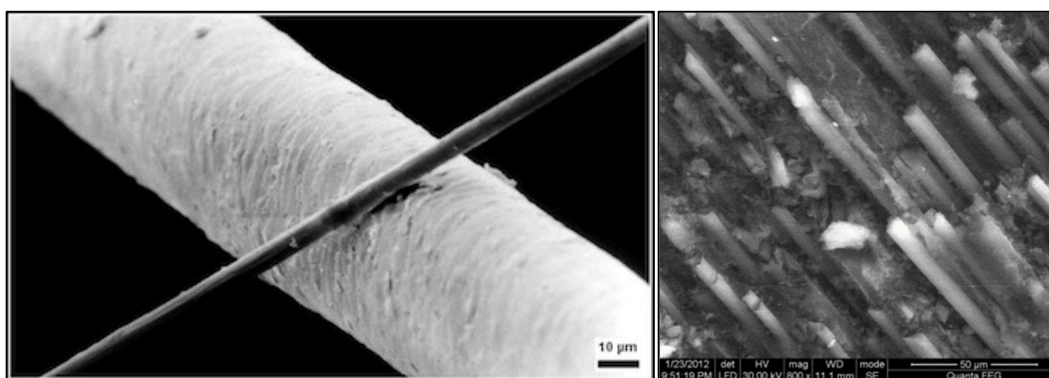
Obrázek 1: Makrokompozit [8]

Pro označení mikrokompozit musí výztuž dosahovat rozměrů od 1 do 100 μm , takto malé rozměry přináší nejen kladné vlastnosti, jako jsou zvyšující se mechanické

vlastnosti kompozitu, ale i nepříznivé technologické vlivy, které znesnadňují jejich zpracování. [1]

Mikrokompozity můžeme dále dělit podle materiálu matrice na polymerní, kovové, uhlíkové, skleněné, sklokeramické a keramické. Nebo podle výztuže na vláknové kompozity s kontinuálními vlákny či krátkými vlákny, nebo částicové kompozity se sférickými částicemi (izometrickými) nebo destičkovými částicemi (anizometrickými). [1]

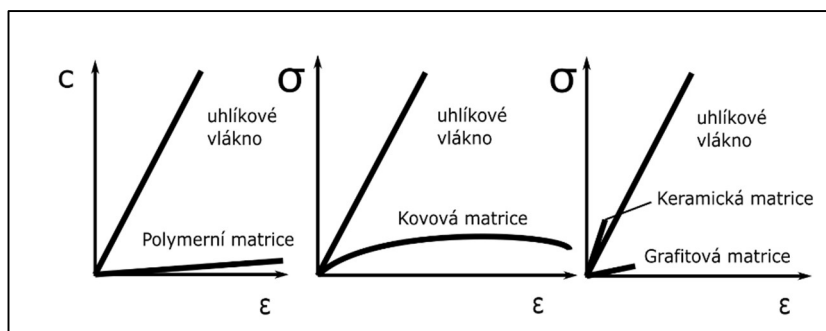
Výhodou je snadná aplikace do základního materiálu a jednoduchá kontrola přidávaného množství. Nevýhodou je drahá výroba a prašnost materiálu. Takto malé částičky zanášejí nejen pohyblivé součásti strojů, ale také se snadno dostávají do dýchacích cest pracovníků. Proto je nutné pracovat s ochrannými pomůckami. [1, 4]



Obrázek 2: Vlevo: Porovnání uhlíkového vlákna s lidským vlasem, vpravo: uhlíková vlákna v matrici [7]

2.1.1. Charakteristika matrice

Matrice kompozitu slouží jako pojivo a tuto funkci si musí udržet i při poruchách výztuže, proto musí být mezní tahové prodloužení matrice větší než u vláken. Tyto požadavky však splňují jen určité matrice, které se tak stávají v praxi nejpoužívanějšími. Jsou to matrice polymerní a kovové. Keramické, sklené, sklokeramické a uhlíkové matrice mají mezní prodloužení při lomu menší než vlákna, a proto se využívají zřídka. [4]



Obrázek 3: Prodloužení matric a plniv

2.1.2. Polymerní matrice

Jak bylo zmíněno výše, matrice vykonává mnoho funkcí ovlivňujících vlastnosti kompozitu. Nejdůležitějšími funkcemi jsou držení vlákna v pozici, distribuce napětí, ochrana vlákna před abrazí, chemická a elektrická stálost nebo zajištění interlaminární pevnosti. [4]

Pro účely této diplomové práce byla zvolena epoxidová pryskyřice s obchodním označením ChS Epoxy 15. V tabulce 1 lze porovnat vlastnosti různých druhů pryskyřic.

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti pryskyřic [4]

Druh pryskyřice	Epoxidová	Polyesterová	Fenolová	Polyimidová
Modul pružnosti E_m [MPa]	4500	4000	3000	4000 až 19000
Modul pružnosti ve smyku G_m [MPa]	1600	1400	1100	1100
Pevnost v tahu δ_{pm} [MPa]	130	80	70	70
Hustota ρ [kg/m ³]	1200	1200	1300	1400
Maximální teplota T_{max} [°C]	90 až 200	60 až 100	120 až 200	250 až 300
Poissonova konstanta [-]	0,40	0,40	0,40	0,35

Základní charakteristikou licích epoxidů je viskozita závislá na stupni plnění, době zpracovatelnosti, druhu tvrdidla, teplotě a namíchaným množstvím. Na vytvrzující reakci je zase závislé vnitřní pnutí, které je zdrojem nepřesnosti lití a zmetků. [6]

Viskozita je základní technologickou vlastností a přímo ovlivňuje kvalitu odlitku a zmetkovitost výroby. Nelze určit hraniční úroveň viskozity, jelikož se musejí brát v potaz technologické podmínky lití jako například teplota, tlak nebo členitost formy. Se zvyšující se viskozitou během procesu lití se zvyšuje riziko, že dutina formy nebude zcela a homogenně vyplněna, protože hmota nezateče, nebo vzduch již z formy nestačí uniknout. Zvláště u lití za studena dosahuje viskozita vysokých hodnot a je zde značné riziko zmetkovitosti. [6]

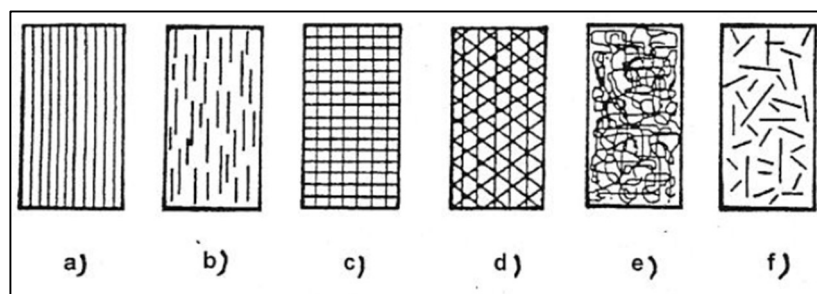
Smrštění při vytvrzování doprovází změna objemu vlivem chladnutí. Výsledné smrštění je závislé především na rozdílu teplot a koeficientu teplotní roztažnosti. Průběh vytvrzování je proto řízen a plánován s ohledem na konečný výsledek jelikož smrštění odlitku má zásadní vliv na velikost napětí. [6]

Dalším členem ovlivňující smrštění jsou výztuže. Tyto přidávané drtě, vlákna či textilie mají pozitivní vliv na mechanické vlastnosti a značně omezují smrštění. [6]

2.1.3. Charakteristika výztuže

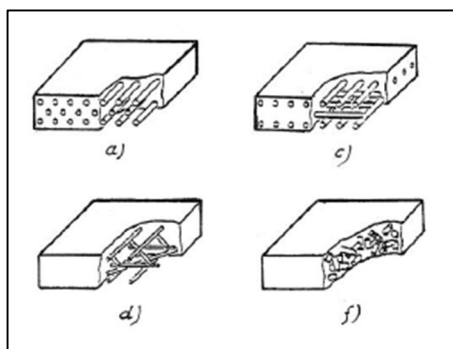
Výztuž může nabývat různých tvarů a orientací. Tyto atributy pak mají značný vliv na vlastnosti materiálu a proto je nutné se touto problematikou zabývat. (mechanika kompozitů) [4, 1]

Nosné části neboli výztuže jsou vláknové, částicové nebo skeletové. Jednotlivé typy vláknových kompozitů se pak rozlišují: [1]



Obrázek 4: 2D orientace uhlíkových vláken - a) Jednosměrná dlouhá vlákna b) Jednosměrná krátká vlákna c) Dvousměrné vyztužení d) Vícesměrné vyztužení e) Náhodná orientace krátkých e) Náhodná orientace dlouhých [1]

Uspořádání lze pro představu znázornit i prostorově viz obrázek 5:



Obrázek 5: Orientace 3D uhlíkových vláken [1]

Největší rozdíl mezi vláknitými a částicovými kompozity je v jejich mechanických vlastnostech. Pevnost vláken je nepřímo úměrná průřezu, protože nedokonalosti struktury jsou u vláken malých průměrů také malé. Navíc jsou příznivě orientované svým delším rozměrem ve směru osy vlákna. [4]

Pevnost vlákna závisí také na jeho délce. Části vzniklé porušením vlákna při tahovém namáhání mají větší pevnost než vlákno původní, protože k prvnímu lomu došlo v místě největšího defektu. Vlákná mají kruhový průřez o průměru od 5 do 20 μm . Menší průměry se nepoužívají z technologických důvodů, jelikož produkty s velmi tenkými vlákny se obtížně prosycují základním materiálem. [4]

Tabulka 2: Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů [4]

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Skleněné vlákno typu E	73	2500
Sklovina typu E	73	100
Uhlíkové vlákno	230 až 950	2000 až 6000
Polykrystalický grafit	10	20
Keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
Polyethylenové vlákno	90 až 170	3000
Lineární polyethylen	0,40	26

Teoreticky lze smísit libovolnou matici s libovolnými vlákny, v praxi je však nutné dodržovat určité zásady. Například polymerní matrice se nevytuzuje kovovými nebo keramickými vlákny. Nejedná se pouze o finanční stránku věci, ale také o určité

znehodnocení matrice přidáním vláken o větší hustotě. Stejně tak se do kovových a keramických maticí nepřidávají výztuže s nízkou tepelnou a chemickou odolností. Rozlišujeme proto vlákna pro polymerní matrice (skleněná, uhlíková, polymerní) a vlákna pro vysokoteplotní aplikace (uhlíková, keramická, kovová). [1,4]

Důležitým parametrem výroby kompozitních materiálů s výztužemi je velikost částic. Částice by neměly být příliš velké, aby nesnižovaly pevnost, ale ani příliš jemné, aby se snadněji dosahovalo rovnoměrného rozptýlení v matrici. [4]

Nejvhodnější rozměr pro kulové částice je 1 až 10 μm , takto velké částice jsou označovány za tzv. velké částice. Částice, které mají anizometrický tvar (destičky, jehlice, disky) pak matrici nejen vyztužují, ale také výrazně zpevňují a označují se jako tzv. aktivní částice. [4]

2.2. Problematika soustružení

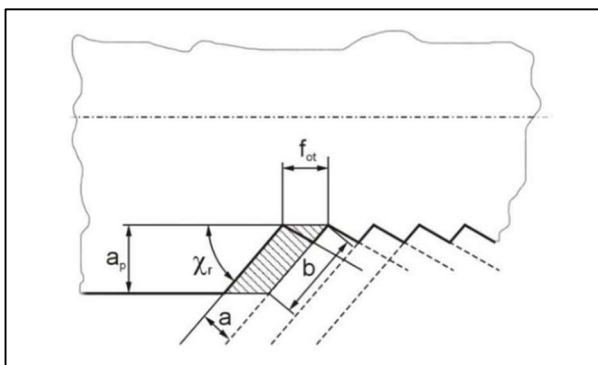
Soustruhy jsou jedny z nejdůležitějších obráběcích strojů a ve strojírenství jsou zastoupeny nejhojněji. Soustruží se rotační součásti při hlavním pohybu (rotaci) obrobku a vedlejším pohybu (podélný posuv, příčný přísuv) řezného nástroje. Rozdělují se podle způsobu upínání na hrotové, svislé, revolverové, čelní a speciální. [9, 10]



Obrázek 6: Soustružení [14]

Nástrojem je jednobřítý nůž se členitým povrchem pro vhodnou tvorbu třísky. Je mnoho skupin, podle kterých můžeme dělit nástroje. Nejvýznamnější rozdělení se provádí dle řezného materiálu, nástrojových úhlů, upnutí ve stopce, atd. [9]

Při obrábění stlačuje břit obráběný materiál a deformuje ho. Z části pružně, z části trvale. Během procesu působí nástroj na obrobek silou v závislosti na hloubce záběru, posuvu, otáčkách a dalších vlastnostech. Stanovení řezných sil vyjadřuje Kienzleho vztah, který vychází z měrné řezné síly nebo z empirických vztahů. [9, 10, 13]



Obrázek 7: Průřez třísky [13]

Řezná síla se vyjadřuje jako součin měrné řezné síly k_s a plochy řezu (průřezu třísky) A_D [13]:

$$F_c = k_s \cdot A_D \quad (2.2.1)$$

Kde plocha řezu vychází z technologické operace. Záleží na tvaru destičky, posuvu a hloubce záběru. Pro případ viz obrázek 7 se plocha řezu A_D určí jako:

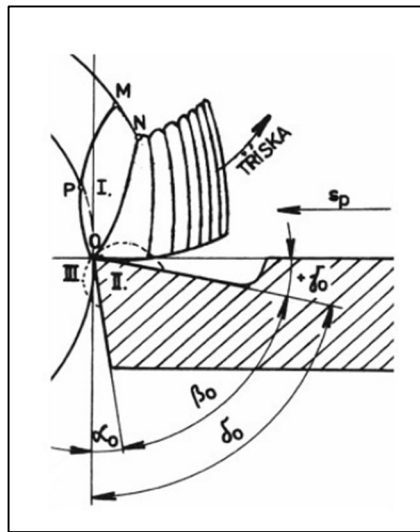
$$A_D = f_{ot} \cdot a_p = a \cdot b \quad (2.2.2)$$

Měrná řezná síla je nepřímo úměrná tloušťce třísky a upravené Kienzlovým exponentem m .

$$k_s = k_{s1.1} \cdot a^{-m} \quad (2.2.3)$$

Kde $k_{s1.1}$ je měrná řezná síla pro tloušťku třísky 1 mm

Práce spojená s vznikem trvalé složky deformace se mění v teplo. [14]



Obrázek 8: Třískové obrábění – I Oblast primární plastické deformace, II Sekundární plastická deformace, III Terciální plastická deformace [8]

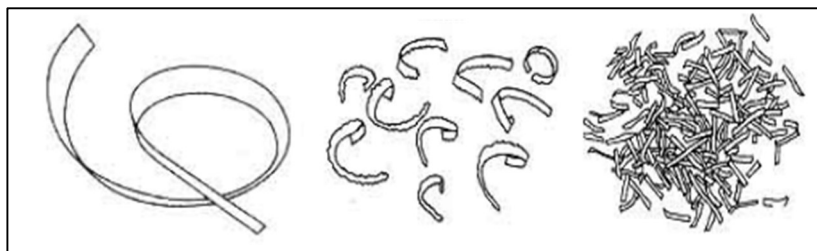
Vzniklé teplo odchází z 85 % do třísky, 8 % do nástroje, 5 % do obrobku a 2 % do okolí. [8]



Obrázek 9: Tepelná bilance soustružení bez procesních kapalin

Velmi však záleží na prostředí a podmínkách, ve kterých se obrábí. Například zapojením chladicí kapaliny do procesu tepelnou bilanci významně ovlivníme. [8,10, 15]

Jelikož se soustružení řadí mezi třískové obrábění tak lze proces hodnotit i druhem třísek. Je-li tříska plynulá, znamená to obrábění měkkého, houževnatého materiálu a pro svou délku je nežádoucí. Tříska kratších délek se označuje za článkovitou a objevuje se u tvrdých a tvárných materiálů. Tříska se láme z obrobku a odchází per partes. Z hlediska obrábění se jedná o nejpříznivější třísku. Poslední kategorií je tříska drobná, která se vyskytuje u tvrdých a křehkých materiálů. Lze odstranit modifikací nástroje (lamač za břitem). [8, 10]



Obrázek 10: Druhy třísek – a) plynulá b) článkovitá c) drobná [15]

Další výraznou vlastností doprovázející proces obrábění je opotřebení břitu nástroje. Jedná se o velmi důležitou složku nejen výrobního procesu, ale i ekonomiky výroby. Opotřebování doprovází dále zhoršování drsnosti čela i hřbetu nástroje a zvětšuje se poloměr ostří. [15, 16]

Abrazivní (brusný) otěr je způsoben mikročásticemi obrobku, který je tvrdší než materiál břitu. Adhezní (přilnavý) otěr vzniká dotykem čela nástroje s obrobkem, při kterém vznikají mikrosváry. Difúzní otěr je zapříčiněn prolínáním se krystalografických mřížek. Nástroje jsou namáhány také křehkými lomy a plastickou deformací. [16]



Obrázek 11: Opotřebení špičky nástroje [16]

Opotřebování břitu je ovlivněno vlastnostmi obrobku a nástroje, řeznými podmínkami (především řeznou rychlostí), řeznými úhly a řezným prostředím. Zároveň je opotřebování břitu důležitým faktorem souvisejícím s výslednou drsností povrchu. [16]

2.2.1 Obrábění CFRP

Obrábění CFRP (polymeru s uhlíkovými vlákny) se věnuje několik vědeckých prací, avšak většina se zabývá technologií vrtání, nikoli soustružení. Na téma soustružení CFRP vzniklo minimum prací a žádná z nich se nevěnuje opotřebením nástrojových materiálů. Přitom je to jeden z nejdůležitějších parametrů procesu obrábění, který má zásadní vliv na hospodárnost procesu a ekonomiku výroby. [4, 9]

Vrtání těchto materiálů je již ustáleným jevem ve vývoji a opotřebením vrtáků je relativně dobře zmapovaný obor. Existují studie zabývající se vrtáním jak CFRP tak polymerů s jinými plnivými a jejich vliv na opotřebením nástroje. [1, 2]

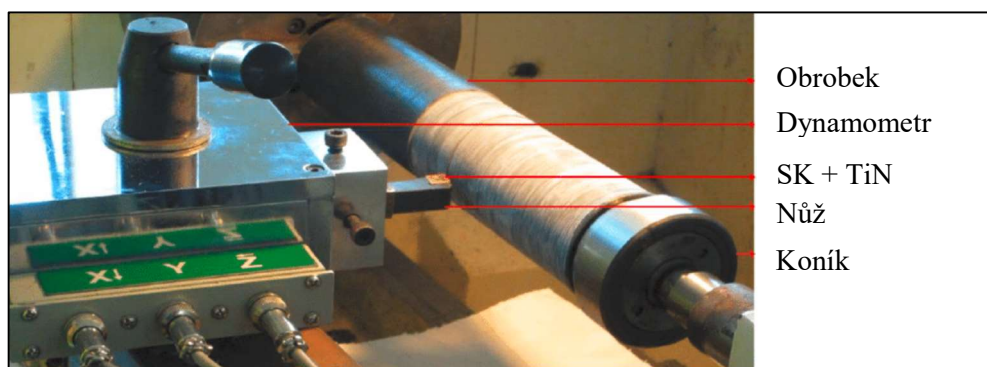
V roce 2014 byla prezentována práce francouzského vývojového ústavu CIRP o vrtání polymeru na bázi reaktoplastu s uhlíkovými vlákny, zaměřující se na opotřebením nástroje, vrtáku ze slinutého karbidu K20. [2]

Vrtákem o průměru 12 mm s úhlem špičky 140° byli vrtány díry do CFRP T800M21 bez přítomnosti procesních kapalin, řeznou rychlostí 100 m/min a posuvu 0,05 mm/ot. Po vyvrtání každé díry byla zkoumána opotřebením na daných poloměrech vrtáku a následně vyhodnocena opotřebením v závislosti na počtu děr. [2]

CFRP se řadí mezi těžko obrobitelné materiály právě vlivem vysokého opotřebením nástroje. Proces soustružení tohoto materiálu mapovali další studie, které

se ovšem zaměřují spíše na silové působení během procesu nebo výslednou drsnost povrchu. [3, 5]

Na mezinárodní konferenci o vědě, strojírenství a technologii v roce 2014 ve Valloire byla prezentována práce zabývající se silovými účinky během procesu soustružení a vlivem parametrů na řezné síly. Břitovou destičkou CCMT 09T304 ze slinutého karbidu s povlakem TiN byl soustružen CFRP odlitek ve tvaru válce. [3]



Obrázek 12: Měření sil při soustružení CRFP [3]

Soustružení probíhalo bez procesních kapalin za různých podmínek a dynamometr zaznamenával hodnoty působících sil. Výsledky tohoto výzkumu poukazují na nepřímou úměru řezné síly a otáček, narůstající vibrace vlivem vysokých otáček obrobku a s tím spojenou nízkou kvalitou výsledného povrchu. [3]

Studie zabývající se drsností povrchu při obrábění CRFP vznikla v roce 2013 v Nirmě. Odlitek ve tvaru válce byl soustružen kubickým nitridem boru (CBN) za různých podmínek a pomocí Taguchiho metody byla vyhodnocena finální drsnost. [5]

Výsledky ukazují značný vliv řezné rychlosti a posuvu a naopak malý vliv hloubky záběru na výslednou drsnost obrobenej plochy [5]

3. Metodika měření a hodnocení experimentů

Metodika měření se zabývá popisem přípravy směsí a vzorků pro experiment, přípravě odlitků pro soustružení, volbě nástrojů a řezných podmínek, popisem a přípravou jednotlivých strojů, přístrojů a zařízení

Všechny přípravy a experimenty probíhali v prostorech laboratoří Technické Univerzity v Liberci

3.1 Přípravy směsí a forem

Měření probíhalo na vzorcích o rozměrech $\varnothing 40 \times 100$ mm. Vzorek byl soustružen s hloubkou záběru 1 mm.

Vzorky z kompozitního materiálu se skládaly z polymerní matrice, kterou byla epoxidová pryskyřice. Ta byla plněna různými obsahy uhlíkových vláken a následně byl zkoumán jejich vliv na proces obrábění. Plniva byla přidávána v hodnotách uvedených v tabulce 3:

Tabulka 3: Plnění vzorků

Označení vzorku	Hodnota dsk
N/A	0 dsk
10	10 dsk
20	20 dsk
30	30 dsk
40	40 dsk

Jednotka dsk udává poměr pryskyřice a plniva. Např. 10 dsk odpovídá 10 g plniva ve 100 g pryskyřice.

Jako matrice byla zvolena epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 520 (EPOXY 15). Tato pryskyřice má pro své dobré vlastnosti mnohá uplatnění, a proto se může používat pro odlévání, impregnaci, zalévání nebo například lepení.

Vlastnosti uváděné výrobcem viz tabulka 4:

Tabulka 4: Vlastnosti epoxidové pryskyřice [18]

Vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Barva	[-]	Lehce nažloutlá
Hustota	[g.cm ⁻³] při 20 °C	1,16 až 1,17
Viskozita	[Pa.s] při 25 °C	12,0 až 14,5
Obsah epoxidových skupin	[mol.kg ⁻¹]	5,2 až 5,5
Epoxidový hmotnostní ekvivalent	[g.mol ⁻¹]	182 až 192

Pro vytvrzení pryskyřice bylo použito tvrdidlo P11 při hmotnostním poměru 110:11 a při objemovém poměru 100:13,5 (pryskyřice : tvrdidlo). Toto tvrdidlo se označuje za tzv. rychlé tvrdidlo s krátkou dobou zpracovatelnosti a dolepem na povrchu vzorku, který se odstraňuje omytím vzorku v 3 % roztoku kyseliny citronové. Následně se vzorek musí omýt ve vodě a osušit. [18]

Jako plnivo byla použita uhlíková vlákna CarbisoTM MF od výrobce Easy Composites Ltd. Jejich vlastnosti shrnuje tabulka 5. [19]

Tabulka 5: Vlastnosti uhlíkových vláken [19]

Vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Obsah vláken	[%]	95
Průměr vlákna	[μm]	7
Délka vlákna	[μm]	80 až 100
Celková hustota	[g.l ⁻¹]	400
Kontaminace kovem	[g/g]	< 0,5/1000

Do odváženého množství epoxidové pryskyřice bylo přidáno odvážené množství recyklovaných uhlíkových vláken. Vlákna byla vmíchávána do matrice ručně, dokud nedošlo k homogennímu promíchání směsi. Poté byla směs ponechána v klidu po dobu 24 hodin, aby unikly bubliny, které byly vmíchány do směsi během zpracování. Po odležení se do směsi přidalo adekvátní množství tvrdidla P11 podle návodu výrobce. Po přidání tvrdidla byla směs míchána po dobu 3 minut a následně vlita do připravené formy.



Obrázek 13: Směs s plnivem

Forma byla naplněna s mírným přesahem z důvodu zamezení nedolití formy. Po odlití byly odlitky umístěny do stálé teploty $23 \pm 2^\circ\text{C}$ a nechaly se odležet (stárnout) po dobu deseti dnů. Za tento čas došlo k dokonalému utuhnutí odlitků a výraznému navýšení rozměrové stability.

Při prvních pokusech byla směs odlévána do formy ze silikonové pryže avšak důsledkem špatného odvodu tepla a rychlého náběhu chemické reakce docházelo ke spálení vzorků, viz obrázek 14.



Obrázek 14: Spálené vzorky čisté pryskyřice

Z tohoto důvodu musela být vyrobena čtyřdílná duralová forma s dutinou $\varnothing 40 \times 100$ mm. Duralová forma vykazuje dobré vodivé vlastnosti a tak po odlití do této formy nedocházelo k degradaci vzorků. Tento technologický postup se osvědčil a tak bylo možné odlít vzorky s různými hodnotami plnění.



Obrázek 15: Odlitky

3.2 Volba nástrojů a řezných podmínek

Během obrábění materiálů CFRP jsou kladeny vysoké nároky na nástroje. Abraze vlivem uhlíkových vláken je velmi vysoká, a proto dochází během procesu k výraznému opotřebování nástrojů. [11]

Pro co největší zisk informací byly vybrány nástrojové materiály s co nejširší materiálovou škálou.

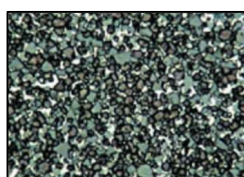
Prvními jsou destičky z rychlořezné oceli. Pro výrobu těchto VBD byl použit polotovar z Poldiny Hutě.



Obrázek 16: Polotovar HSS

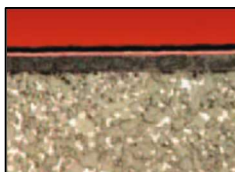
Polotovar z materiálu ČSN 223693 HSS byl vyfrézován do tvaru TPUN 160304 a následně mu byly vybroušeny úhly špičky nástroje.

Druhým materiálem byl slinutý karbid s obchodním označením S26 ve tvaru TPUN 160304. Tento materiál je určen pro materiály s typem třísky P, má vysoký obsah kubických borů a je vhodný pro stabilní záběrové podmínky. [20]



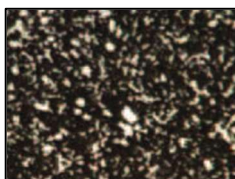
Obrázek 17: Struktura SK [20]

Třetím je slinutý karbid s povlakem TiN (označení 6640), který byl nanesen metodou MTCVD. Tento materiál je doporučen pro skupiny P, M, K a pro nižší řezné rychlosti. [20]



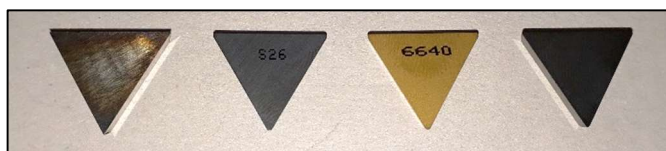
Obrázek 18: Struktura SKS [20]

Čtvrtým, tedy posledním, nástrojovým materiálem byla řezná keramika ve tvaru TPGN 160304 (označení TC100). Tento typ směsné keramiky na bázi Al_2O_3 a TiC je určen pro obrábění litin, žárupevných materiálů a slitin titanu za vysokých otáček. [20]



Obrázek 19: Struktura KER [20]

Pro výzkum byly tedy připraveny 4 druhy nástrojových materiálů o různých vlastnostech. Při experimentu budou jejich vlastnosti testovány jak za stejných podmínek, tak za podmínek zvolených podle typu materiálu destičky.



Obrázek 20: VBD

Podmínky pro obrábění byly vybírány dle literatury a zkušeností se strojem. Pro podmínky, za kterých bude obráběn každý materiál, se zvolily hodnoty dle tabulky 6:

Tabulka 6: Konstantní podmínky obrábění

Vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Otáčky n	[1/min]	360
Posuv f	[mm]	0,02
Hloubka záběru a_p	[mm]	1

Dále se volily ideální podmínky obrábění podle jednotlivých materiálů. Pro co nejlepší porovnání zůstaly posuv a hloubka záběru konstantní. Měnily se pouze otáčky dle tabulky 7:

Tabulka 7: Ideální podmínky

Materiál	Otáčky [1/min]
Rychlořezná ocel	180
Slinutý karbid	560
Slinutý karbid s povlakem TiN	900
Keramika	1400

3.3 Obrobení vzorků

Experiment probíhal na soustruhu SU 50 v laboratořích Technické Univerzity v Liberci.



Obrázek 21: Soustruh SU-50

Pro co nejpřesnější měření bylo nutné nalézt stabilní upnutí vzorku, aby nedocházelo k jeho poškození vlivem přitlačné síly čelistí nebo nesouosému upnutí. Proto byl do vzorku vyvrtán středící důlek a pro upnutí v univerzálním sklíčidle byl zhotoven přípravek z ocelové trubky. Přípravek bude držet obrobek přitlačnou silou působící ze všech stran a tím se zvýší stabilita obrábění.



Obrázek 22: Soustružnický přípravek

Po upnutí obrobku do soustruhu byly vzorky obrobena na průměr 38 mm. Úprava vzorků zajišťuje vyšší stabilitu obrábění a zarovnání povrchu pro vyšší vypovídací hodnotu měření

3.4 Měření řezných sil

Měření řezných sil probíhalo na třísložkovém piezoelektrickém dynamometru KISTLER (typ 9265B), který využívá piezoelektrického jevu. Tento jev se projevuje vznikem elektrického náboje při mechanickém zatížení. Měřicí destička z piezoelektrického materiálu se vlivem působící síly deformuje a mění tím svůj elektrický náboj.

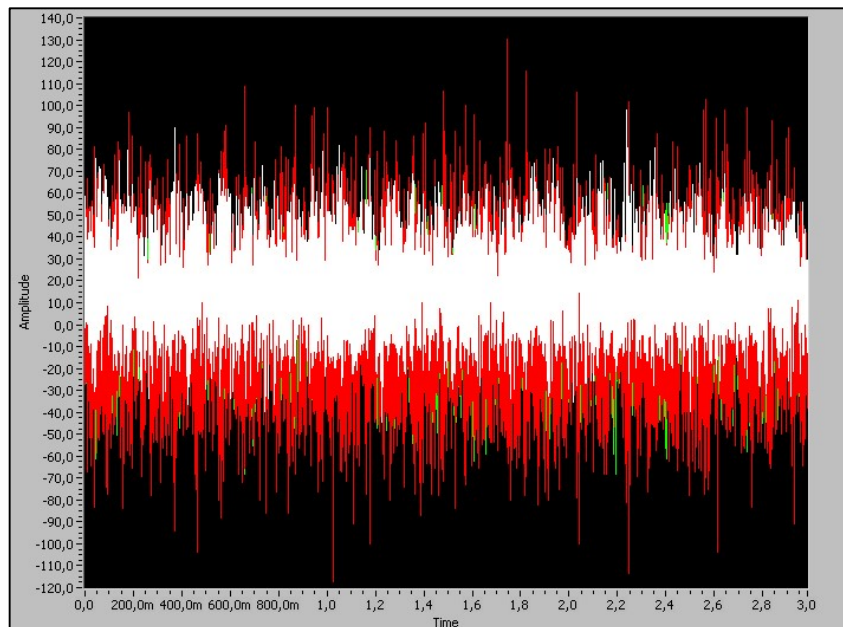
Na soustavu SNOP (stroj – nástroj – obrobek - přípravek) působí během procesu mnoho sil a je důležité oddělit jednotlivé členy, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. Vlivy ostatních členů nelze vyloučit, avšak lze je eliminovat vhodnou kalibrací dynamometru

Kalibrace probíhala na vypnutém stroji, aby byly vylimínovány cizí vlivy. Po upnutí dynamometru na pracovní stůl bylo snímací zařízení zatíženo ve 3 osách a do softwaru byly zaznamenány dané hodnoty působících sil. Tímto se nastavily referenční hodnoty a chyba přístroje byla redukována



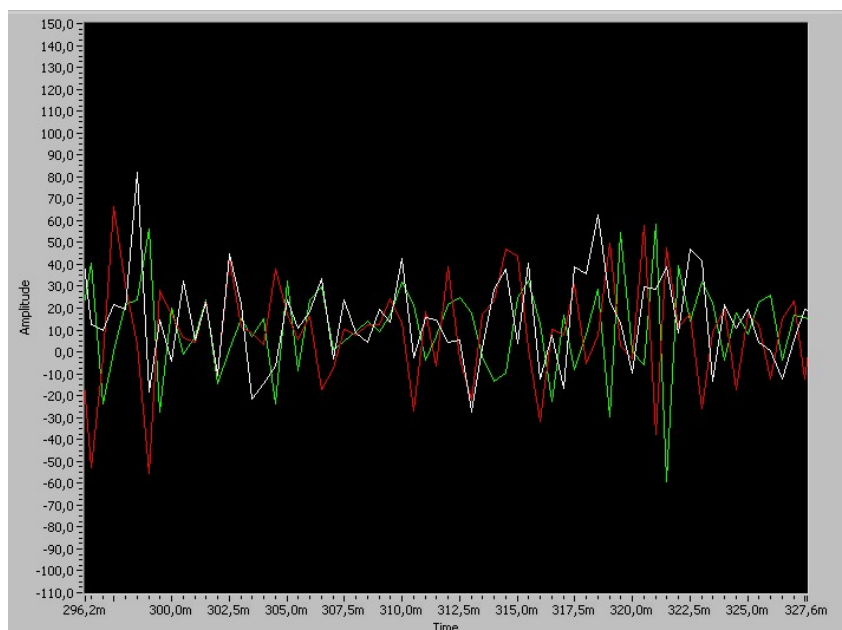
Obrázek 23: Kalibrace dynamometru

Výstupem měření je graf působících sil ve třech osách.



Obrázek 24: Průběh působících sil

Průběhy byly následně blíže rozebírány a odečítány hodnoty pro podrobný popis působících sil.



Obrázek 25: Podrobný průběh působících sil

3.5 Měření drsnosti

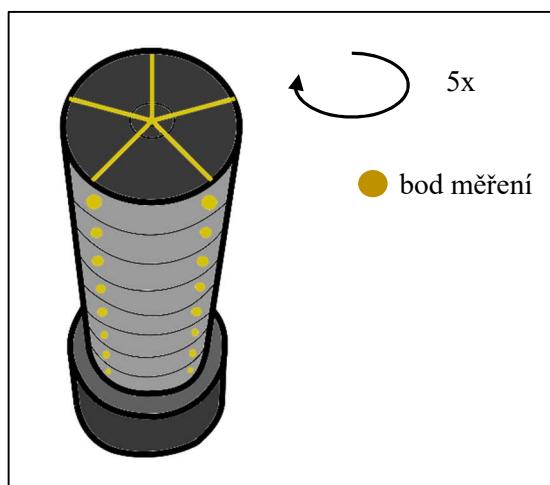
K měření drsnosti povrchu byl použit profilometr Mitutoyo Surftest SV 2000N2. Přístroj měří dotykovou metodou, kdy sonda s diamantovou kuželovou špičkou přejíždí po povrchu a výchylky vertikální osy převádí do elektrického signálu, jenž je přenášěn do softwaru Surfpack. Software vyhodnocuje povrch dle norem ISO, DIN a JIS.



Obrázek 26: Mitutoyo Surftest SV-2000N2

Každá obrobená plocha byla měřena na pěti bodech po obvodu, v pěti sériích viz obrázek 27 a dále zkoumána dle parametrů Ra (průměrná aritmetická úchylka),

Rz (největší výška profilu ze základní vzdálenosti) a Rt (celková výška profilu z posuzované oblasti). Všechny hodnoty byly vyhodnoceny softwarem a následně zpracovány statistickými metodami pro co nejvyšší vypovídací hodnoty.



Obrázek 27: Body měření drsnosti

3.6 Měření rozměrové přesnosti

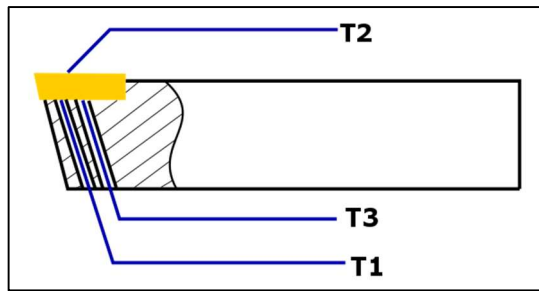
Měření probíhalo na začátku obráběné plochy a následně na jejím konci. Vzorek byl měřen na 5 bodech po obvodu. Hodnoty průměrů obrobené plochy byly měřeny elektrickým mikrometrem, který měří s přesností 1 μm . Touto metodou byla zkoumána rozměrová přesnost a vliv procesu obrábění na jakost výroby.

3.7 Měření opotřebení

Měření probíhalo na dílenském mikroskopu ZEISS s pohyblivým stolem. Pohyb objektivu je řízen mikrometrovými šrouby, ze kterých je následně odečítáno opotřebení nástroje. Opotřebení bylo měřeno po obrobení 100, 200, 300, 500, 800 a 1000 mm. Hodnoty byly odečítány na hřbetu a čele VBD po daných vzdálenostech čímž byl zmapován průběh opotřebení.

3.8 Měření teploty

Při měření teplot během soustružení byly termočlánky umístěny do třech míst destičky. Do VBD byli nejprve vyjiskřeny 3 otvory do kterých byly články přivařeny pomocí kondenzátorové svářečky. Teploty tak byly snímány na horní i dolní ploše destičky.



Obrázek 28: Umístění termočlánků

Pro měření byly použity termočlánky typu K, které se vyznačují širokým rozsahem snímaných hodnot. Tyto termočlánky jsou tvořeny slitinami materiálů Ni-Cr (+) a Ni-Al (-)



Obrázek 29: Přivařené termočlánky

Po připevnění termočlánků byl nůž zabalen do transparentní izolepy, aby nedocházelo k pohybu snímacích drátků a měření probíhalo za stabilních podmínek.

4. Vyhodnocení výsledků

Experimentální část se zabývá vyhodnocením výsledků a měření. V této části diplomové práce jsou výsledky prezentovány formou grafů a tabulek.

4.1 Řezné síly

Hlavní řezná síla F_c byla v měřící soustavě značena jako F_x . Hodnoty této složky byly zkoumány a vyhodnoceny v závislosti na procesních podmínkách a obsahu plniva v pryskyřici.

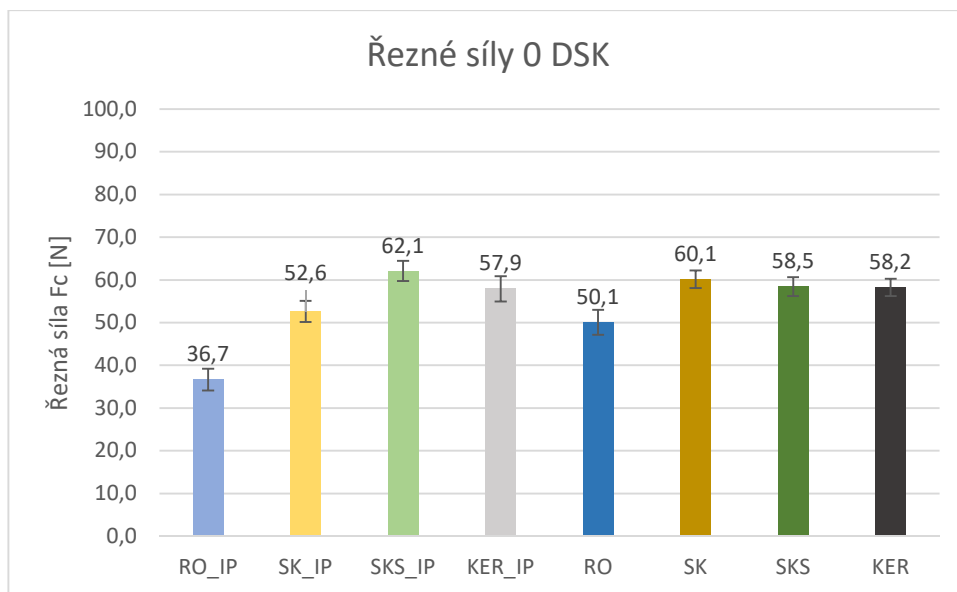
Tabulka 8: Podmínky obrábění

	posuv	Hloubka záběru	otáčky
	f [mm/ot]	ap[mm]	n [1/min]
KONST	0,02	1	560
RO_IP			180
SK_IP			560
SKS_IP			900
KER_IP			1400

Získané hodnoty působících sil byly zaznamenány pomocí programu LabView 6.1, který je součástí měřící soustavy. Výstupem byly graficky znázorněné průběhy působících sil, které byly zaznamenávány do tabulek v programu Excel

Tabulka 9: Řezné síly 0 disk

Řezné síly 0 disk								
materiál	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP	RO	SK	SKS	KER
F [N]	36,71	52,63	62,14	57,92	50,18	60,17	58,55	58,24



Graf 1: Řezné síly 0 dsk

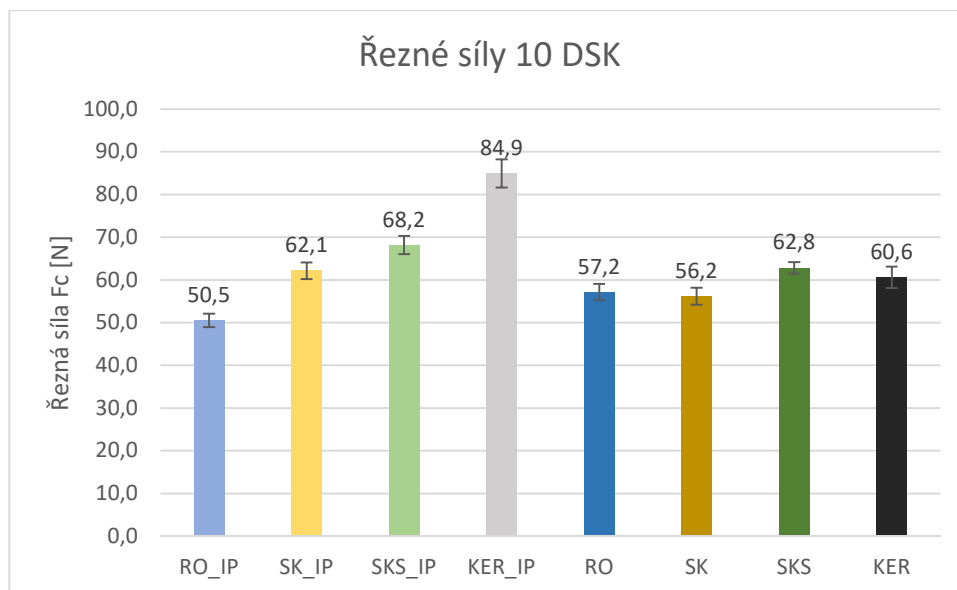
Nejprve bylo zkoumáno chování čisté pryskyřice s obsahem 0 dsk. Tato matrice se v čisté podobě jevila jako velice křehký a prašný materiál. Při soustružení menších průměrů docházelo k praskání a destrukci obrobku.

Z grafu plyne závislost řezných sil na otáčkách. Zatímco během konstantních podmínek obrábění jsou si řezné síly velmi podobné tak při ideálních podmínkách je zřejmá přímá úměra řezné síly a otáček.

Se zvyšujícími se otáčkami se zvyšuje řezná síla což je v souladu s dosavadními poznatky a literaturou [9]. Zlom nastává u ideálních podmínek řezné keramiky, kdy v důsledku vysokých otáček docházelo k nestabilnímu vylamování třísek. Epoxidová pryskyřice je křehký materiál, který praská již při působení nízkých vnějších sil. Proto lze za daných podmínek nalézt otáčky bodu zlomu, kdy začne docházet k nestabilnímu obrábění a řezná síla dosáhne svého maxima.

Tabulka 10: řezné síly 10 dsk

Řezné síly 10 dsk								
materiál	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP	RO	SK	SKS	KER
F [N]	50,56	62,19	68,25	84,93	57,27	56,25	62,85	60,61

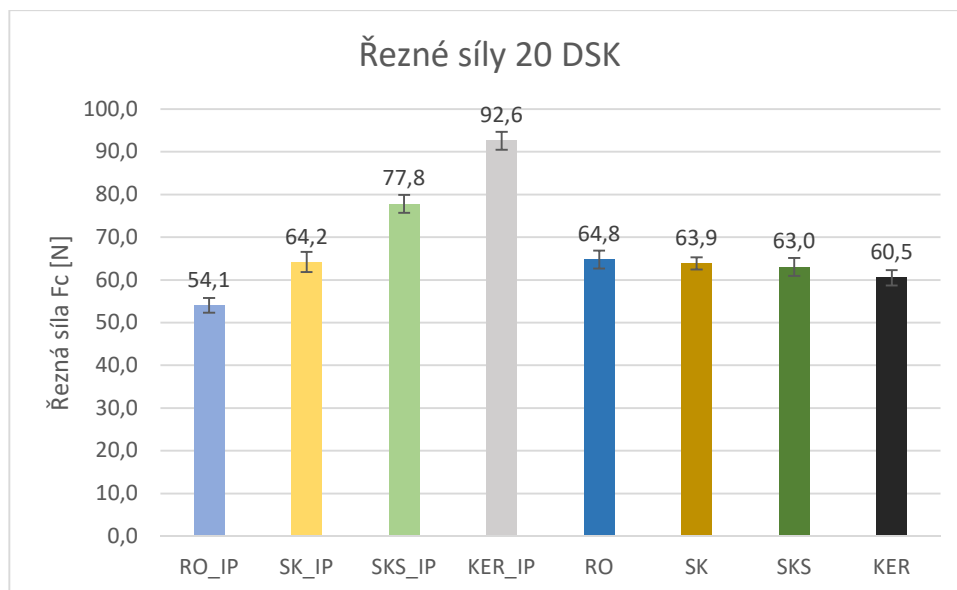


Graf 2: Řezné síly 10 dsk

Soustružení epoxidové pryskyřice s obsahem 10 dsk vykazuje vyšší pevnostní vlastnosti kompozitu. Síla roste úměrně s otáčkami, ovšem řezné síly dosahují vyšších hodnot. Tento jev je způsoben přidáním uhlíkovými vlákny do epoxidové matrice. Vlákna mají vyšší pevnost, kterou musí nástroj překonat. Kompozit také vykazuje větší stabilitu a u řezné keramiky při vysokých otáčkách dosahujeme výrazně vyšších hodnot. Přidáním uhlíkových vláken došlo ke zpevnění materiálu a zvýšení stability procesu.

Tabulka 11: řezné síly 20 dsk

Řezné síly 20 dsk								
materiál	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP	RO	SK	SKS	KER
F [N]	54,14	64,25	77,82	92,61	64,88	63,98	63,07	60,54

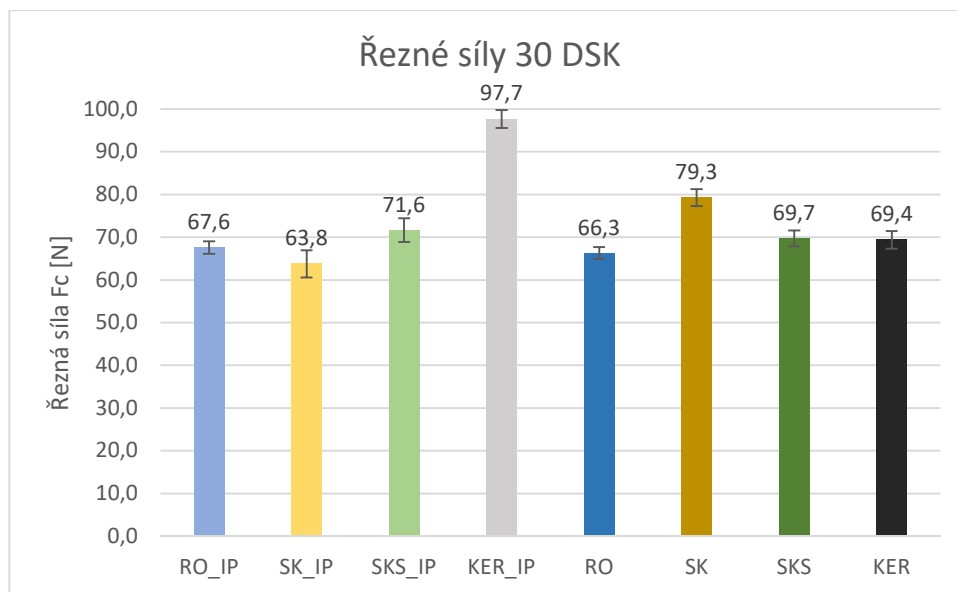


Graf 3: Řezné síly 20 dsk

Kompozitní materiál o obsahu 20 dsk drží trend zvyšujících se řezných sil. Síly rostly zhruba o 10% oproti kompozitu s 10 dsk. Pouze slinutý karbid s povlakem a řezná keramika za konstantních podmínek zůstaly takřka neměnné. To může být způsobeno chybou měření nebo nehomogenitou obrobku.

Tabulka 12: Řezné síly 30 dsk

Řezné síly 30 dsk								
materiál	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP	RO	SK	SKS	KER
F [N]	67,63	63,83	71,63	97,74	66,36	79,38	69,72	69,44

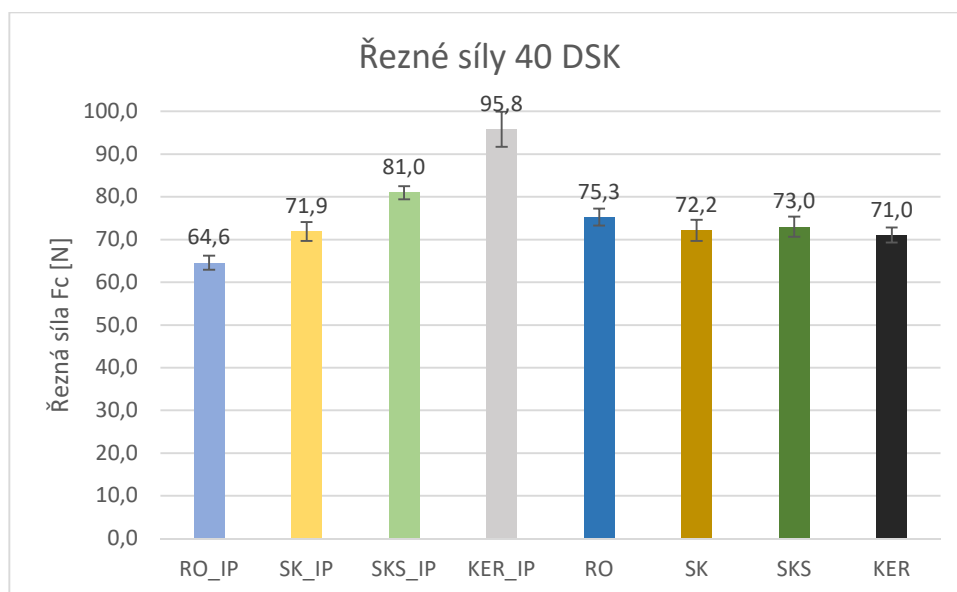


Graf 4: Řezné síly 30 dsk

Zvyšování obsahu uhlíkových vláken způsobuje nárůst řezných sil. Nárůst není konstantní ani lineární, což je způsobeno nedokonalostmi ve struktuře obrobku nebo chybou měření.

Tabulka 13: Řezné síly 40 dsk

Řezné síly 40 dsk								
materiál	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP	RO	SK	SKS	KER
F [N]	64,67	71,95	81,01	95,86	75,34	72,26	73,05	71,02



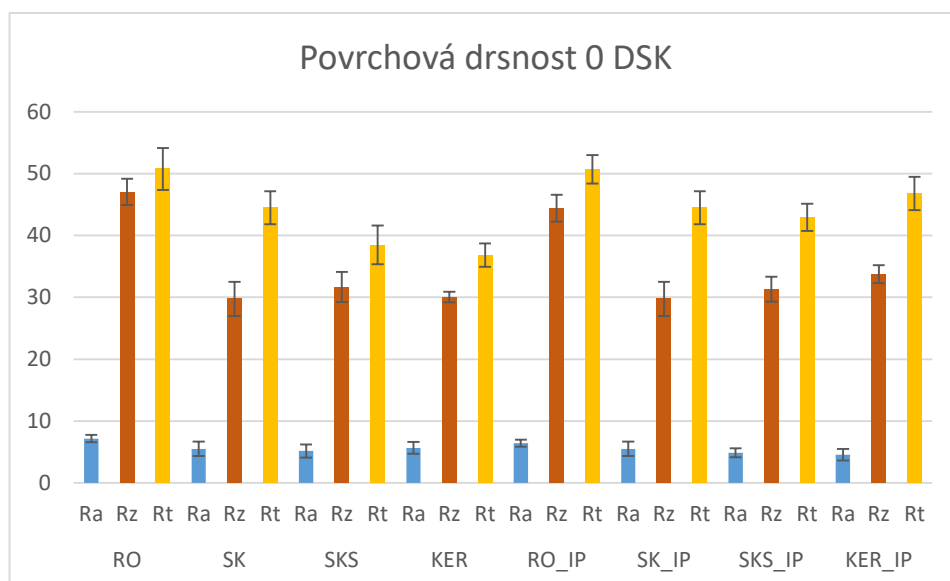
Graf 5: Řezné síly 40 dsk

Nárůst řezných sil u materiálu s obsahem 40 dsk se oproti předchozím vzorkům zpomalil. Síly narostly oproti 30 dsk v průměru o 5%. Toto zpomalení může být způsobeno nasycením matrice a dosažením nejvyšších mechanických vlastností kompozitu. Z technologických důvodů nelze odlévat epoxidovou pryskyřici s obsahem 50 dsk, proto kompozit s obsahem 40 dsk můžeme označit za nasycený. Přibližováním se k tomuto stavu se zhoršují podmínky pro obrábění a snižují se rozdíly ve vlastnostech materiálu.

4.2 Povrchová drsnost

Povrchová drsnost je jedním ze základních parametrů obrábění. Její vlastnosti ovlivňují nejen konečný vzhled, ale i mechanické vlastnosti obrobku. Její přímý vliv na vrubovou houževnatost a otěruodolnost byly již v minulosti prokázány a pro co nejlepší kvalitu výroby je snaha docílit co nejmenších drsností. [12]

Nejprve byly zkoumány drsnosti u čisté epoxidové pryskyřice s 0 dsk.



Graf 6: Povrchová drsnost vzorku 0 dsk

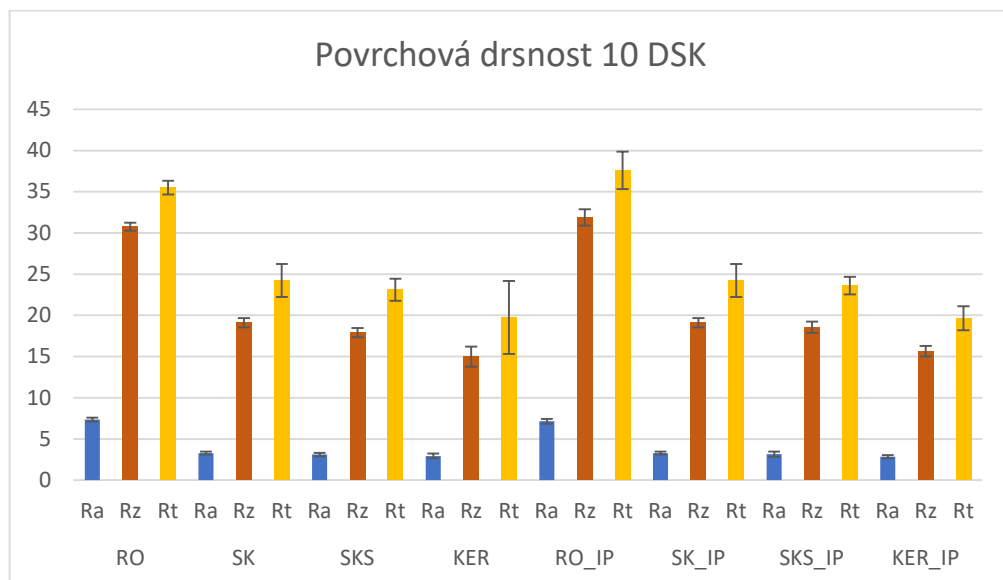
Tento vzorek se během soustružení jevil jako velmi prašný s často vylamovanou třískou. Výsledné drsnosti se pohybovaly v poměrně vysokých hodnotách, z celkového pohledu byla výsledná drsnost povrchu u toho vzorku nejvyšší.

Nejvyšších drsností se dosahovalo při použití rychlořezné oceli. Oproti tomu slinutý karbid s povlakem i bez a řezná keramika dosahují přibližně stejných drsností.



Obrázek 30: Obrobek 0 dsk

Na povrchu jsou jasné nerovnosti a vruby vzniklé vylamováním třísky. Už z běžného pohledu jsou vidět povrchové nedokonalosti a nehomogenita povrchu.



Graf 7: Povrchová drsnost vzorku 10 dsk

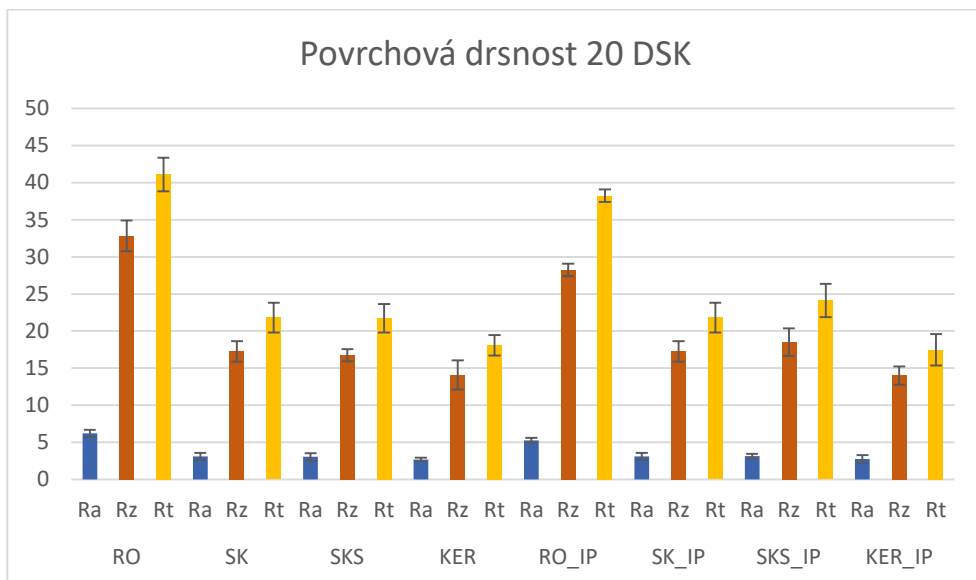
Jak plyne z grafu 7: přidáním vláken došlo ke značné stabilizaci procesu obrábění. Všechny hodnoty výrazně klesly a povrch obrobene plochy se stal kompaktnějším.

Také lze pozorovat větší rozdíly v nástrojových materiálech. Zatímco rychlořezná ocel dosahuje opět nejvyšších drsností tak u dalších materiálů se začínají projevovat různé materiálové vlastnosti. Povrchové parametry viditelně klesají s užíváním nástrojových povlaků a materiálů s vyšší tvrdostí. Neoptimálnějším nástrojem z pohledu povrchové jakosti se jeví řezná keramika.



Obrázek 31: Obrobek 10 dsk

Během soustružení nedocházelo k vylamování třísek a na obrobku lze pozorovat stopy nástroje. Zvýšila se stabilita soustružení, povrchová homogenita a kvalita obrobenej plochy.



Graf 8: Povrchová drsnost vzorku 20 dsk

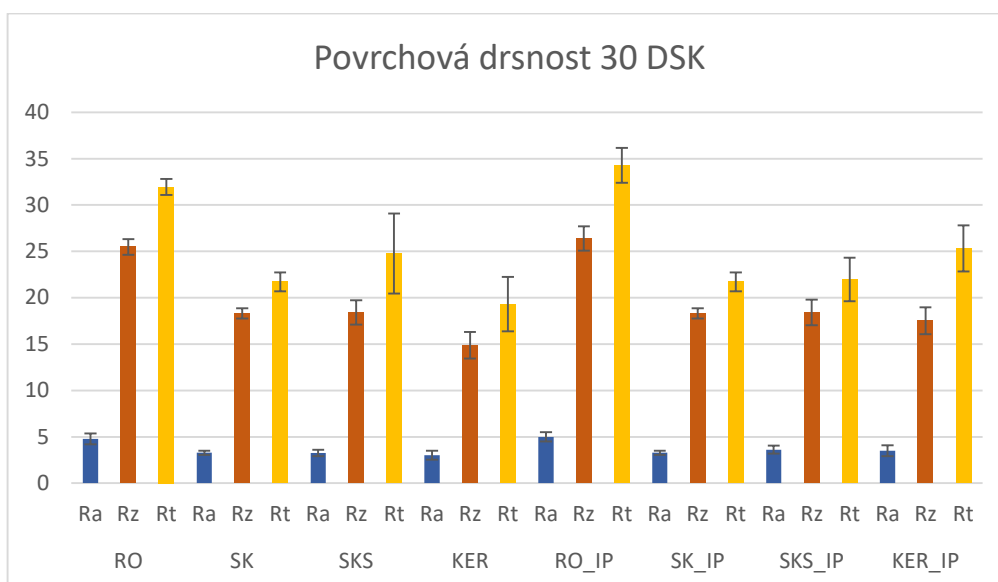
Ještě lepší vlastnosti vykazuje obrobenej vzorek s 20 dsk. Měrenej parametry opět poklesly a kvalita povrchu zůstala stejná. Toto měření zároveň potvrzuje trend klesajících drsností s rostoucím obsahem vláken.

Rychlořezná ocel opět dosahuje nejvyšších a keramika nejnižších hodnot drsnosti.



Obrázek 32: Obrobek 20 dsk

Výsledný povrch neobsahuje viditelné vady a je kompaktní. K nevhodnému vylamování třísek nebo zvýšené prašnosti nedocházelo.



Graf 9: Povrchová drsnost vzorku 30 dsk

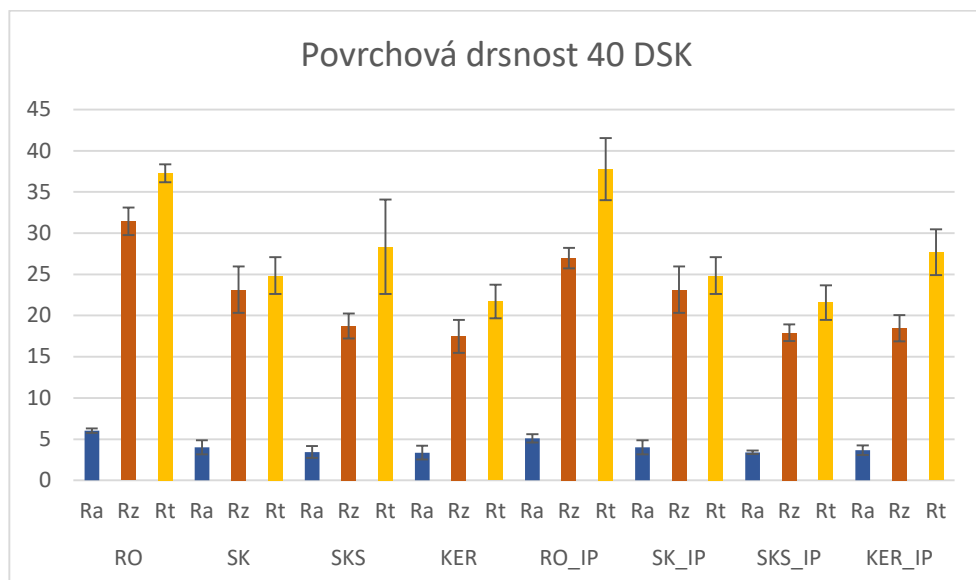
Povrchové vlastnosti při soustružení vzorku s 30 dsk byly ovlivněny technologickými nedokonalostmi během odlévání směsí. Vzorek s 30 dsk byl těžce mísitelný a docházelo k nedokonalému promíchání. Z toho důvodu nebyly vzorky zcela homogenní a zůstaly v něm drobné bublinky vzduchu.

Rychlořezná ocel je opět nejméně vhodným nástrojovým materiálem z pohledu povrchových vlastností a řezná keramika nejlepším, i přesto že se drsnosti oproti předchozímu vzorku zvýšily.



Obrázek 33: Obrobek 30 dsk

Na povrchu jsou vidět vzduchové bubliny, které ve směsi zůstaly během obrábění. Důlky vzniklé vzduchem výrazně ovlivnily povrchové vlastnosti a homogenitu povrchu.



Graf 10: Povrchová drsnost vzorku 40 dsk

Vzduchové bubliny doprovázely i soustružení vzorku s 40 dsk. Povrchové vlastnosti byly ovlivněny podobným způsobem jako u předchozího vzorku s rozdílem, že slinutý karbid s povlakem a řezná keramika dosahují navzájem blízkých hodnot.



Obrázek 34: Obrobek 40 dsk

Na povrchu jsou opět vzduchové bubliny, které nepříznivě ovlivňují povrchové vlastnosti obrobku.

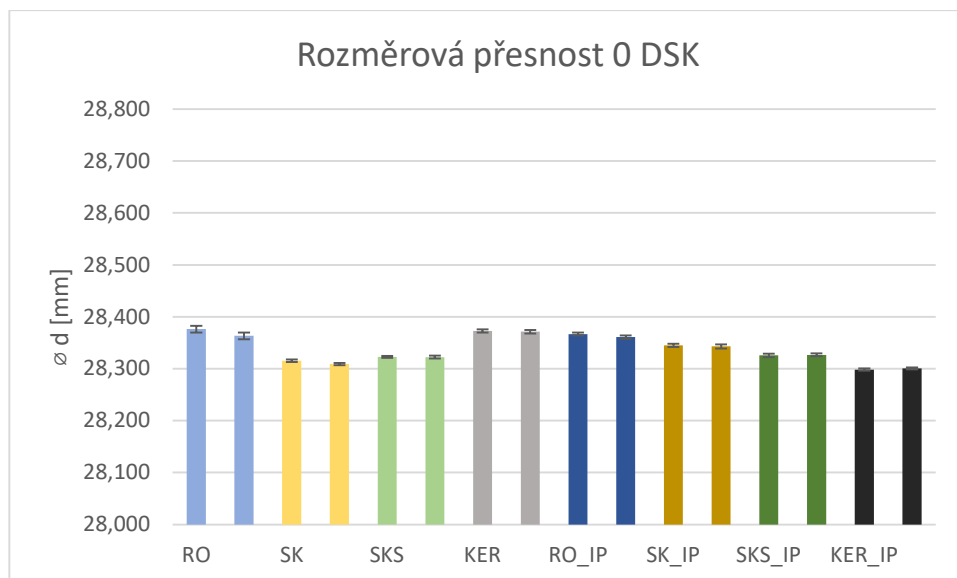
Z měření plyne zvyšující se stabilita obrábění s rostoucím obsahem uhlíkových vláken. Tento jev je ale doprovázen i nepříznivými vlivy: s rostoucím obsahem vláken roste technologická náročnost zpracování a odlévání směsí, rostou síly působící na nástroj a tím výrazně roste opotřebení nástrojů, které má přímý vliv na jakost výroby a ekonomiku procesu.

4.3 Rozměrová přesnost

Rozměrová přesnost je veličina určující přesnost výroby. Na její preciznost má vliv každý ze členů soustavy S-N-O-P (stroj-nástroj-obrobek-přípravek). Jedná se tedy o komplikovaný atribut, jehož zkoumáním a zlepšováním se výrazně zvedá jakost výroby. [9, 10]

Tabulka 14: Rozměrová přesnost vzorku 0 dsk

vzorek 0 dsk		RO	SK	SKS	KER	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP
průměr obrobené plochy [mm]	začátek	28,376	28,315	28,323	28,373	28,367	28,345	28,326	28,298
	konec	28,363	28,309	28,322	28,371	28,361	28,343	28,327	28,300



Graf 11: Rozměrová přesnost vzorku 0 dsk

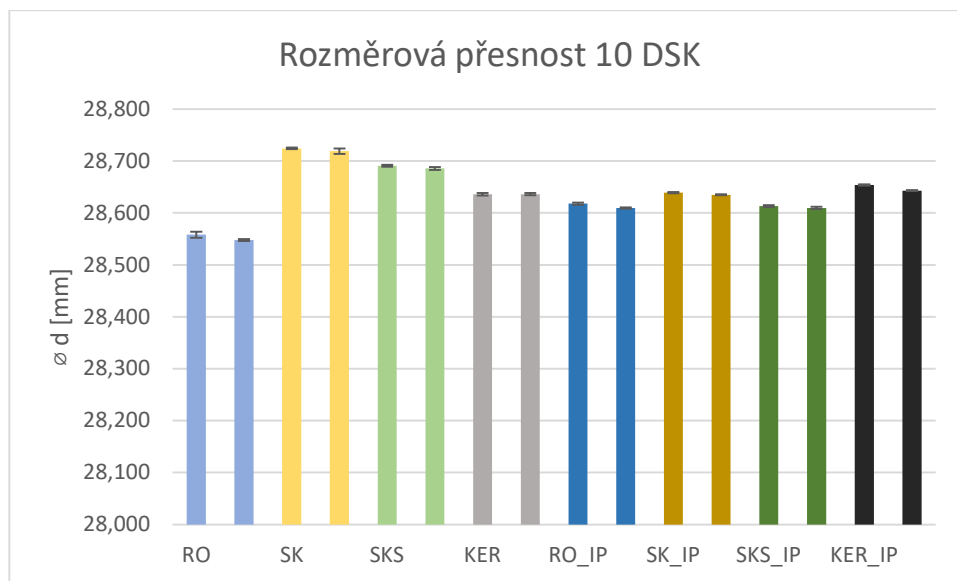
Tabulka 15: Diference rozměrů vzorku 0 dsk

Diference vzorku 0 dsk								
materiál	Δ RO	Δ SK	Δ SKS	Δ KER	Δ RO_IP	Δ SK_IP	Δ SKS_IP	Δ KER_IP
[mm]	0,013	0,026	0,020	0,001	0,006	0,002	-0,001	-0,002

Vzorek s obsahem 0 dsk vykazuje nejhorší rozměrovou přesnost při soustružení slinutým karbidem za konstantních podmínek. Obdobných hodnot nabývá i povlakovaný karbid za konstantních podmínek. Řezná keramika se jeví jako ideální nástroj s minimální diferencí.

Tabulka 16: Rozměrová přesnost vzorku 10 dsk

obrobek 10 dsk		RO	SK	SKS	KER	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP
průměr obrobené plochy [mm]	začátek	28,558	28,724	28,691	28,636	28,618	28,639	28,613	28,654
	konec	28,548	28,719	28,686	28,636	28,609	28,635	28,610	28,643



Graf 12: Rozměrová přesnost vzorku 10 dsk

Tabulka 17: Diference rozměrů vzorku 10 dsk

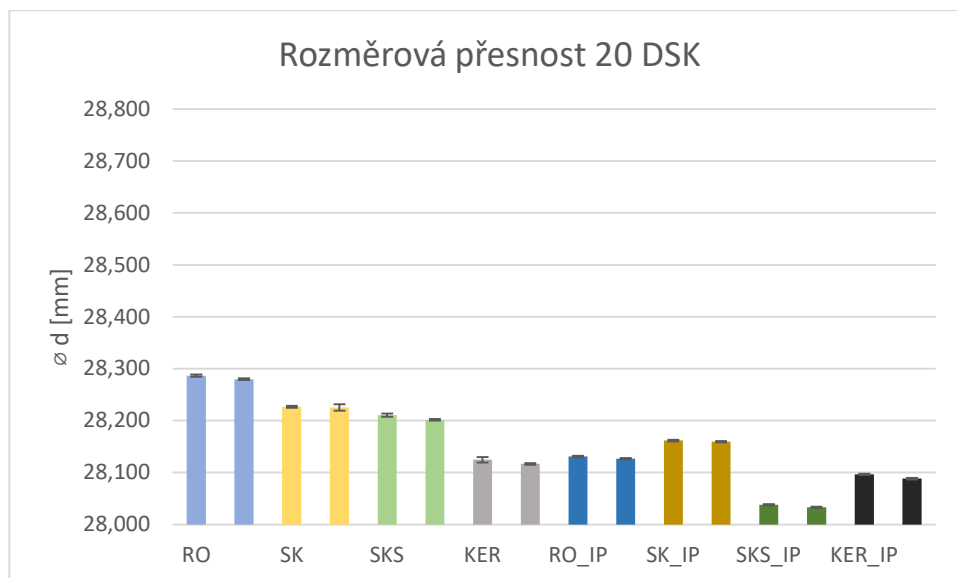
Diference vzorku 10 dsk								
materiál	ΔRO	ΔSK	ΔSKS	ΔKER	ΔRO_IP	ΔSK_IP	ΔSKS_IP	ΔKER_IP
[mm]	0,010	0,005	0,005	0,000	0,009	0,004	0,003	0,011

Při soustružení vzorku s 10 dsk se zlepšily všechny hodnoty za konstantních podmínek. Naopak za ideálních podmínek se rozměrové přesnosti lehce zhoršily.

Z diferencí rozměrů také plyne teplotní roztažnost obrobku. Ten se během obrábění vlivem tepla rozpínal a po vychladnutí se smršťil do menších rozměrů. V případě požadavku na vysokou přesnost výroby lze tento jev odstranit technologickým přídatkem materiálu.

Tabulka 18: Rozměrová přesnost vzorku 20 dsk

obrobek 20 dsk		RO	SK	SKS	KER	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP
průměr obrobené plochy [mm]	začátek	28,286	28,226	28,211	28,125	28,131	28,162	28,038	28,096
	konec	28,280	28,225	28,201	28,117	28,127	28,159	28,033	28,088



Graf 13: Rozměrová přesnost vzorku 20 dsk

Tabulka 19: Diference rozměrů vzorku 20 dsk

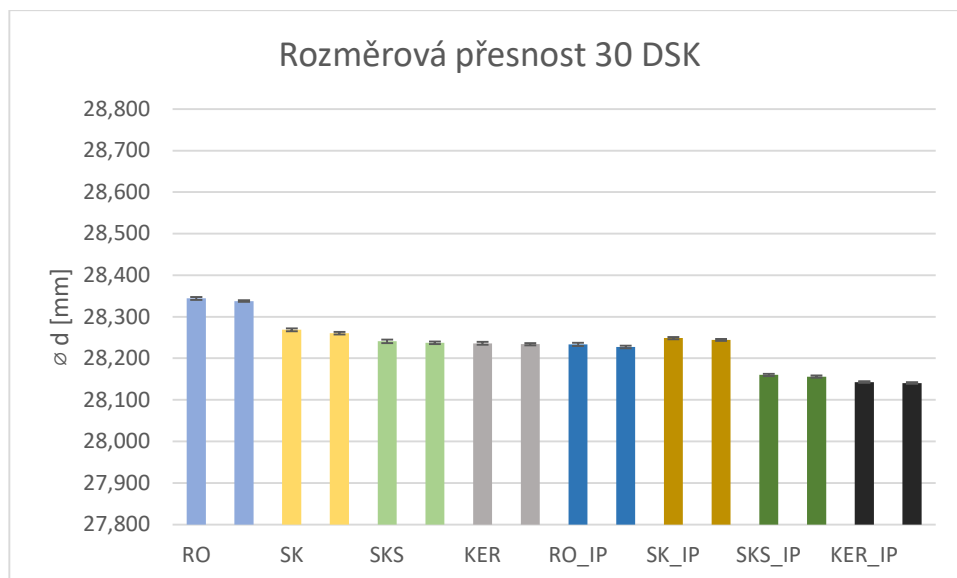
Diference vzorku 20 dsk								
materiál	Δ RO	Δ SK	Δ SKS	Δ KER	Δ RO_IP	Δ SK_IP	Δ SKS_IP	Δ KER_IP
[mm]	0,007	0,001	0,009	0,008	0,004	0,002	0,005	0,008

Vzorek s obsahem 20 dsk nabývá hodnot velmi blízkých předchozímu vzorku. Kompozit se přidáváním uhlíkových vláken stává stabilnějším pro obrábění a rozměrová přesnost se zvyšuje.

Diference zůstávají v kladných hodnotách, což znamená teplotní roztažnost během procesu obrábění.

Tabulka 20: Rozměrová přesnost vzorku 30 dsk

obrobek 30 dsk		RO	SK	SKS	KER	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP
průměr obrobené plochy [mm]	začátek	28,344	28,269	28,241	28,236	28,233	28,249	28,160	28,143
	konec	28,338	28,260	28,237	28,234	28,227	28,244	28,156	28,140



Graf 14: Rozměrová přesnost vzorku 30 dsk

Tabulka 21: Diference rozměrů vzorku 30 dsk

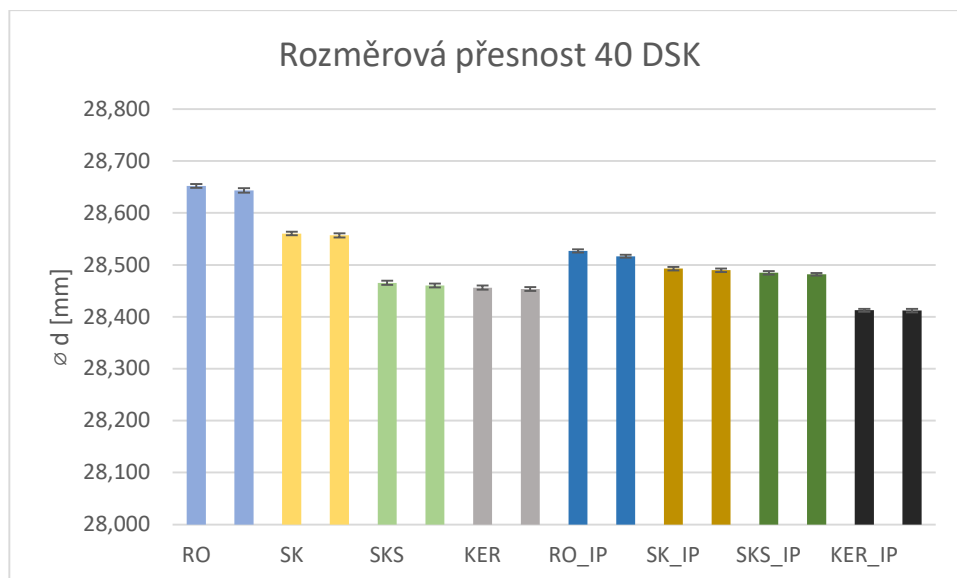
Diference vzorku 30 dsk								
materiál	Δ RO	Δ SK	Δ SKS	Δ KER	Δ RO_IP	Δ SK_IP	Δ SKS_IP	Δ KER_IP
[mm]	0,006	0,008	0,004	0,002	0,006	0,005	0,004	0,002

Vzorek s 30 dsk opět vykazuje velmi vysokou rozměrovou přesnost. Je patrný obdobný trend jako u předchozích plněných vzorků. Tedy stabilita během soustružení a s tím spojená vysoká jakost výroby.

Diference jsou opět kladné.

Tabulka 22: Rozměrová přesnost vzorku 40 dsk

obrobek 40 dsk		RO	SK	SKS	KER	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP
průměr obrobené plochy [mm]	začátek	28,652	28,560	28,465	28,456	28,527	28,493	28,485	28,413
	konec	28,643	28,557	28,460	28,453	28,517	28,490	28,482	28,412



Graf 15: Rozměrová přesnost vzorku 40 dsk

Tabulka 23: Diference rozměrů vzorku 40 dsk

Diference vzorku 40 dsk								
materiál	Δ RO	Δ SK	Δ SKS	Δ KER	Δ RO_IP	Δ SK_IP	Δ SKS_IP	Δ KER_IP
[mm]	0,009	0,003	0,005	0,003	0,010	0,003	0,003	0,001

Opět dochází k podobnosti s předchozími vzorky. Rozměrová přesnost zůstává kladně ovlivněna uhlíkovými vlákny a diference rozměrů jsou velmi malé, kladné.

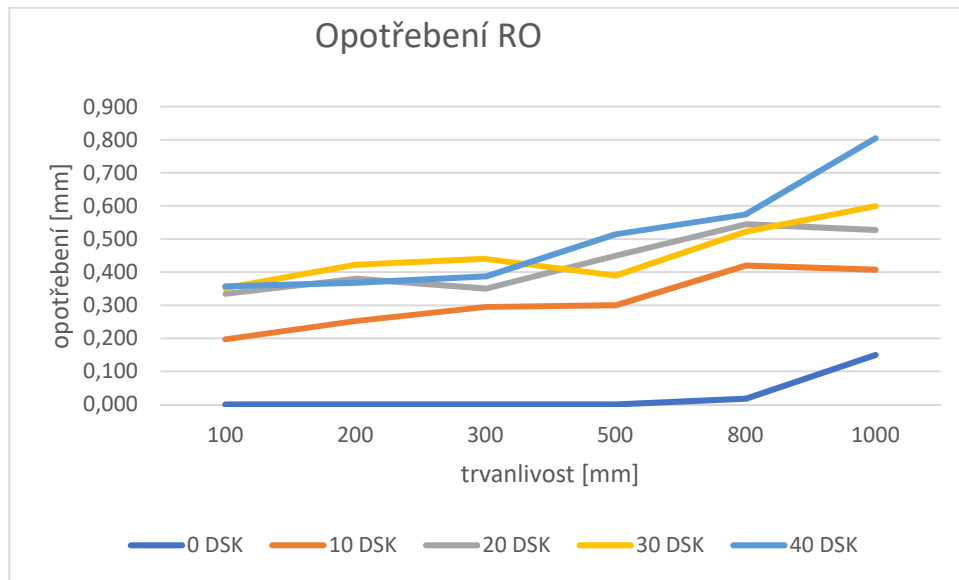
4.4 Opotřebení

Opotřebení nástrojových materiálů je jedním ze základních aspektů ekonomiky výroby. Nehospodárné zacházení s nástroji zvyšuje výrobní náklady a snižuje hodnotu práce. [11,15,17]

V této diplomové práci byly zkoumány opotřebení různých nástrojových materiálů na kompozitním materiálu s různými obsahy plniv.

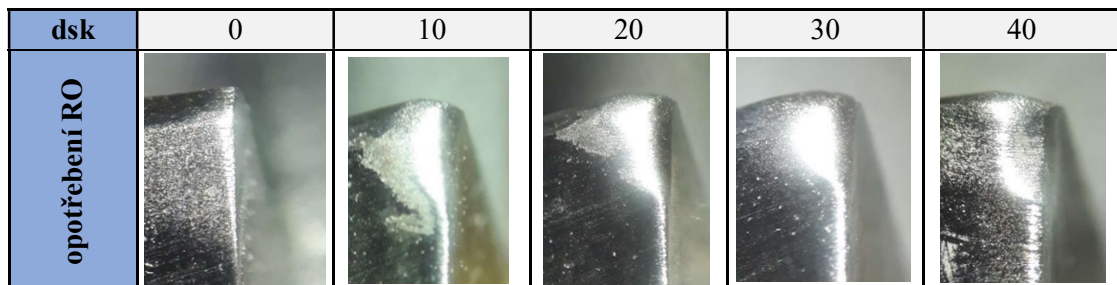
Tabulka 24: Opotřebení nástrojového materiálu z RO

opotřebení RO					
vzdálenost [mm]	opotřebení [mm]				
	0 dsk	10 dsk	20 dsk	30 dsk	40 dsk
100	0,000	0,20	0,34	0,35	0,36
200	0,0	0,25	0,38	0,42	0,37
300	0,00	0,30	0,35	0,44	0,39
500	0,00	0,30	0,45	0,39	0,52
800	0,02	0,42	0,55	0,52	0,58
1000	0,08	0,41	0,53	0,60	0,81



Graf 16: Průběh opotřebení RO

Tabulka 25: Postup opotřebení nástrojového materiálu z RO

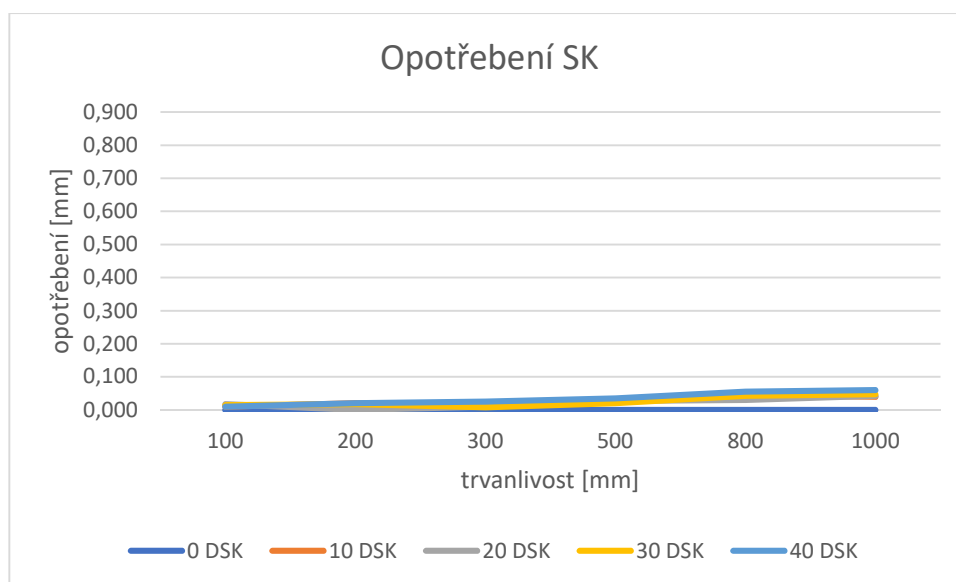


Přestože se během soustružení nedosahovalo vysokých teplot, tak rychlořezná ocel vykazovala výrazné opotřebení již po 100 mm. Opotřebení dále rostlo v závislosti na obrobené vzdálenosti a při dosažení 1000 mm se pohybovalo od 0,4 mm do 0,8 mm.

Pouze u vzorku s 0 dsk nedocházelo k viditelnému opotřebení. Čistá matrice neobsahovala tvrdá uhlíková vlákna, která výrazně zvyšují abrazní oěr nástroje.

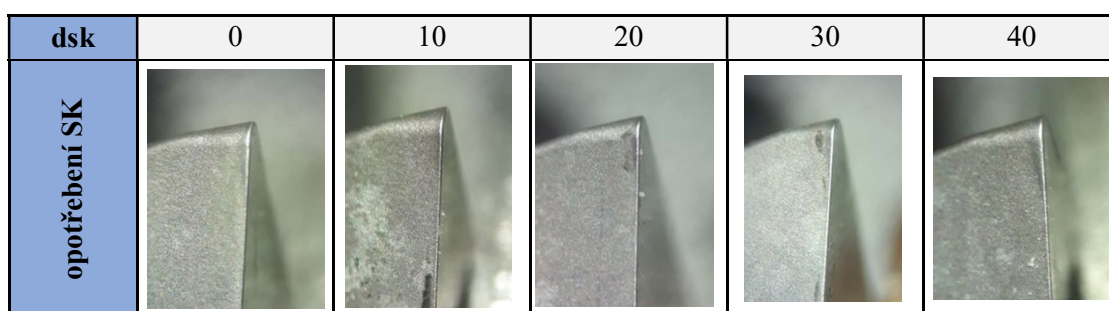
Tabulka 26: Opotřebení nástrojového materiálu ze SK

opotřebení SK					
vzdálenost [mm]	Opotřebení [mm]				
	0 dsk	10 dsk	20 dsk	30 dsk	40 dsk
100	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01
200	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02
300	0,00	0,01	0,01	0,01	0,03
500	0,00	0,03	0,03	0,02	0,04
800	0,00	0,05	0,03	0,04	0,06
1000	0,00	0,04	0,04	0,05	0,06



Graf 17: Průběh opotřebení SK

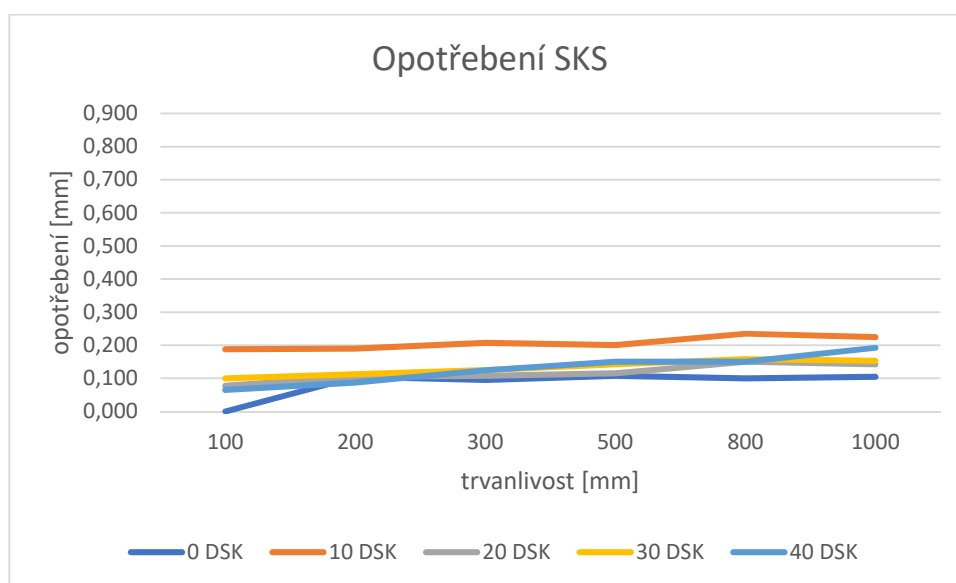
Tabulka 27: Postup opotřebení nástrojového materiálu ze SK



Opotřebení nástroje ze slinutého karbidu dosahovalo nejnižších hodnot ze všech materiálů. Nitridy boru obsažené v tomto nástroji mají vysokou tvrdost, která odolá uhlíkovým vláknům a abrazi. Na vzdálenosti 1000 mm nebyly na povrchu nástroje patrné žádné lomy, pouze mírný otěr.

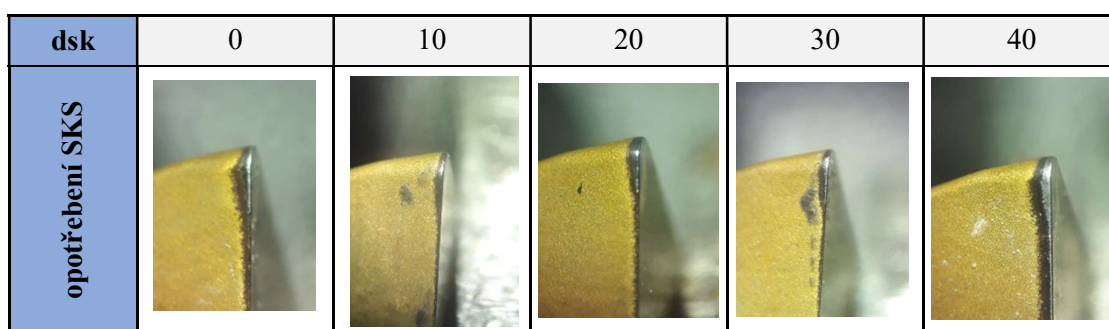
Tabulka 28: Opotřebení nástrojového materiálu ze SKS

opotřebení SKS					
vzdálenost [mm]	opotřebení [mm]				
	0 dsk	10 dsk	20 dsk	30 dsk	40 dsk
100	0,00	0,19	0,08	0,10	0,07
200	0,11	0,19	0,11	0,11	0,09
300	0,10	0,21	0,11	0,13	0,13
500	0,11	0,20	0,12	0,14	0,15
800	0,10	0,24	0,15	0,16	0,15
1000	0,11	0,23	0,14	0,15	0,19



Graf 18: Průběh opotřebení SKS

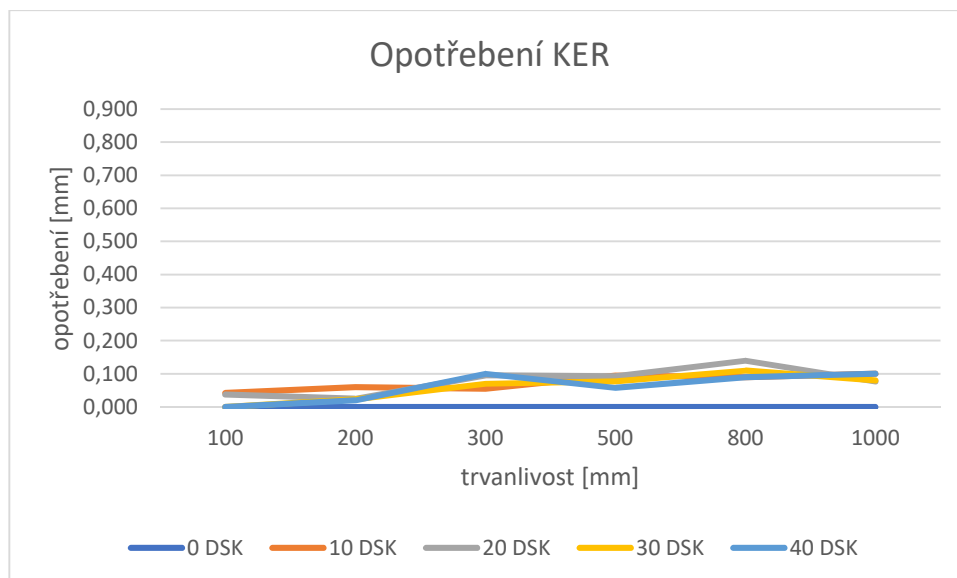
Tabulka 29: Postup opotřebení nástrojového materiálu ze SKS



Slinutý karbid s povlakem TiN vykazoval na vzdálenosti 100 mm největší opotřebení. Tenká vrstva brzy ztratila své adhezní síly a odloučila se. Po ztrátě této vrstvy nástroj pracoval jádrem ze slinutého karbidu a k dalšímu výraznému opotřebení nedocházelo.

Tabulka 30: Opotřebení nástrojového materiálu z KER

opotřebení KER					
vzdálenost [mm]	opotřebení [mm]				
	0 dsk	10 dsk	20 dsk	30 dsk	40 dsk
100	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00
200	0,00	0,06	0,03	0,02	0,02
300	0,00	0,06	0,10	0,07	0,10
500	0,00	0,10	0,09	0,08	0,06
800	0,00	0,09	0,14	0,11	0,09
1000	0,00	0,10	0,08	0,08	0,10



Graf 19: Průběh opotřebení KER

Tabulka 31: Postup opotřebení nástrojového materiálu z KER

dsk	0	10	20	30	40
opotřebení KER					

Keramika dosahovala hodnot blízkých slinutému karbidu. Tvrdost keramiky překonávala uhlíková vlákna a k výraznějšímu opotřebení nedocházelo.

Rychlořezná ocel ani slinuté karbidy s povlakem nejsou vhodné pro soustružení kompozitních materiálů na bázi epoxidové pryskyřice s uhlíkovými vlákny. Povlak vykazuje velmi nízkou trvanlivost a stává se nepraktickým. Vhodnějšími nástroji pro soustružení těchto materiálů jsou slinuté karbidy bez povlaku nebo řezná keramika. Při volbě mezi těmito materiály je nutné brát v úvahu řezné rychlosti a produktivitu výroby aby byl proces obrábění ekonomicky co nejvýhodnější.

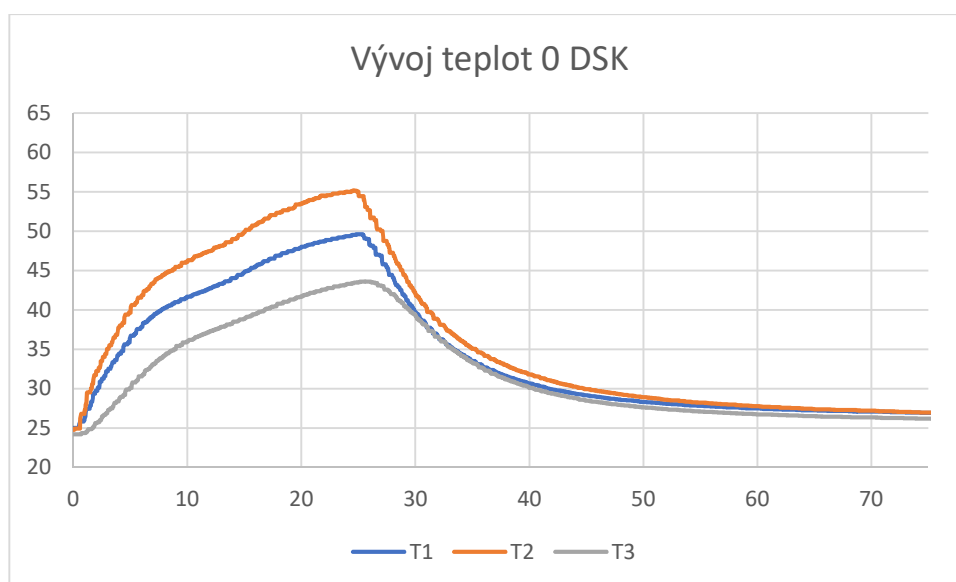
4.5 Procesní teploty

Teplota je nedílnou složkou procesu obrábění a přeměna deformační energie na teplo doprovází všechny druhy třískového obrábění. Teplo a teploty doprovázející

proces odběru třísky ovlivňují také nástrojové materiály, které se liší maximálními teplotami, ve kterých mohou pracovat [11, 13]

Tabulka 32: Teploty vzorku 0 dsk

Procesní teploty 0 dsk			
čas	T1	T2	T3
[s]	[°C]		
0,0	25,01	24,82	24,23
10,0	41,73	46,25	36,00
25,4	49,51	54,52	43,62
30,0	39,65	42,01	39,36
60,0	27,56	27,83	26,77



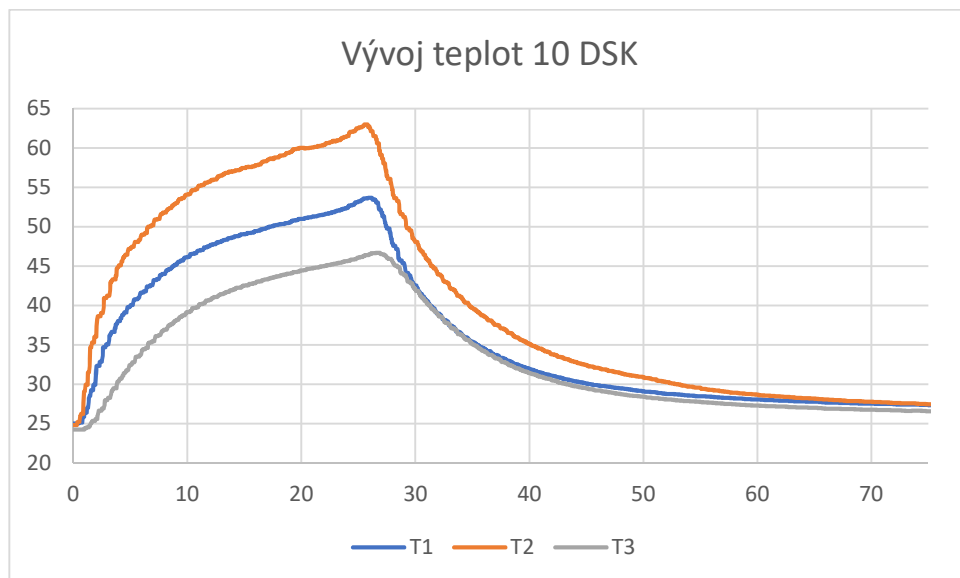
Graf 20: Vývoj teplot vzorku 0 dsk

Nástroj se během soustružení čisté epoxidové pryskyřice zahříval v závislosti na druhé mocnině času. Ve zhruba 14 vteřinách je patrný mírný výkyv v nárůstu teplot. Tento tvar křivky může být způsoben ulpíváním třísek na nástroji.

Nejvyšších hodnot bylo docíleno na čele nástroje ve 26. vteřině, kdy teplota dosáhla 54°C. Lze předpokládat, že s nepřerušným záběrem by teplota dále rostla, dokud by nedosáhla svého maxima.

Tabulka 33: Teploty vzorku 10 dsk

Procesní teploty 10 dsk			
čas	T1	T2	T3
[s]	[°C]		
0,0	25,03	24,81	24,36
10,0	46,16	54,16	39,24
26,4	53,52	61,55	46,72
30,0	42,61	48,17	42,04
60,0	28,17	28,79	27,33



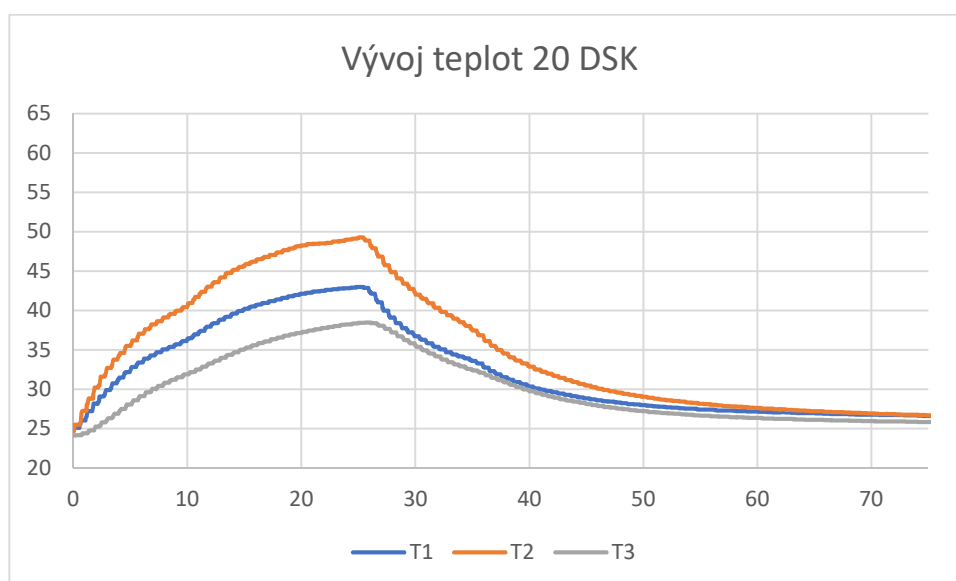
Graf 21: Vývoj teplot vzorku 10 dsk

Při soustružení vzorku s obsahem 10 dsk rostou síly obdobně jako u čisté pryskyřice. Ke konci měření je znatelný nárůst teplot, který může být způsoben opět ulpíváním třísek na nástroji nebo rozdílnými tepelnými kapacitami pryskyřice a uhlíkových vláken.

Nejvyšší teploty 61,5°C se dosáhlo v 27. vteřině na čele nástroje.

Tabulka 34: Teploty vzorku 20 dsk

Procesní teploty 20 dsk			
čas	T1	T2	T3
[s]	[°C]		
0,0	25,13	24,76	24,15
10,0	36,46	40,67	31,95
25,4	43,08	49,38	38,43
30,0	36,74	42,04	35,68
60,0	27,21	27,65	26,41



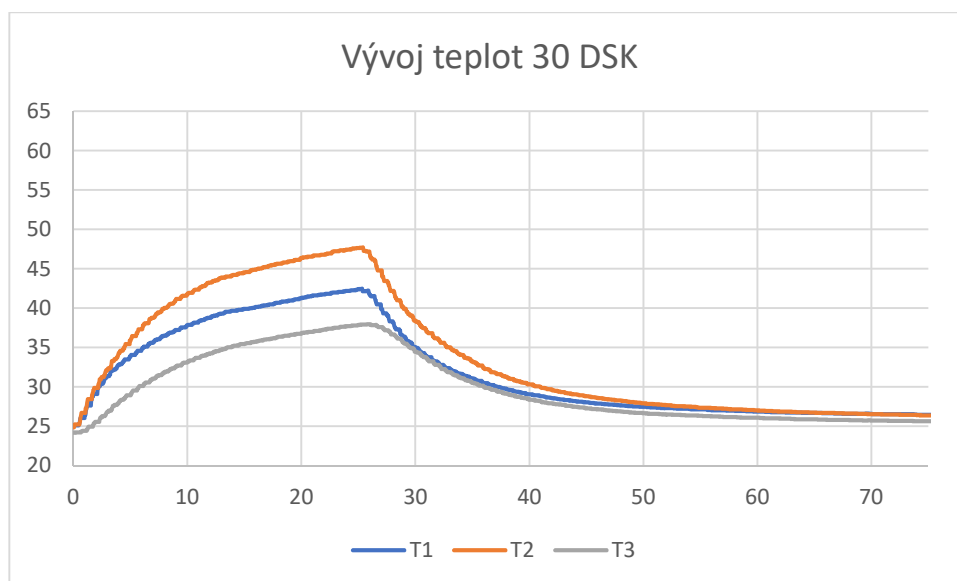
Graf 22: Vývoj teplot vzorku 20 dsk

Teploty u vzorku s 20 dsk rostou obdobně jako v předchozích případech. Také zde je vidět menší ovlivnění nárůstu teploty po 10. vteřině záznamu.

Nejvyšších hodnot bylo dosaženo na čele nástroje. Teplota dosáhla na 49,3 °C ve 26. vteřině.

Tabulka 35: Teploty vzorku 30 dsk

Procesní teploty 30 dsk			
čas	T1	T2	T3
[s]	[°C]		
0,0	25,12	24,93	24,23
10,0	37,96	41,83	33,25
25,4	42,27	47,72	37,94
30,0	34,94	38,41	34,56
60,0	26,95	27,05	26,17



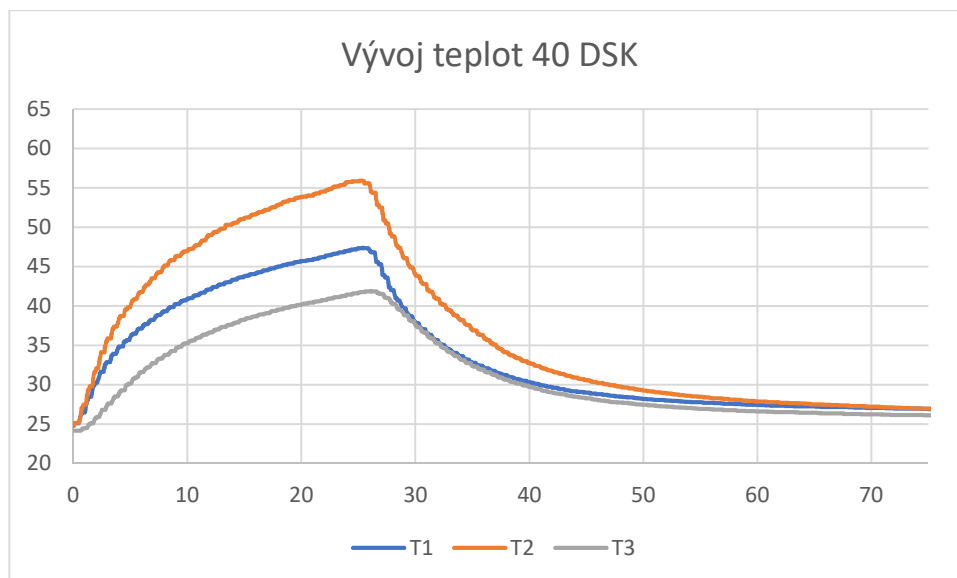
Graf 23: Vývoj teplot vzorku 30 dsk

Teploty u vzorku 30 dsk mají pomalejší nárůst, ale jinak jsou průběhy stejné jako u předchozích vzorků.

Nejvyšší teploty 47,7 °C bylo dosaženo na čele v 26. vteřině snímání.

Tabulka 36: Teploty vzorku 40 dsk

Procesní teploty 40 dsk			
čas	T1	T2	T3
[s]	[°C]		
0,0	25,16	24,81	24,23
10,0	40,94	47,12	35,34
25,4	47,35	55,92	41,81
30,0	37,85	44,01	37,61
60,0	27,46	27,96	26,65



Graf 24: Vývoj teplot vzorku 40 dsk

Vzorek s obsahem 40 dsk se navazuje na předchozí vzorky, Teploty se vyvíjely stejně, avšak maximální hodnoty jsou nižší.



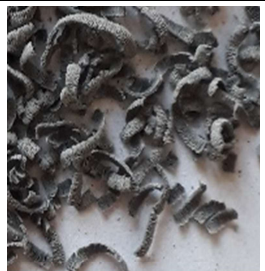






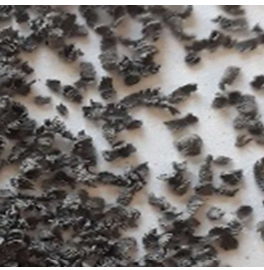






Nejvyšší teploty 55,9°C bylo dosaženo na čele nástroje v 26. vteřině měření.

Z měření plyne, že procesní teploty jsou ovlivněny obsahem uhlíkových vláken v obrobku. Nejvyšších teplot, se nedosahuje při soustružení vzorku s nejvyšším obsahem uhlíkových vláken, ale u vzorku s 10 dsk. Teplotní bilance může být ovlivněna různými tepelnými kapacitami jak obráběných tak nástrojových materiálů.

4.6 Tvorba třísky

Tvorba třísky je sekundárním jevem během procesu obrábění a je důležitým atributem z hlediska bezpečnosti práce, kvality obrobene plochy, hospodárnosti výroby a obrobiteľnosti materiálu [1, 9].

Tabulka 37: Tvorba třísky při osoustružení za konstantních podmínek

dsk	KONST.			
	RO	SK	SKS	KER
10				
20				
30				
40				

Jak plyne z tabulky 37, s rostoucím obsahem uhlíkových vláken v matrici se tříska zkracuje a stává se drobivější.

Rychlořezná ocel se během soustružení materiálů s obsahem 10 až 40 dsk vyznačovala vinutou třískou. Přestože si svůj tvar tříška zachovala tak se s rostoucím obsahem vláken výrazně zkracovala. Vylamování třísek bylo ovlivněno uhlíkovými vlákny, která svou přítomností přímo ovlivňují mechanické i technologické vlastnosti obrobku.

















Slinutý karbid vytvářel během soustružení obloukovité spojené třísky, avšak jak se měnil obsah vláken v obrobku, měnil se i tvar třísek. Třísky se stále zmenšovaly, dokud se nestaly elementárními. Tyto třísky jsou sice výhodné pro svůj nízký objemový součinitel a s tím spojenou efektivitu třískového hospodaření, na druhou stranu však představují problém pro obráběcí stroj, kterému můžou zanášet pojezdy a pohybové součásti. [9]

Slinutý karbid s povlakem TiN dociloval obdobných třísek jako slinutý karbid bez povlaku. Z obloukovitých spojených třísek se postupně stávaly elementární v závislosti na obsahu uhlíkových vláken. Mezi třískami SK a SKS tedy žádný zjevný rozdíl nebyl. [9]

Řezná keramika vytvářela již u vzorků s 10 dsk drobné, elementární třísky. Tvar a velikost třísek zůstal u všech vzorků stejný, což poukazuje na nezávislost tvorby třísky na obsahu uhlíkových vláken ve vzorku. [9]

Doposud popisované třísky byly tvořeny za konstantních podmínek soustružení. Tedy při hodnotách uvedených v tabulce 6, v kapitole 3.2. Toto srovnání je důležité pro stanovení závislosti vlastností třísky na obsahu uhlíkových vláken v obrobku. Pro hospodárnost výroby je však nutné volit pro každý nástrojový materiál jiné ideální podmínky a proto byl experiment zopakován při podmínkách vhodných pro daný nástroj. Procesní podmínky jsou uvedeny v tabulce 7 v kapitole 3.2.

Tabulka 38: Tvorba třísky při osoustružení za ideálních podmínek

dsk	IP			
	RO_IP	SK = SK_IP	SKS_IP	KER_IP
10				
20				
30				
40				

Při soustružení vzorků za optimálních podmínek pro každý nástrojový materiál nedocházelo k výrazným odlišnostem oproti experimentu za konstantních podmínek.

Nejpatrnější rozdíl v třísece byl u rychlořezné oceli při soustružení vzorku s 10 dsk. Vlivem nízkých řezných rychlostí docházelo k méně častému vylamování třísky, která dosahovala dlouhého stužkovitého tvaru, a její objemový součinitel dosahoval výrazně vysokých hodnot. [9]

Ostatní třísky vykazovaly přibližné stejné chování jako v předešlém experimentu. Pouze třísky oddělené řeznou keramikou byly ještě drobivější a prašnější.

5. Diskuze

Hlavním cílem předkládané diplomové práce bylo najít vhodné řezné nástroje pro hospodárné soustružení kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny.

Všechny základní poznatky, souvislosti a vztahy jsou uvedeny ve 2. kapitole, teoretické části.

Do této části práce jsou zahrnuty informace o kompozitních materiálech zpevněných nejen uhlíkovými vlákny (podkapitola 2.1), problematika a vlivy doprovázející tvorbu třísky (podkapitola 2.2) a současný stav (podkapitola 2.2.1) popisující experimenty uskutečněné v minulosti.

Hlavním záměrem bylo prozkoumat vlivy na různé řezné nástroje působící na obrobek epoxidové pryskyřice s danými plnostmi uhlíkových vláken. Dosažení tohoto cíle je věnována celá kapitola 3.

Úvodní část kapitoly 3 obsahuje informace o metodice, která se věnuje přípravě směsí a forem (podkapitola 3.1), volbě nástrojů a řezných podmínek (podkapitola 3.2), přípravě vzorků a pracoviště pro experiment (podkapitola 3.3). Dále jsou zde popsány postupy měřících metod a měřících zařízení, na kterých probíhal experiment. Je zde popsáno měření řezných sil (podkapitola 3.4), drsnosti povrchu (podkapitola 3.5), rozměrové přesnosti (podkapitola 3.6), opotřebení nástrojů (podkapitola 3.7) a měření procesních teplot (podkapitola 3.8)

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků je možno poukázat na následující:

- Řezná síla

V rámci výzkumu a měření řezných sil působících mezi nástrojem a obrobkem, byly provedeny kroky pro co nejpřesnější měření, které jsou popsány v podkapitole 3.

Výstupem experimentu, byla naměřená data v programu LabView, z kterého byly hodnoty zpracovány a následně vyhodnoceny v prostředí Excel

Měření probíhalo za podmínek neměnných (konstantních) a podmínek přizpůsobených (ideálních) pro každý nástrojový materiál.

Během odebírání třísky při konstantních podmínkách, tedy podmínkách uvedených v tabulce 8 v kapitole 3.1, nedocházelo k vysokým rozdílům působících sil.

Přestože si síly působící na dané nástrojové materiály nejsou zcela rovny, tak rozdíly nejsou velké a prakticky u všech vzorků nabývají podobných hodnot v závislosti na obsahu uhlíkových vláken. Podrobné výsledky jsou k nalezení v kapitole 3.1 nebo v příloze v sešitu Excel.

Oproti tomu se výsledky soustružení za ideálních podmínek výrazně liší.

Tabulka 39: Hodnoty řezných sil při soustružení vzorku 0 dsk za ideálních podmínek

Řezné síly 0 dsk				
materiál	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP
n [1/min]	180	560	900	1400
F [N]	36,71	52,63	62,14	57,92

Již při soustružení čisté epoxidové pryskyřice je zřejmá závislost řezných sil na otáčkách obrobku. V souladu s dosavadními poznatky [9] je řezná síla úměrná řezné rychlosti. V praxi se to projevuje hodnotami v tabulce 39.

Zlom nastává u ideálních podmínek řezné keramiky, kdy v důsledku vysokých otáček docházelo k nestabilnímu vylamování třísek. Epoxidová pryskyřice je křehký materiál, který praská již při působení nízkých vnějších sil. Proto lze za daných podmínek nalézt otáčky bodu zlomu, kdy začne docházet k nestabilnímu obrábění a řezná síla dosáhne svého maxima.

Závislosti řezných sil nejen na otáčkách, ale i obsahu uhlíkových vláken jsou uvedeny v následujících měřeních.

Tabulka 40: Hodnoty řezných sil při soustružení vzorku 10 dsk za ideálních podmínek

Řezné síly 10 dsk				
materiál	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP
n [1/min]	180	560	900	1400
F [N]	50,56	62,19	68,25	84,93

Jak plyne z tabulky 40: přidáním uhlíkových vláken do pryskyřice řezné rychlosti stouply. Zatímco rychlořezná ocel se pohybuje kolem 50 N, tak řezná keramika dosahuje hodnot 85 N, tedy o polovinu vyšších než rychlořezná ocel. Rozdíly v působících silách mezi slinutými karbidy s povlakem a bez jsou přibližně 10%.

Tabulka 41: Hodnoty řezných sil při soustružení vzorku 20 dsk za ideálních podmínek

Řezné síly 20 dsk				
materiál	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP
n [1/min]	180	560	900	1400
F [N]	54,1	64,2	77,8	92,6

Dalším navýšením sil se projevuje vzorek s obsahem 20 dsk. Síly narostly v průměru o 10% oproti předchozímu vzorku. Tento trend je v souladu s přidáváním uhlíkových vláken, která mají vysokou tvrdost.

Tabulka 42: Hodnoty řezných sil při soustružení vzorku 30 dsk za ideálních podmínek

Řezné síly 30 dsk				
materiál	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP
n [1/min]	180	560	900	1400
F [N]	67,64	63,85	71,62	97,71

Zatímco se rychlořezná ocel a řezná keramika drží trendu zvyšujících se řezných sil (RO o 25 %, KER o 6 %), tak se slinuté karbidy výrazněji nemění, dokonce klesají (SKS o -9 %). Tento jev může být způsoben nehomogenitou vnitřní struktury obrobku, jelikož se zvyšujícím se obsahem uhlíkových vláken roste technologická náročnost zpracování směsí pro odlévání.

Tabulka 43: Hodnoty řezných sil při soustružení vzorku 40 dsk za ideálních podmínek

Řezné síly 40 dsk				
materiál	RO_IP	SK_IP	SKS_IP	KER_IP
n [1/min]	180	560	900	1400
F [N]	64,63	71,93	81,03	95,84

Nárůst řezných sil u materiálu s obsahem 40 dsk se oproti předchozím vzorkům zpomalil. Síly narostly oproti 30 dsk v průměru o 5%. Toto zpomalení nárůstu může být způsobeno nasycením matrice a dosažením nejvyšších mechanických vlastností kompozitu. Z technologických důvodů nelze odlévat epoxidovou pryskyřici

s obsahem 50 dsk, proto kompozit s obsahem 40 dsk můžeme označit za nasycený. Přibližováním se k tomuto stavu se zhoršují podmínky pro obrábění a snižují se rozdíly ve vlastnostech materiálu.

- Povrchová drsnost

V rámci měření povrchových drsností byly obrobky zkoumány profilometrem Mitutoyo Surftest SV-2000N2. Přístroj měří dotykovou metodou, kdy sonda s diamantovou kuželovou špičkou přejíždí po povrchu a výchylky vertikální osy převádí do elektrického signálu, jenž je přenášen do softwaru Surfpack. Obrobky byly vyhodnocovány dle parametrů drsnosti *Ra*, *Rz* a *Rt*.

Tabulka 44: Povrchová drsnost vzorku 0 dsk

Povrchová drsnost 0 dsk							
[μm]	Ra	Rz	Rt	[μm]	Ra	Rz	Rt
RO	7,15	47,08	50,78	RO_IP	6,403	44,42	50,70
SK	5,49	29,74	44,50	SK_IP	5,492	29,75	44,50
SKS	5,15	31,66	38,48	SKS_IP	4,846	31,32	42,95
KER	5,65	30,06	36,83	KER_IP	4,55	33,74	46,78

Čistá pryskyřice se během soustružení jevila jako velmi prašný materiál s často vylamující se třískou. Výsledné drsnosti se pohybovaly v poměrně vysokých hodnotách, z celkového pohledu byla výsledná drsnost povrchu u toho vzorku nejvyšší.

Nejvyšších drsností tj. 7,15 μm se dosahovalo při použití rychlořezné oceli. Oproti tomu slinutý karbid s povlakem i bez a řezná keramika dosahují přibližně stejných drsností, tj. 5,49 – 5,65 μm

Na povrchu byly jasné nerovnosti a vruby vzniklé vylamováním třísky. Už z běžného pohledu byly vidět povrchové nedokonalosti a nehomogenita povrchu.

Tabulka 45: Povrchová drsnost vzorku 10 dsk

Povrchová drsnost 10 dsk							
[μm]	Ra	Rz	Rt	[μm]	Ra	Rz	Rt
RO	7,35	30,75	35,50	RO_IP	7,14	31,88	37,5
SK	3,29	19,10	24,23	SK_IP	3,29	19,10	24,23
SKS	3,11	17,88	23,11	SKS_IP	3,15	18,55	23,60
KER	2,93	14,99	19,74	KER_IP	2,84	15,62	19,65

Přidáním vláken došlo ke značné stabilizaci procesu obrábění. Všechny hodnoty, kromě rychlořezné oceli, výrazně klesly a povrch obrobene plochy se stal kompaktnějším.

Také lze pozorovat větší rozdíly v nástrojových materiálech. Zatímco rychlořezná ocel dosahuje opět nejvyšších drsností tj. 7,35 μm tak u dalších materiálů se začínají projevovat různé materiálové vlastnosti. Povrchové parametry viditelně klesají s užíváním nástrojových povlaků a materiálů s vyšší tvrdostí. Neoptimálnějším nástrojem z pohledu povrchové jakosti se jeví řezná keramika s drsností 2,85 μm .

Během soustružení nedocházelo k vylamování třísek a na obrobku lze pozorovat stopy nástroje. Zvýšila se stabilita soustružení, povrchová homogenita a kvalita obrobene plochy.

Tabulka 46: Povrchová drsnost vzorku 20 dsk

Povrchová drsnost 20 dsk							
[μm]	Ra	Rz	Rt	[μm]	Ra	Rz	Rt
RO	6,20	32,82	41,12	RO_IP	5,26	28,24	38,24
SK	3,10	17,25	21,81	SK_IP	3,10	17,25	21,81
SKS	3,03	16,73	21,72	SKS_IP	3,12	18,50	24,12
KER	2,67	14,08	18,07	KER_IP	2,73	13,99	17,46

Ještě lepší vlastnosti vykazoval obrobene vzorek s 20 dsk. Měřené parametry opět poklesly a kvalita povrchu zůstala stejná. Toto měření zároveň potvrzuje trend klesajících drsností s rostoucím obsahem vláken.

Rychlořezná ocel opět dosahuje nejvyšších (6,21 μm) a keramika nejnižších (2,68 μm) hodnot drsnosti.

Výsledný povrch neobsahuje viditelné vady a je kompaktní. K nevhodnému vylamování třísek nebo zvýšené prašnosti nedocházelo.

Tabulka 47: Povrchová drsnost vzorku 30 dsk

Povrchová drsnost 30 dsk							
[μm]	Ra	Rz	Rt	[μm]	Ra	Rz	Rt
RO	4,78	25,48	31,94	RO_IP	4,99	26,39	34,28
SK	3,27	18,31	21,71	SK_IP	3,27	18,31	21,71
SKS	3,257	18,41	24,76	SKS_IP	3,61	18,41	21,97
KER	3,01	14,86	19,30	KER_IP	3,48	17,52	25,31

Povrchové vlastnosti při soustružení vzorku s 30 dsk byly ovlivněny technologickými nedokonalostmi během odlévání směsí. Vzorek s 30 dsk byl těžce mísitelný a docházelo k nedokonalému promíchání. Z toho důvodu nebyly vzorky zcela homogenní a zůstaly v něm drobné bublinky vzduchu.

Rychlořezná ocel je opět nejméně vhodným nástrojovým materiálem z pohledu povrchových vlastností. Dosahovala 5,00 μm . A řezná keramika nejlepším. Dosahovala 3,02 μm , i přesto že se drsnosti oproti předchozímu vzorku zvýšily.

Na povrchu jsou vidět vzduchové bubliny, které zde zůstaly po obrábění. Důlky vzniklé vzduchem výrazně ovlivnily povrchové vlastnosti a homogenitu povrchu.



Obrázek 35: Vzduchové bubliny na povrchu obrobku

Tabulka 48: Povrchová drsnost vzorku 40 dsk

Povrchová drsnost 40 dsk							
[μm]	Ra	Rz	Rt	[μm]	Ra	Rz	Rt
RO	6,02	31,42	37,25	RO_IP	5,09	26,96	37,77
SK	3,99	23,13	24,85	SK_IP	3,99	23,13	24,85
SKS	3,44	18,73	28,34	SKS_IP	3,40	17,90	21,55
KER	3,36	17,47	21,69	KER_IP	3,65	18,46	27,68

Vzduchové bubliny doprovázely i soustružení vzorku s 40 dsk. Povrchové vlastnosti byly ovlivněny podobným způsobem jako u předchozího vzorku s rozdílem, že slinutý karbid s povlakem a řezná keramika dosahují navzájem blízkých hodnot, tj. 3,40 – 3,65 μm .

Na povrchu jsou opět vzduchové bubliny, které nepříznivě ovlivňují povrchové vlastnosti obrobku.

- Rozměrová přesnost

Rozměrová přesnost byla měřena pomocí mikrometru měřícím s přesností 0,001 mm. Každý vzorek byl měřen 5x po obvodu vždy na začátku a konci obrobené plochy. Výsledné hodnoty byly statisticky zpracovány a výsledky podrobeny rozboru:

Tabulka 49: Rozměrová přesnost

Rozměrová přesnost								
[mm]	ΔRO	ΔSK	ΔSKS	ΔKER	$\Delta\text{RO_IP}$	$\Delta\text{SK_IP}$	$\Delta\text{SKS_IP}$	$\Delta\text{KER_IP}$
0 dsk	0,013	0,026	0,020	0,001	0,006	0,002	-0,001	-0,002
10 dsk	0,010	0,005	0,005	0,000	0,009	0,004	0,003	0,011
20 dsk	0,007	0,001	0,009	0,008	0,004	0,002	0,005	0,008
30 dsk	0,006	0,008	0,004	0,002	0,006	0,005	0,004	0,002
40 dsk	0,009	0,003	0,005	0,003	0,010	0,003	0,003	0,001

Téměř u všech nástrojových materiálů lze pozorovat zvýšenou rozměrovou přesnost se zvyšujícím se obsahem dsk. S vyšším obsahem uhlíkových vláken v matici se stává soustružení stabilnějším a rozměrová přesnost se zvyšuje.

Jak plyne z tabulky 49: nejvyšších rozměrových přesností dosahovala řezná keramika a slinutý karbid s povlakem za ideálních podmínek

Jak ale plyne z předchozích měření tak zvyšující se přesnost výroby je spojena se zvyšujícími se nároky na zpracování a odlévání směsí.

Budou-li požadavky na tolerance výrobků velmi vysoké, porostou náklady na výrobu odlitků

Dalším jevem doprovázející proces byly kladné difference rozměrů. Pokud je difference kladná, znamená to, že během odebírání třísky vznikalo teplo, které obrobek rozpínalo vlivem teplotní roztažnosti.

Záporné difference rozměrů jsou v rámci statistické odchylky.

- Opotřebení

Měření probíhalo na dílenském mikroskopu ZEISS s pohyblivým stolem. Pohyb stolu je řízen mikrometrovými šrouby, ze kterých je následně odečítáno opotřebení nástroje.

Tabulka 50: Opotřebení nástrojů po obrobení vzdálenosti 1000 mm

Opotřebení nástrojů po 1000 mm				
[mm]	RO	SK	SKS	KER
0 dsk	0,08	0,00	0,11	0,00
10 dsk	0,41	0,04	0,23	0,10
20 dsk	0,53	0,04	0,14	0,08
30 dsk	0,60	0,05	0,15	0,08
40 dsk	0,81	0,06	0,19	0,10

Opotřebení nástrojových materiálů roste s obsahem uhlíkových vláken. Vlákna s vysokou tvrdostí přidávána do matrice zvyšují síly působící na nástroj a snižují jejich životnost. Nejpatrnější opotřebení se projevilo u rychlořezné oceli. Při soustružení vzorku 40 dsk dosahovala opotřebení 0,805 mm. Materiál špatně odolával uhlíkovým vláknům a po obrobení již 100 mm byla patrná deformace špičky nástroje

Dalším nevhodným materiálem pro obrábění těchto kompozitů byl slinutý karbid s povlakem TiN, který vykazoval na vzdálenosti 100 mm největší opotřebení, tj. 0,105 mm. Tenká vrstva brzy ztratila své adhezní síly a odloučila se. Po ztrátě této vrstvy nástroj pracoval jádrem ze slinutého karbidu a k dalšímu výraznému opotřebení nedocházelo.

Naopak Slinutý karbid bez povlaku a řezná keramika dosahovaly obdobných hodnot opotřebení a projevovaly se jako nejlepší nástrojové materiály.

Podrobné záznamy opotřebení a fotky špiček nástrojů jsou k nalezení v kapitole 3.4.

- Procesní teploty

Teploty byly měřeny třemi termočlánky přivařenými na VBD. Naměřené hodnoty a jejich průběhy jsou součástí kapitoly 5.

Tabulka 51: Maximální dosažené hodnoty

Maximální Teploty		
	[°C]	[s]
0 dsk	54,52	25
10 dsk	61,55	
20 dsk	49,38	
30 dsk	47,72	
40 dsk	55,92	

Jak plyne z tabulky 51: procesní teploty jsou ovlivněny obsahem uhlíkových vláken v obrocích. Nejvyšších hodnot bylo docíleno v 25. vteřině snímání, což byl čas konce dotyku nástroje a obrobku. Lze předpokládat, že při soustružení delších vzdáleností by teploty nadále rostly.

Nejvyšších teplot, tj. 61,5 °C, se nedosahovalo při soustružení vzorku s nejvyšším obsahem uhlíkových vláken, ale u vzorku s 10 dsk. Tento jev může být způsoben různými tepelnými kapacitami matrice a plniv. Každá složka akumuluje teplo dle svých vlastností a výsledná teplota závisí na tepelných kapacitách a stupni plnění. Do tepelné bilance dále zasahuje nástrojový materiál, který odvádí určité procento tepla.

- Tvorba třísky

Odběr třísky probíhal po soustružení daných nástrojových materiálů. Po odebrání vzorků bylo pracoviště uklizeno, aby nedošlo k následnému znehodnocení vzorků a smíchávání třísek různých vlastností.

Třísky byly zkoumány nejprve po soustružení za konstantních podmínek. Tento výzkum byl důležitý pro stanovení závislosti vlastností třísky na obsahu uhlíkových vláken v obrobku. Jak plyne z tabulky 37 v kapitole 3.6:

Rychlořezná ocel se během soustružení materiálů s obsahem 10 až 40 dsk vyznačovala vinutou třískou. Přestože si svůj tvar tříska zachovala, tak se s rostoucím obsahem vláken výrazně zkracovala. Vylamování třísek bylo ovlivněno uhlíkovými vlákny, která svou přítomností přímo ovlivňují mechanické i technologické vlastnosti obrobku.

Slinutý karbid vytvářel během soustružení obloukovité spojené třísky, avšak jak se měnil obsah vláken v obrobku, měnil se i tvar třísek. Třísky se stále zmenšovaly, dokud se nestaly elementárními. Tyto třísky jsou sice výhodné pro svůj nízký objemový součinitel a s tím spojenou efektivitu třískového hospodaření, na druhou stranu však představují problém pro obráběcí stroj, kterému můžou zanášet pojezdy a pohybové součásti.

Slinutý karbid s povlakem TiN dociloval obdobných třísek jako slinutý karbid bez povlaku. Z obloukovitých spojených třísek se postupně stávaly elementární v závislosti na obsahu uhlíkových vláken. Mezi třískami SK a SKS tedy žádný zjevný rozdíl nebyl.

Řezná keramika vytvářela již u vzorků s 10 dsk drobné, elementární třísky. Tvar a velikost třísek zůstal u všech vzorků stejný, což poukazuje na nezávislost tvorby třísky na obsahu uhlíkových vláken ve vzorku.

Pro hospodárnost výroby je však nutné volit pro každý nástrojový materiál jiné ideální podmínky a proto byl experiment zopakován při podmínkách vhodných pro daný nástroj. Procesní podmínky jsou uvedeny v tabulce 7 v kapitole 3.2.

Jak plyne z tabulky 38 v kapitole 3.6:

Při soustružení vzorků za optimálních podmínek nedocházelo k výrazným odlišnostem oproti experimentu za konstantních podmínek.

Nejpatrnější rozdíl v třísce byl u rychlořezné oceli při soustružení vzorku s 10 dsk. Vlivem nízkých řezných rychlostí docházelo k méně častému vylamování třísky, která dosahovala dlouhého stužkovitého tvaru, a její objemový součinitel dosahoval výrazně vysokých hodnot.

Ostatní třísky vykazovaly přibližné stejné chování jako v předešlém experimentu. Pouze třísky oddělené řeznou keramikou byly ještě drobivější a prašnější.

6. Závěr

Předložená diplomová práce na téma Řezné nástroje pro hospodárné soustružení kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny přispívá k rozšíření poznatků o obrábění těchto materiálů se specifickými vlastnostmi.

Práce je členěna do dvou hlavních částí.

V teoretické části byl proveden rozbor dané problematiky. Pozornost byla věnována kompozitním materiálům plněným nejen uhlíkovými vlákny a jejich obrábění.

Experimentální část byla zaměřena na měření řezných sil působících na nástroj během soustružení kompozitních materiálů plněných danými obsahy uhlíkových vláken. Dále na výsledné drsnosti povrchů a rozměrové přesnosti soustružení. Také bylo zkoumáno opotřebení nástrojových materiálů, procesní teploty během obrábění a druhy třísek tvořené danými nástroji.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků lze formulovat následující:

1. Z použitých nástrojových materiálů, kterými byly rychlořezná ocel, slinutý karbid, slinutý karbid s povlakem TiN a řezná keramika, dosahovala nevyšších řezných sil řezná keramika při soustružení vzorku s nejvyšším plněním 40 dsk. Měřením se potvrdil trend zvyšujících se řezných sil se zvyšujícím se obsahem uhlíkových vláken. Přidáváním plniv s vyšší tvrdostí dochází ke zpevnění obrobku, což způsobuje nárůst sil při soustružení.
2. Nejnižší a velmi blízké drsnosti obrobené plochy vykazovaly slinuté karbidy s povlakem i bez a řezná keramika. Rychlořezná ocel naopak nepředstavovala vhodný materiál pro parametr povrchové jakosti. Dále se projevil vliv obsahu uhlíkových vláken. Vláknata stabilizovala proces obrábění a s jejich rostoucím obsahem klesala drsnost povrchu. Tento pozitivní vliv byl však omezen technologickou zpracovatelností směsí pro odlévání vzorků. Vzorky s vyšším obsahem uhlíkových vláken byly špatně mísitelné a na povrchu obrobku bylo možné pozorovat drobné vzduchové bubliny, které ovlivňovaly homogenitu obrobené plochy.

3. Rozměrová přesnost všech nástrojových materiálů se zvyšovala s obsahem uhlíkových vláken v obrobku. Slinutý karbid s povlakem i bez a řezná keramika dosahovaly nejlepších výsledků a rychlořezná ocel nejhorších. Dále vzorky vykazovaly kladné diference rozměrů, což bylo způsobeno rozpínáním obrobku během soustružení.
4. U opotřebení se zcela projeví rozdíly ve vlastnostech jednotlivých nástrojů. Materiálem s nejvyšší životností byla řezná keramika a slinutý karbid bez povlaku. U těchto materiálů docházelo k minimálnímu otěru a opotřebení. Oproti tomu slinutý karbid s povlakem TiN přišel velmi brzy o svou tenkou vrstvu. Po ztrátě povlaku však nástroj pracoval dále tvrdým jádrem a k dalšímu viditelnému opotřebení nedocházelo. Rychlořezná ocel vykazovala opotřebení již po krátkých vzdálenostech soustružení a postupně docházelo k výrazným deformacím špičky nástroje.
5. Při měření procesních teplot se projevovaly různé tepelné kapacity polymeru a uhlíkových vláken. Teploty nerostly ani neklesaly lineárně a lišily se dle obsahu vláken. Nejvyšších teplot se dosahovalo při soustružení vzorku s obsahem 10 dsk.
6. Také třísky se měnily s obsahem uhlíkových vláken. U všech materiálů bylo patrné zkracování třísky s rostoucím obsahem dsk. Třísky slinutého karbidu s povlakem i bez a řezné keramiky dosahovaly drobných, elementárních třísek. Pouze rychlořezná ocel měla ucelenou vinutou třísku, která se ale zkracovala v závislosti plnění vzorků.

Jak plyne z bodů uvedených výše, slinutý karbid s povlakem TiN ani rychlořezná ocel nebyly pro proces obrábění vhodné. Slinutý karbid přišel velmi brzo o svou vrstvu, a ta se stala nepraktickou. Oproti tomu rychlořezná ocel podléhala uhlíkovým vláknům v obrobku a nedosahovala požadované jakosti výroby.

Nejvhodnějšími materiály pro obrábění kompozitního materiálu na bázi reaktoplastu s uhlíkovými vlákny byla řezná keramika a slinutý karbid bez povlaku. Tyto materiály splňovaly požadavky na jakost výroby i životnost nástrojů a proto jsou z technologického hlediska nejoptimálnější. Volba mezi těmito nástroji již záleží na následné technologické operaci.

7. Zdroje:

[1] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.

[2] *Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling*. Science Direct [online]. 2014 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114000298>

[3] *Investigation on the Turning Parameters for Surface Roughness using Taguchi Analysis*. Science Direct [online]. Vellore, 2012 [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813001136>

[4] *Vláknové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a výroba* [online]. 1. Praha: FS ČVUT, 2007 [cit. 2018-03-023]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/seminar/2_seminar/1_materialy_technologie.pdf

[5] *High Speed Turning of Carbon Fiber – Epoxy Composite Material*. Research Gate [online]. Vellore, 2014 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/289368124_High_Speed_Turning_of_Carbon_Fiber_-_Epoxy_Composite_Material

[6] LIDAŘÍK, Miloslav. *Epoxidové pryskyřice*. 3., přeprac. a rozš. vyd. Praha: SNTL, 1983. *Makromolekulární látky*.

[7] *The discovery of carbon fibers and the practical side of phase diagrams*. The American Ceramic Society [online]. 2013 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://ceramics.org/ceramic-tech-today/the-discovery-of-carbon-fibers-and-the-practical-side-of-phase-diagrams>

[8] *Výztuž zdiva. ŽELEX* [online]. 2012 [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <http://www.zelex.cz/podrubrika.php?ID=22>

[9] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.

- [10] BILÍK, Oldřich. *Obrábění II: [Určeno pro posl. 4. roč. fak. stroj.]*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1994. ISBN 80-7078-228-5.
- [11] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [12] MÁDL, Jan. *Jakost obráběných povrchů*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, ÚTRV, 2003. ISBN 80-7044-539-4.
- [13] *Technologie III - obrábění: Základní konvenční technologie obrábění - soustružení [online]*. 1. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2012 [cit. 2018-03-028]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/educom/MZ04/VY_03_057.pdf
- [14] *Základy třískového obrábění [online]*. Zlín: SŠ-COPT, 2016 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=18765&instance=2>
- [15] *Obrábění a zpracování kovů [online]*. 1. Olomouc: ELUC, 2015 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1199>
- [16] *Příručka pro technology - Opatření se nevyhneme!*. MM Spectrum [online]. 2012(6) [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [17] ZBONČÁK, Radek. *Metody odhadu mechanických vlastností dlouhovlákněného kompozitu: kompozitní materiály*. Liberec: VÚTS, 2017. ISBN 978-80-87184-71-4.
- [18] *CHS-EPOXY 520 [online]*. Bratislava: Sincolor Slovakia, 2016 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: https://www.sincolor.cz/out/pictures/wysiwigpro/TAL13_EPOXY_520_15_sk.pdf
- [19] *Carbiso TM [online]*. Cannon Business Park: ELG Carbon Fiber, 2016 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://www.composite.kr/images/pdf/Carbiso-MF.pdf>
- [20] *Katalog nástrojů pro soustružení Pramet [online]*. Pramet Tool s.r.o, 2016 [cit. 2018-01-04]. Dostupné z: ecat.pramet.com/

8. Seznam obrázků

1. OBRÁZEK 1: MAKROKOMPOZIT	10
2. OBRÁZEK 2: UHLÍKOVÁ VLÁKNO	11
3. OBRÁZEK 3: PRODLOUŽENÍ MATRIC A PLNIV	12
4. OBRÁZEK 4: 2D ORIENTACE UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	13
5. OBRÁZEK 5: ORIENTACE 3D UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	14
6. OBRÁZEK 6: SOUSTRUŽENÍ	15
7. OBRÁZEK 7: PRŮŘEZ TŘÍSKY	16
8. OBRÁZEK 8: TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ.....	17
9. OBRÁZEK 9: TEPELNÁ BILANCE BEZ PROCESNÍCH KAPALIN	17
10. OBRÁZEK 10: DRUHY TŘÍSEK	18
11. OBRÁZEK 11: OPOTŘEBENÍ ŠPIČKY NÁSTROJE	19
12. OBRÁZEK 12: MĚŘENÍ SIL PŘI SOUSTRUŽENÍ CRFP	20
13. OBRÁZEK 13: SMĚŠ S PLNIVEM	23
14. OBRÁZEK 14: SPÁLENÉ VZORKY ČISTÉ PRYSKYŘICE	23
15. OBRÁZEK 15: ODLITKY	24
16. OBRÁZEK 16: POLOTOVAR HSS	24
17. OBRÁZEK 17: STRUKTURA SK	24
18. OBRÁZEK 18: STRUKTURA SKS	25
19. OBRÁZEK 19: STRUKTURA KER	25
20. OBRÁZEK 20: VBD	25
21. OBRÁZEK 21: SOUSTRUH SU-50	26
22. OBRÁZEK 22: SOUSTRUŽNICKÝ PŘÍPRAVEK.....	27
23. OBRÁZEK 23: KALIBRACE DYNAMOMETRU	28
24. OBRÁZEK 24: PRŮBĚH PŮSOBÍCÍCH SIL	28
25. OBRÁZEK 25: PODROBNÝ PRŮBĚH PŮSOBÍCÍCH SIL	29
26. OBRÁZEK 26: MITUTOYO SURFTEST SV-200N2	29
27. OBRÁZEK 27: BODY MĚŘENÍ DRSNOSTI	30

28. OBRÁZEK 28: UMÍSTĚNÍ TERMOČLÁNKŮ	31
29. OBRÁZEK 29: PŘIVAŘENÉ TERMOČLÁNKY.....	31
30. OBRÁZEK 30: OBROBEK 0 DSK	38
31. OBRÁZEK 31: OBROBEK 10 DSK	39
32. OBRÁZEK 32: OBROBEK 20 DSK	40
33. OBRÁZEK 33: OBROBEK 30 DSK	41
34. OBRÁZEK 34: OBROBEK 40 DSK	42
35. OBRÁZEK 35: VZDUCHOVÉ BUBLINY NA POVRCHU OBROBKU	67

9. Seznam tabulek

1. TABULKA 1: MECHANICKÉ VLASTNOSTI PRYSKYŘIC	12
2. TABULKA 2: POROVNÁNÍ VLÁKEN A KOMPAKTNÍCH MATERIÁLŮ.....	14
3. TABULKA 3: PLNĚNÍ VZORKŮ	21
4. TABULKA 4: VLASTNOSTI EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE	22
5. TABULKA 5: VLASTNOSTI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	22
6. TABULKA 6: KONSTANTNÍ PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ.....	26
7. TABULKA 7: IDEÁLNÍ PODMÍNKY	26
8. TABULKA 8: PODMÍNKY OBRÁBĚNÍ	32
9. TABULKA 9: ŘEZNÉ SÍLY 0 DSK.....	32
10. TABULKA 10: ŘEZNÉ SÍLY 10 DSK.....	33
11. TABULKA 11: ŘEZNÉ SÍLY 20 DSK.....	34
12. TABULKA 12: ŘEZNÉ SÍLY 30 DSK.....	35
13. TABULKA 13: ŘEZNÉ SÍLY 40 DSK.....	36
14. TABULKA 14: ROZMĚROVÁ PŘESNOST VZORKU 0 DSK.....	42
15. TABULKA 15: DIFERENCE ROZMĚRŮ VZORKU 0 DSK	43
16. TABULKA 16: ROZMĚROVÁ PŘESNOST VZORKU 10 DSK.....	43
17. TABULKA 17: DIFERENCE ROZMĚRŮ VZORKU 10 DSK	44
18. TABULKA 18: ROZMĚROVÁ PŘESNOST VZORKU 20 DSK.....	44
19. TABULKA 19: DIFERENCE ROZMĚRŮ VZORKU 20 DSK	45
20. TABULKA 20: ROZMĚROVÁ PŘESNOST VZORKU 30 DSK.....	45
21. TABULKA 21: DIFERENCE ROZMĚRŮ VZORKU 30 DSK	46
22. TABULKA 22: ROZMĚROVÁ PŘESNOST VZORKU 40 DSK.....	46
23. TABULKA 23: DIFERENCE ROZMĚRŮ VZORKU 40 DSK	47
24. TABULKA 24: OPOTŘEBENÍ NÁSTROJOVÉHO MATERIÁLU Z RO.....	48
25. TABULKA 25: POSTUP OPOTŘEBENÍ NÁSTROJOVÉHO MATERIÁLU Z RO	48
26. TABULKA 26: OPOTŘEBENÍ NÁSTROJOVÉHO MATERIÁLU ZE SK.....	49
27. TABULKA 27: POSTUP OPOTŘEBENÍ NÁSTROJOVÉHO MATERIÁLU ZE SK	49
28. TABULKA 28: OPOTŘEBENÍ NÁSTROJOVÉHO MATERIÁLU ZE SKS.....	50

29. TABULKA 29: POSTUP OPOTŘEBENÍ NÁSTROJOVÉHO MATERIÁLU ZE SKS.....	51
30. TABULKA 30: OPOTŘEBENÍ NÁSTROJOVÉHO MATERIÁLU Z KER.....	51
31. TABULKA 31: POSTUP OPOTŘEBENÍ NÁSTROJOVÉHO MATERIÁLU Z KER.....	52
32. TABULKA 32: TEPLoty VZORKU 0 DSK	53
33. TABULKA 33: TEPLoty VZORKU 10 DSK	54
34. TABULKA 34: TEPLoty VZORKU 20 DSK	55
35. TABULKA 35: TEPLoty VZORKU 30 DSK	55
36. TABULKA 36: TEPLoty VZORKU 40 DSK	56
37. TABULKA 37: TVORBA TŘÍSKY PŘI OSOUSTRUŽENÍ ZA KONSTANTNÍCH PODMÍNEK	58
38. TABULKA 38: TVORBA TŘÍSKY PŘI OSOUSTRUŽENÍ ZA IDEÁLNÍCH PODMÍNEK	60
39. TABULKA 39: HODNOTY ŘEZNÝCH SIL PŘI SOUSTRUŽENÍ VZORKU 0 DSK ZA IDEÁLNÍCH PODMÍNEK.....	63
40. TABULKA 40: HODNOTY ŘEZNÝCH SIL PŘI SOUSTRUŽENÍ VZORKU 10 DSK ZA IDEÁLNÍCH PODMÍNEK.....	63
41. TABULKA 41: HODNOTY ŘEZNÝCH SIL PŘI SOUSTRUŽENÍ VZORKU 20 DSK ZA IDEÁLNÍCH PODMÍNEK.....	64
42. TABULKA 42: HODNOTY ŘEZNÝCH SIL PŘI SOUSTRUŽENÍ VZORKU 30 DSK ZA IDEÁLNÍCH PODMÍNEK.....	64
43. TABULKA 43: HODNOTY ŘEZNÝCH SIL PŘI SOUSTRUŽENÍ VZORKU 40 DSK ZA IDEÁLNÍCH PODMÍNEK.....	64
44. TABULKA 44: POVRCHOVÁ DRSNOST VZORKU 0 DSK.....	65
45. TABULKA 45: POVRCHOVÁ DRSNOST VZORKU 10 DSK.....	66
46. TABULKA 46: POVRCHOVÁ DRSNOST VZORKU 20 DSK.....	66
47. TABULKA 47: POVRCHOVÁ DRSNOST VZORKU 30 DSK.....	67
48. TABULKA 48: POVRCHOVÁ DRSNOST VZORKU 40 DSK.....	68
49. TABULKA 49: ROZMĚROVÁ PŘESNOST	68
50. TABULKA 50: OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ PO OBROBENÍ VZDÁLENOSTI 1000 MM	69
51. TABULKA 51: MAXIMÁLNÍ DOSAŽENÉ HODNOTY	70

Přílohy