

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301      Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Strojírenská technologie-technologie obrábění

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Přesné obrábění vnějších válcových ploch z kompozitních materiálů

Autor:                      **Otakar Mašek**

Vedoucí práce:        **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2012/2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Otakar MAŠEK**  
Osobní číslo: **S10B0124P**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Název tématu: **Přesné obrábění vnějších válcových ploch z kompozitních materiálů**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

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

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh vhodné metodiky obrábění
4. Závěr



Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**Astakhof, Viktor P., Tribology and interface engineering series, Elsevier, 2006, ISBN 0-444-52881-4**

**Shaw, Milton Clayton, Metal cutting principles, Oxford University Press, 2005, ISBN 0-19-514206-3**

**Juneja, B.L., Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools, New Age International, ISBN 978-81-224-1467-7**

**Staněk, Jiří, Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací, Západočeská univerzita, 2005, ISBN 80-7043-363-9**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Pošvář**

Compo Tech PLUS, s.r.o.

Ostatní konzultanti: **Ing. Ivana Česáková**


Katedra technologie obrábění

Datum zadání bakalářské práce: **29. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **28. června 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. listopadu 2012

## **PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....  
podpis autora

## **AUTORSKÁ PRÁVA**

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tato bakalářská práce byla podpořena formou odborné konzultace Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky v rámci projektu č. CZ.1.07/2.3.00/35.0048 „Popularizace výzkumu a vývoje ve strojním inženýrství a jeho výsledků (POPULÁR)“. Odborným konzultantem byl Ing. Miroslav Zetek, Ph.D., kterému děkuji za poskytnuté konzultace, kvalifikované rady a odbornou pomoc při sepsání této BP. Také bych rád poděkoval slečně Ing. Ivaně Česákové a panu Ing. Zdeňku Pošvářovi za cenné konzultace a neustálý kontakt při zpracování této práce.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Mašek	Jméno Otakar	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 - Strojírenská technologie–technologie obrábění		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Přesné obrábění vnějších válcových ploch z kompozitních materiálů		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2013
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	72	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	72	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Tématem této bakalářské práce je rozbor současného stavu oblasti soustružení a broušení kompozitních materiálů, které mají polymerní matrici vyztuženou skelnými nebo uhlíkovými vlákny. Dále pak zvolení vhodné metodiky pro bezhroté pásové broušení.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Kompozitní, matrice, CFRP, GFRP, vlákny, vyztužené, plasty, bezhroté.

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Mašek	Name Otakar	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Precision Machining of External Cylindrical Surfaces from Composite Materials		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	72	<b>TEXT PART</b>	72	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	The subject of this bachelor thesis is to analyze the current state of turning and grinding materials from fibre reinforcement plastic. Then select appropriate methodology for centerless belt grinding.
<b>KEY WORDS</b>	Composite, matrix, CFRP, GFRP, fibre, reinforcement, plastic, centerless

**OBSAH**

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU .....</b>	<b>13</b>
2.1 OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY .....	13
2.2 OBECNÁ PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ.....	15
2.2.1 <i>Mechanismus vzniku třísky.....</i>	<i>15</i>
2.2.1.1 Ortogonální řezání polymerů .....	15
2.2.1.2 Ortogonální řezání jednosměrných vláknových kompozitů .....	16
2.3 SOUSTRUŽENÍ .....	19
2.3.1 <i>Úhel natočení vláken při soustružení.....</i>	<i>20</i>
2.3.2 <i>Řezné materiály.....</i>	<i>21</i>
2.3.3 <i>Porovnání obráběných materiálů.....</i>	<i>29</i>
2.3.4 <i>Teploty při soustružení.....</i>	<i>30</i>
2.3.5 <i>Kvalita povrchu.....</i>	<i>32</i>
2.3.5.1 Vliv orientace vláken na kvalitu povrchu.....	32
2.3.5.2 Vliv řezných parametrů na kvalitu povrchu.....	33
2.3.6 <i>Ultrazvukové vibrační soustružení.....</i>	<i>36</i>
2.4 BROUŠENÍ.....	38
2.4.1 <i>Řezné síly.....</i>	<i>41</i>
2.4.2 <i>Povrchová drsnost.....</i>	<i>45</i>
2.4.3 <i>Bezhruté broušení.....</i>	<i>49</i>
2.4.4 <i>Volba brusného nástroje.....</i>	<i>52</i>
<b>3 NÁVRH VHODNÉ METODIKY OBRÁBĚNÍ.....</b>	<b>57</b>
3.1 VELIKOST ÚBĚRU MATERIÁLU .....	58
3.2 KVALITA OBROBENÉHO POVRCHU .....	60
3.3 ŘEZNÉ SÍLY.....	61
3.4 POROVNÁNÍ BRUSNÝCH PÁSŮ .....	62
3.5 GEOMETRICKÉ TOLERANCE .....	64
3.6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTŮ .....	65
<b>4 ZÁVĚR.....</b>	<b>66</b>
<b>5 ZDROJE .....</b>	<b>67</b>
<b>6 SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>69</b>



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1: Synergické chování složek kompozitu [1].....	13
Obrázek 2: Úhel natočení vláken [5].....	16
Obrázek 3: Způsob oddělování materiálu: Typ I a II [5].....	16
Obrázek 4: Způsob oddělování materiálu: Typ III [5].....	17
Obrázek 5: Způsob oddělování materiálu: Typ IV a V [5].....	17
Obrázek 6: Mikrostruktura obrobeného povrchu CFRP [5].....	18
Obrázek 7: Jednotlivé typy odebrání materiálu pro různé úhly čela [5].....	18
Obrázek 8: Tvoření třísky [5].....	19
Obrázek 9: Úhel natočení vláken při soustružení.....	20
Obrázek 10: Provedení řezné hrany [7].....	24
Obrázek 11: Opatření řezných materiálů [5].....	25
Obrázek 12: Závislost životnosti na řezné rychlosti [6].....	26
Obrázek 13: Závislost životnosti na řezné rychlosti.....	27
Obrázek 14: Závislost životnosti povlakovaného a nepovlakovaného slinutého karbidu.....	27
Obrázek 15: Životnost SK s povrchovou vrstvou z PCD v závislosti na řezné rychlosti při soustružení různých GFRP [6].....	29
Obrázek 16: Teplota na řezné hraně.....	30
Obrázek 17: Vliv řezných parametrů na teplotu.....	30
Obrázek 18: Úhel navinutí.....	32
Obrázek 19: Závislost drsnosti na úhlu navinutí pro různé hodnoty posuvu.....	33
Obrázek 20: Porovnání vlivu na drsnost Ra [10].....	35
Obrázek 21: Porovnání vlivu na drsnost R3z [10].....	35
Obrázek 22: Mechanismus ultrazvukového vibračního řezání - $v_c$ =řezná rychlost; $f$ =frekvence vibrací; $I_T$ =dráha obrobku během jedné periody vibrace řezného nástroje [6].....	36
Obrázek 23: Porovnání vibračního a konvenčního soustružení [6].....	37
Obrázek 24: Mikroskopické snímky povrchu [6].....	37
Obrázek 25: Úhel natočení vláken [8].....	38
Obrázek 26: Vnikání brusného zrna do materiálu [12].....	39
Obrázek 27: Pásovité broušení [12].....	40
Obrázek 28: Ukázka opotřebení [12].....	40
Obrázek 29: Závislost horizontální brusné síly na úhlu orientace vláken [11].....	41
Obrázek 30: Závislost vertikální brusné síly na úhlu orientace vláken [11].....	41
Obrázek 31: Módy zatěžování [13].....	42
Obrázek 32: Odebírání materiálu při $\theta = 0^\circ$ .....	42
Obrázek 33: Odebírání materiálu při $\theta = 45^\circ$ .....	43
Obrázek 34: Odebírání materiálu při $\theta = 90^\circ$ .....	43
Obrázek 35: Vertikální brusná síla v závislosti na hloubce řezu [14].....	44
Obrázek 36: Horizontální brusná síla v závislosti na hloubce řezu [14].....	44
Obrázek 37: Vliv úhlu orientace vláken na drsnost [11].....	45
Obrázek 38: Schéma odebírání materiálu s orientací vláken $\theta > 90^\circ$ [11].....	46
Obrázek 39: Struktura povrchu pro velmi malé hloubky řezu při $\theta = 90^\circ$ [11].....	46
Obrázek 40: Hloubka řezu 20 $\mu\text{m}$ , (a) $\theta = 0^\circ$ , (b) $\theta = 150^\circ$ [11].....	47
Obrázek 41: $\theta = 90^\circ$ , (a) hloubka řezu 20 $\mu\text{m}$ (b) hloubka řezu 50 $\mu\text{m}$ [11].....	47
Obrázek 42: Broušení v různých vrstvách vícesměrného kompozitu [14].....	48
Obrázek 43: Porovnání drsnosti pro jedno a vícesměrné kompozity [14].....	48
Obrázek 44: Schéma bezhrotého broušení-boční pohled [15].....	49

Obrázek 45: Schéma bezhrotého broušení- čelní pohled [15].....	50
Obrázek 46: Bezhroté obrábění pro $h=0$ [16].....	50
Obrázek 47: Určení zrnitosti [18].....	52
Obrázek 48: Struktura brusného kotouče [18].....	53
Obrázek 49: Pórovitost pro jednotlivé struktury kotouče [18].....	53
Obrázek 50: Porovnání značení zrnitosti SMIRKU a TRIZACTU [20].....	55
Obrázek 51: Typické pyramidy pro brusný pás Trizact [21].....	55
Obrázek 52: Typická trojúhelníková zrna brusného pásu Cubitron [22] .....	56
Obrázek 53: Porovnání tepelného ovlivnění obrobku [22] .....	56
Obrázek 54: Bezhrotá bruska - popis stroje.....	57
Obrázek 55: Schéma měření.....	59
Obrázek 56: Porovnání velikosti úběru .....	59
Obrázek 57: Porovnání hodnot drsnosti Rz.....	60
Obrázek 58: Porovnání řezných sil.....	61
Obrázek 59: Neopotřeбенý pás Trizact .....	62
Obrázek 60: Opotřeбенý brusný pás Trizact .....	63
Obrázek 61: Opotřeбенí brusného pásu SX373 P240 .....	63

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### Zkratky použité v textu

<b>FRP</b>	Vlákný vyztužený plast (Fiber reinforced plastic)
<b>GFRP</b>	Plast vyztužený skelnými vlákny (Glass fiber reinforced plastic)
<b>CFRP</b>	Plast vyztužený uhlíkovými (Carbon fiber reinforced plastic)
<b>VB</b>	Hodnota opotřebení břitu
<b>PCD</b>	Polykrystalický diamant
<b>CBN</b>	Kubický nitrid bóru
<b>SK</b>	Slinutý karbid
<b>f</b>	Frekvence vibrací
<b>I<sub>T</sub></b>	Dráha obrobku během jedné periody vibrace řezného nástroje

### Symboly použité v textu

$\theta$	Úhel orientace vláken	[°]
F	Síla	[N]
$\gamma_0$	Úhel čela	[°]
$\omega$	Úhel navinutí	[°]
R <sub>a</sub>	Střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
R <sub>sm</sub>	Průměrná šířka profilu	[μm]
R <sub>3Z</sub>	Základní hloubka drsnosti	[μm]
R <sub>z</sub>	Maximální výška profilu	[μm]
R <sub>t</sub>	Průměrná výška profilu	[μm]
R <sub>p</sub>	Největší výška výstupku	[μm]
R <sub>q</sub>	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R <sub>10Z</sub>	Výška nerovností z deseti bodů	[μm]
h	Výška	[mm]
a <sub>emin</sub>	Minimální tloušťka třísky	[mm]
v <sub>c</sub>	Řezná rychlost	[m/min]
$\alpha$	Úhel naklonění	[°]

## 1 Úvod

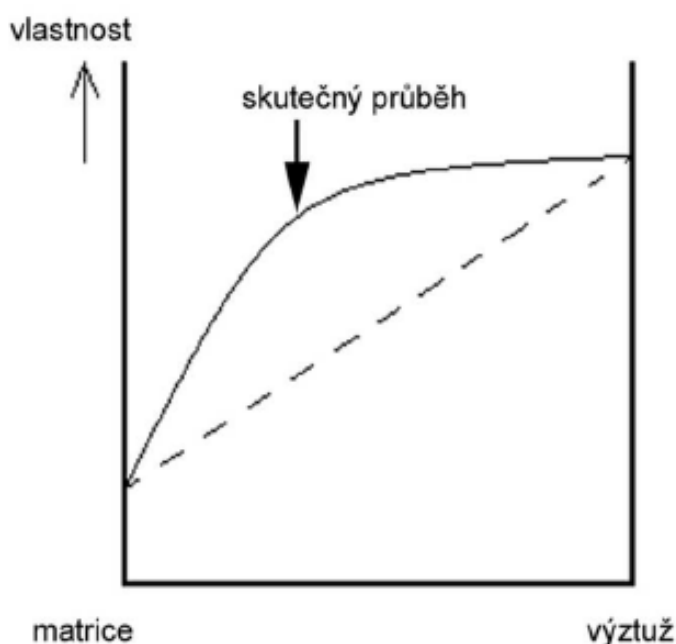
V současné době můžeme pozorovat nový trend nahrazování materiálů novými moderními materiály, například právě kompozitními materiály. Jejich využití je výhodné, protože mají vynikající mechanické vlastnosti při malé hmotnosti. Dříve byly tyto materiály používány spíše pro speciální aplikace, například v leteckém průmyslu, vzhledem k vyšší ceně materiálu. Vyráběly se přímo v požadovaných tvarech a obrábění nebylo potřeba. Postupem doby je ale jejich použití čím dál častější, protože kombinace lehké a přitom velmi pevné konstrukce je velmi výhodná. Vhodné uplatnění nacházejí například jako materiál pro rámy robotů díky výborné tuhosti a opět malé hmotnosti. Směr vývoje v automobilovém průmyslu také napovídá, že se bude poměr využití kompozitních materiálů oproti jiným materiálům neustále zvyšovat. Díky tomu vzniká i požadavek na zvýšenou přesnost výrobků, kterou lze dosáhnout jedině obráběním.

Existuje velké množství různých druhů kompozitních materiálů. Obrábění těchto materiálů je proto velmi rozsáhlá problematika a nelze určit obecná pravidla pro všechny materiály vzhledem k velké odlišnosti jednotlivých materiálů. Tato práce je proto zaměřena pouze na obrábění vláknou vyztužených plastů. Konkrétně na obrábění vnějších válcových ploch těchto materiálů s důrazem na výslednou přesnost a kvalitu povrchu. Důvodem je mimo jiné spolupráce s firmou Compo Tech PLUS s.r.o., která se výrobou a obráběním těchto materiálů zabývá. Vnější válcové plochy lze obrábět především soustružením a broušením. Cílem této práce je rozbor současného stavu obrábění vláknově vyztužených plastů právě těmito technologiemi. Pro ně je porovnávána vhodnost jednotlivých nástrojů a vliv řezných a dalších parametrů na výsledek obrábění. V práci jsou rovněž sledovány různé vlastnosti kompozitních materiálů a jejich vliv na obrábění. Práce si zároveň klade za cíl určit vhodnou metodiku obrábění pro konkrétní situaci firmy Compo Tech PLUS s.r.o. Ta bude určována zejména podle zkušeností zaměstnanců této firmy a experimentálně.

## 2 Rozbor současného stavu

### 2.1 Obráběné materiály

Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází. Tyto fáze se od sebe liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Kompozitní materiály se vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek. Jsou charakteristické tím, že jejich vlastnosti jsou lepší oproti poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Tato vlastnost se označuje jako tzv. synergismus. [1]



Obrázek 1: Synergické chování složek kompozitu [1]

Kompozitní materiály mají obvykle jednu spojitou fázi, tu nazýváme matrice. Další fáze bývá nespojitá, tu nazýváme výztuž.

Materiály používané pro matrici: [2]

- pryskyřice, polymery:
  - reaktoplasty (PET - polyestery, EP - epoxidy, PIM - polyimidy, bismaleimidy)
  - termoplasty (PP - polypropylény, PA - polyamidy, PEEK - polyéter éterketony, PC - polykarbonáty)
  - kaučuky (kordy)
- silikáty (sklo, cement, keramika)
- kovy (zejména hliník a jeho slitiny)

Materiály používané pro výztuž: [2]

- přírodní (bavlna, sisal, juta, celulóza)
- anorganická (skelná, uhlíková, kovová, bórová, SiC)

- organická (aramidy - Kevlar, polyimidy)

Podle prostorového uspořádání vyztužujících vláken můžeme klasifikovat kompozitní materiály takto: [2]

- jednosměrné (vlákna jsou orientována v jednom směru):
  - krátkovláknové (poměr délky vlákna k jeho průměru je menší než 100)
  - dlouhovláknové (poměr vlákna k jeho průměru je větší než 100 nebo je délka stejná jako délka dílce)
  - \* prepregy (nevytvrzenou pryskyřicí proimpregnované vrstvy vláken ve tvaru tenkých pásů různé šířky)
  - \* tažené profily (tyčovina)
- mnohosměrné (vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientována dvěma či více směry):
  - krátkovláknové
  - dlouhovláknové
  - \* lamináty (střídání vrstev jednosměrných kompozitů se stejnými nebo různými vzájemnými orientacemi výztuže)
  - \* lamináty s tkanou výztuží (vlákna jsou před prosycením pryskyřicí utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi)
  - \* lamináty s netkanou výztuží (vlákna jsou zpracována do roun, aniž by byla tkána)
- tažené profily (komplikovanější tvary s kombinací vyztužujících vláken)

**Tabulka 1: Porovnání vlastností vybraných kovových materiálů a vláknově vyztužených plastů [2]**

Materiál	Objemový podíl vláken $V_f$	Hustota $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]	Mez pevnosti v tahu Rm [GPa]	Měrný modul (E/ $\rho$ )	Měrná pevnost (Rm/ $\rho$ )
Měkká ocel		7,8	210	0,45-0,83	26,9	0,058-0,106
Hliník 2024-T4		2,7	73	0,41	27	0,15
E-sklo / epoxid	57	1,97	21,5	0,57	10,9	0,29
Kevlar 59 / epoxid	60	1,4	40	0,65	28,6	0,46
Uhlík / epoxid	58	1,54	83	0,38	53,9	0,25
Bór / epoxid	60	2	106	0,38	53	0,19

Kompozitní materiály jsou specifické především pro svojí malou hmotnost a vysokou pevnost. Porovnání vlastností vybraných kovových materiálů s vlákny, která vyztužují kompozitní materiál, je vidět v tabulce 1. Protože je potřeba přistupovat ke každé skupině kompozitních materiálů odděleně, vzhledem k jejich velmi rozdílným vlastnostem, je práce zaměřena pouze na obrábění vláknově vyztužených polymerů (FRP) s dlouhými uhlíkovými nebo skelnými vlákny.

## 2.2 Obecná problematika obrábění

Obrábění kompozitních materiálů je velice odlišné od běžného obrábění kovů a jejich slitin díky jejich rozdílným fyzikálním vlastnostem a vzhledem k jejich nehomogenitě a silné anizotropii. Během obrábění kompozitních materiálů je nástroj velmi silně opotřebováván, zejména abrazivně. To způsobují mechanické vlastnosti výztuže. Z tohoto důvodu je doporučeno používat nástroje z tvrdých a ošetrudorných materiálů, jako je například slinutý karbid, cermety, řezná keramika a především polykrystalický diamant, případně polykrystalický nitrid bóru. Díky různé orientaci vláken je materiál silně anizotropní. Problematický je také odvod tepla z místa řezu. Je to zapříčiněno především vlastnostmi matrice. Ta velmi špatně vede vzniklé teplo a usazuje se na nástroji. Porovnání odvádění tepla při obrábění kompozitních materiálů a oceli je vidět v tabulce 3. [2]

**Tabulka 2: Odvod tepla při obrábění kompozitních materiálů ve srovnání s ocelí [%] [2]**

Odvod tepla	Ocel	Termoplast	Reaktoplast	FRP
Třískou	75	50÷57	2÷3	5÷10
Obrobkem	20÷22	15÷25	5÷8	5÷15
Nástrojem	3÷5	20÷25	80÷90	70÷80
Prostředím	(3÷5)% Při suchém prostředí			
FRP- kompozity vyztužené uhlíkovými nebo skelnými vlákny				

Při obrábění kompozitních materiálů nevznikají běžné plynulé třísky, ale břit odlamuje materiál, vzniká prach a jemné měkké částičky. Tento prach a částičky musí být odsáty z místa řezu. Proto musí být obráběcí stroj vybaven odsávacím zařízením. Problémem při obrábění je také to, že nelze většinou použít chladicí kapalinu. Především chlazení olejovými emulzemi je nepřijatelné, z důvodu nasákavosti. Někdy je možné použít vodu nebo ve vodě rozpustné chladicí kapaliny. [4]

### 2.2.1 Mechanismus vzniku třísky

Základní principy tvorby třísky se zkoumají při ortogonálním řezání. Zkoumá se tvar a velikost třísky, smykové napětí, deformace třísky, třecí podmínky, řezné síly a teplota v místě řezu. Mechanismy tvoření třísky při obrábění kovů byly již dopodrobna prozkoumány. Obrábění kovů je natolik prozkoumáno, že je možnost většinu věcí předvídat. Obrábění kompozitních materiálů je ale velmi odlišné, především díky nehomogenitě materiálu. Proto se zkušenosti s obráběním kovů dají aplikovat velmi omezeně. [5]

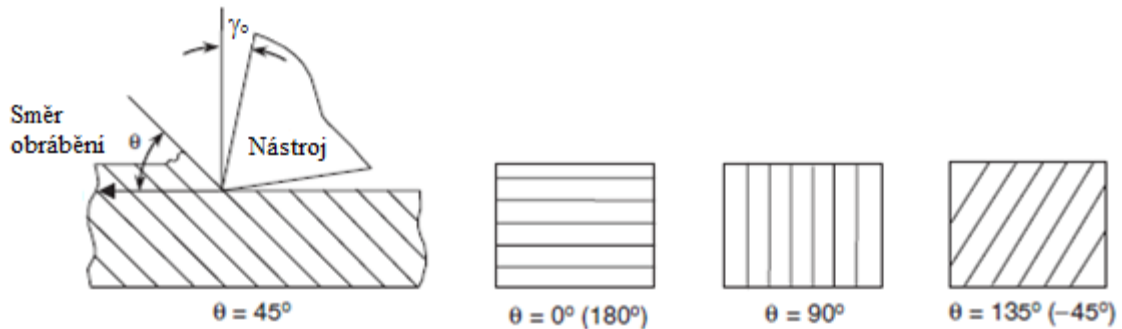
#### 2.2.1.1 Ortogonální řezání polymerů

Pro lepší představu o obrábění se zaměřím nejprve pouze na obrábění polymerů, ze kterých je vytvořena matrice. Přesto, že polymery kladou velmi malý řezný odpor, způsobují několik problémů s obráběním. Hlavní problém je zapříčiněn velmi malou tepelnou vodivostí. Proto je z místa řezu špatně odváděno teplo. Polymerní matrice může být reaktoplastická nebo termoplastická. Vlastnosti těchto dvou typů matrice je velmi odlišné. Reaktoplast se vyznačuje křehkým chováním s malým napětím lomu. Naproti tomu termoplast vykazuje

plastické chování. Vzhledem k viskóznímu chování je velikost deformace, při které dojde k porušení soudržnosti, velmi závislá na rychlosti působení zatížení. [5]

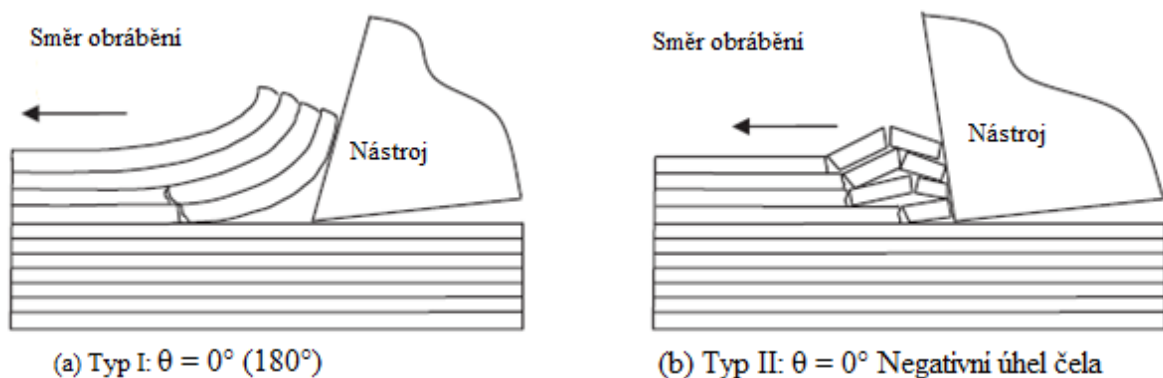
### 2.2.1.2 Ortogonální řezání jednosměrných vláknových kompozitů

Důležitý faktor při obrábění jednosměrných kompozitů je úhel orientace vláken, který je dán směrem vláken vzhledem ke směru řezu. Ustálený způsob určování tohoto úhlu je vidět na obrázku 2. Úhel se měří ve směru hodinových ručiček od směru řezu. Dalším faktorem ovlivňujícím tvorbu třísky je úhel čela. [5]



Obrázek 2: Úhel natočení vláken [5]

V závislosti na úhlu čela a na úhlu orientace vláken dochází k oddělování materiálů různým způsobem. Na obrázku 3(a) je zobrazen způsob oddělování materiálu, při kterém dochází k delaminaci vláken, tento způsob je označen jako Typ I. K oddělování třísky tímto způsobem dojde při obrábění materiálu s nulovým úhlem orientace vláken břitem s kladným úhlem čela. Pokud budeme tento materiál obrábět břitem se záporným úhlem čela, dojde k porušení materiálu vzpěrem. Tento způsob je označen jako Typ II a je ukázán na obr. 3(b). [5]

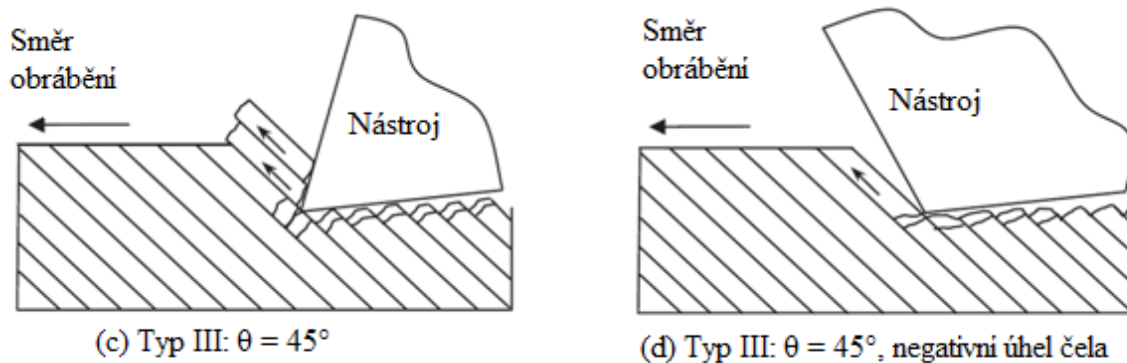


Obrázek 3: Způsob oddělování materiálu: Typ I a II [5]

Ke stříhu vláken dojde při obrábění materiálu s úhlem orientace větším než  $0^\circ$  a menším než  $90^\circ$  pro kladný i záporný úhel čela. Lom skrz vlákna je doprovázen interlaminím lomem. K deformaci dochází i pod rovinou řezu. Poškození povrchu pod rovinou řezu bylo potvrzeno na mikroskopu. K odebírání materiálu může docházet kontinuálně - Typ III nebo nekontinuálně - Typ IV. V závislosti na množství interlaminární deformace dochází k posouvání jednotlivých vrstev po sobě a po čelu nástroje. Odebíraný materiál může držet pohromadě a díky tomu vzniká do jisté míry plynulá nebo článkovitá tříška. Míra toho, jak dlouho se bude tříška

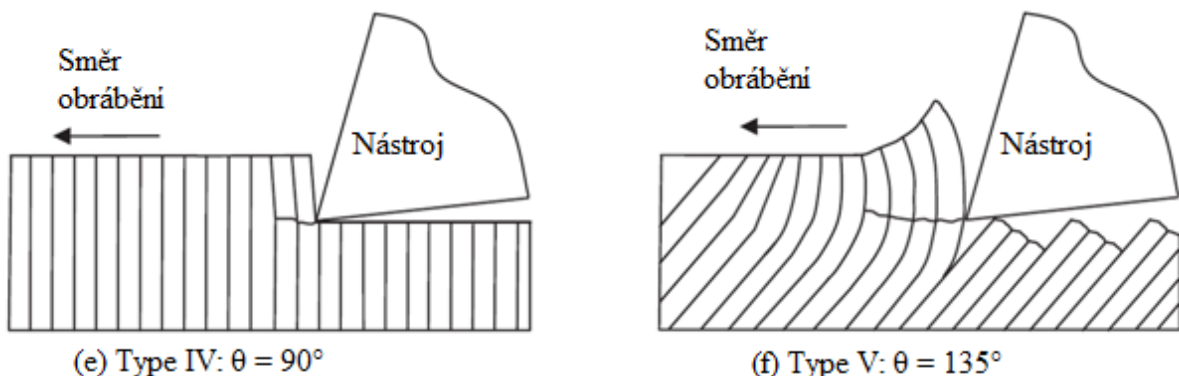


plynule tvarovat před jejím odlomením, závisí na velikosti úhlu orientace vláken. Se zvětšujícím se úhlem orientace vláken se snižuje. S rostoucím úhlem orientace vláken roste napětí mezi vrstvami, což může vést k poškození vláknomatrixového systému jak je vidět na obrázku 6(c). Vzhled obrobeného povrchu s typem deformace III a IV se výrazně liší od Typu I a II. Povrch je nepravidelný a konce vláken vyčnívají z povrchu. To je způsobeno tím, že k přetržení vláken dochází v různých místech - nad i pod rovinou řezu. [5]



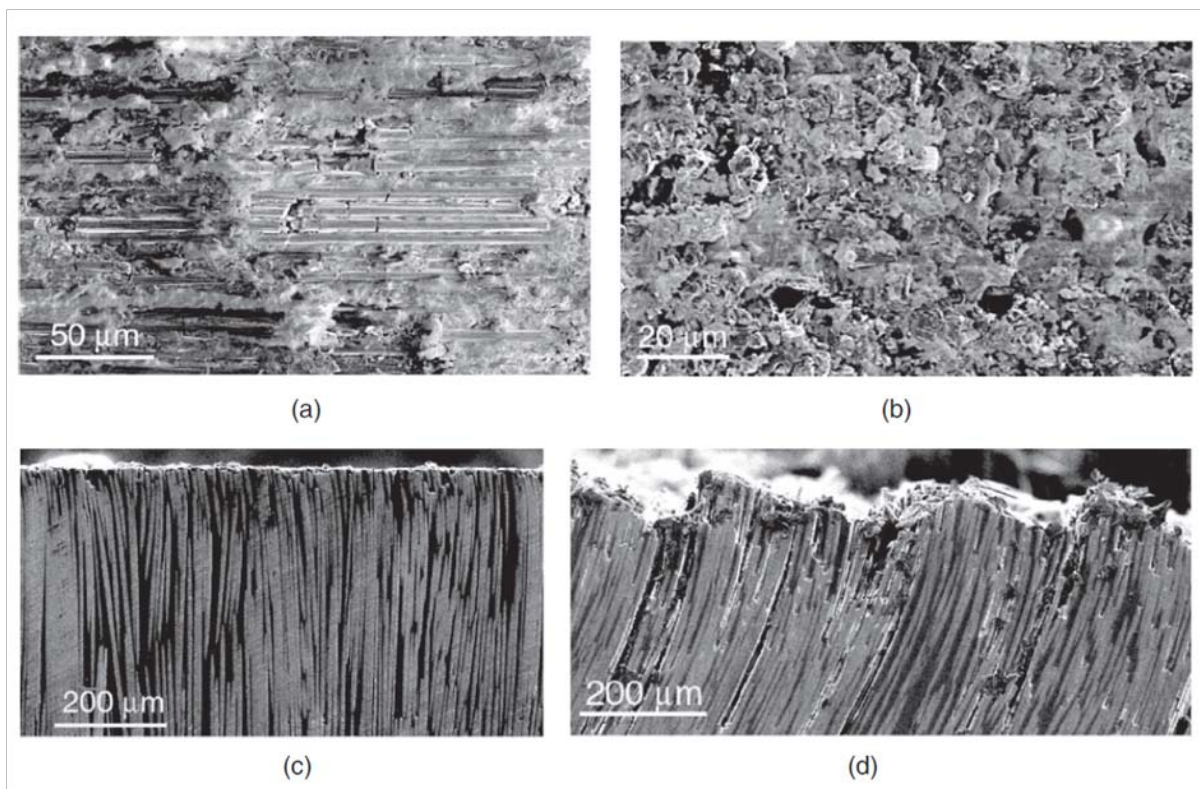
Obrázek 4: Způsob oddělování materiálu: Typ III [5]

Při obrábění větších úhlů než  $90^\circ$  ( $105-150^\circ$ ) nástroj způsobí deformaci vláken vedoucí k delaminaci a interlaminární deformaci. Namáhaná vrstva je od sousední "odehnuta". Dojde k výraznému poškození vlákno-matrixového systému pod rovinou řezu. Vytváří se větší elementární třísky. Tento způsob vzniku je označen jako Typ V. Tloušťka třísky je často větší než hloubka řezu, a proto může dojít k lomu pod rovinou řezu. Jakmile dojde k odlomení třísky, odehnutá předeprnutá vrstva se vrátí do původní pozice. Při návratu do původní pozice je výrazně odírán hřbet nástroje. [5]



Obrázek 5: Způsob oddělování materiálu: Typ IV a V [5]

Na obrázku 6 jsou vidět mikroskopické snímky struktury materiálu pro jednotlivé typy odebrání materiálu. Snímky se liší úhlem orientace vláken. Pro mikroskopický snímek (a) je  $\theta = 0^\circ$ , pro (b)  $\theta = 90^\circ$ , pro (c)  $\theta = 90^\circ$  a nakonec pro (d)  $\theta = 120^\circ$ . Tento kompozitní materiál je vyztužen uhlíkovými vlákny. Plocha byla obrobená nástrojem s úhlem čela  $\alpha = 20^\circ$  a hloubka řezu byla 0,1 mm. [5]



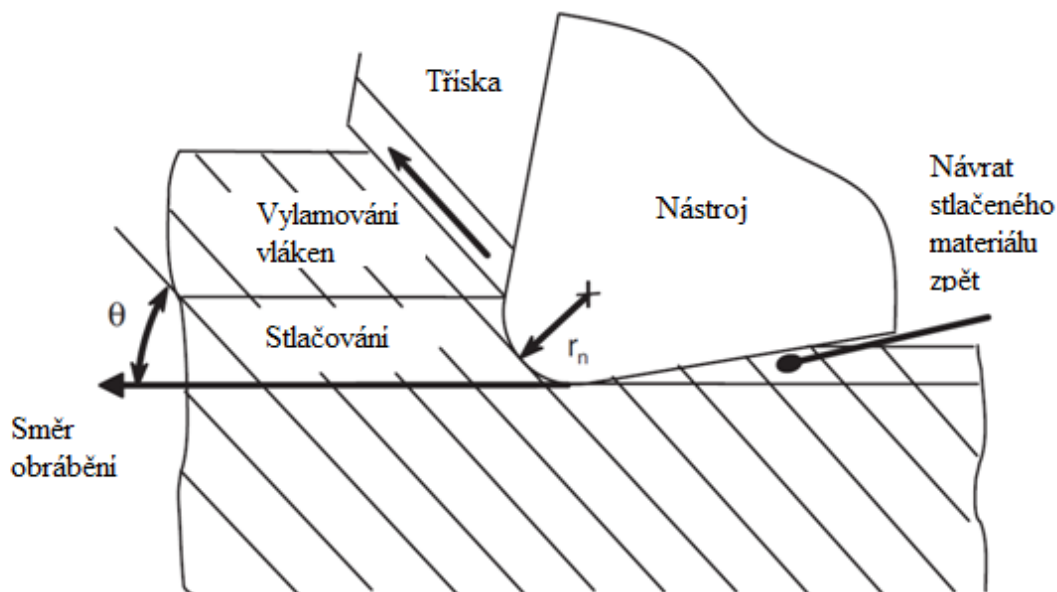
Obrázek 6: Mikrostruktura obrobeného povrchu CFRP [5]

Tvorba třísky je tedy nejvíce ovlivněna úhlem orientace vláken a to mnohem více než úhlem čela. Na obrázku 7 je vidět účinek úhlu čela na způsob tvoření třísek pro různé orientace vláken. [5]

Úhel čela $\gamma_0$ [°]	30	I	III	III	III	III	III	IV			
	20	I	III	III	III	III	III	IV			V
	10	I	III	III	III	III	IV	IV	V	V	V
	0	II	III	III	III	IV	IV	V	V	V	V
	-10	II	IV	III	IV	IV	IV				
	-20				IV			V			V
		0	15	30	45	60	75	90	105	120	135
	Úhel orientace vlákna $\theta$ [°]										

Obrázek 7: Jednotlivé typy odebrání materiálu pro různé úhly čela [5]

Pro větší kladný úhel čela bude vznik třísek plynulejší. Při obrábění materiálu s orientací vláken  $90^\circ$  nástrojem s větším kladným úhlem čela dojde k odebrání materiálu stříhem a nedojde k výraznému lámání a ohýbání. Vlákno-maticový systém pod rovinou řezu bude méně narušen. Se zvyšujícím se úhlem čela roste celková kvalita obrobeného povrchu. Úhel hřbetu nemá vliv na tvoření třísky. Má ale vliv na výsledný povrch. Pokud je použit velký úhel hřbetu, pak stlačená vlákna "odskakují". Při malém úhlu čela dojde k zahlazení povrchu a "obroušení" vyčnívajících konců vláken. Vznikají vyšší normálové síly. Bude ale docházet k většímu opotřebení nástroje. Na obrázku 8 je vidět schéma procesu tvoření třísky. [5]



Obrázek 8: Tvoření třísky [5]

### 2.3 Soustružení

Soustružení spolu s vrtáním, frézováním a řezáním patří mezi nejvýznamnější technologie pro obrábění FRP. Soustružení se liší od frézování a řezání hlavně téměř konstantními záběrovými podmínkami. Tyto podmínky nejsou plně konstantní, protože matrice a vyztužující vlákna kladou různý odpor. Při obrábění FRP dochází ke kvazi-kontinuálnímu stříhu. [6]

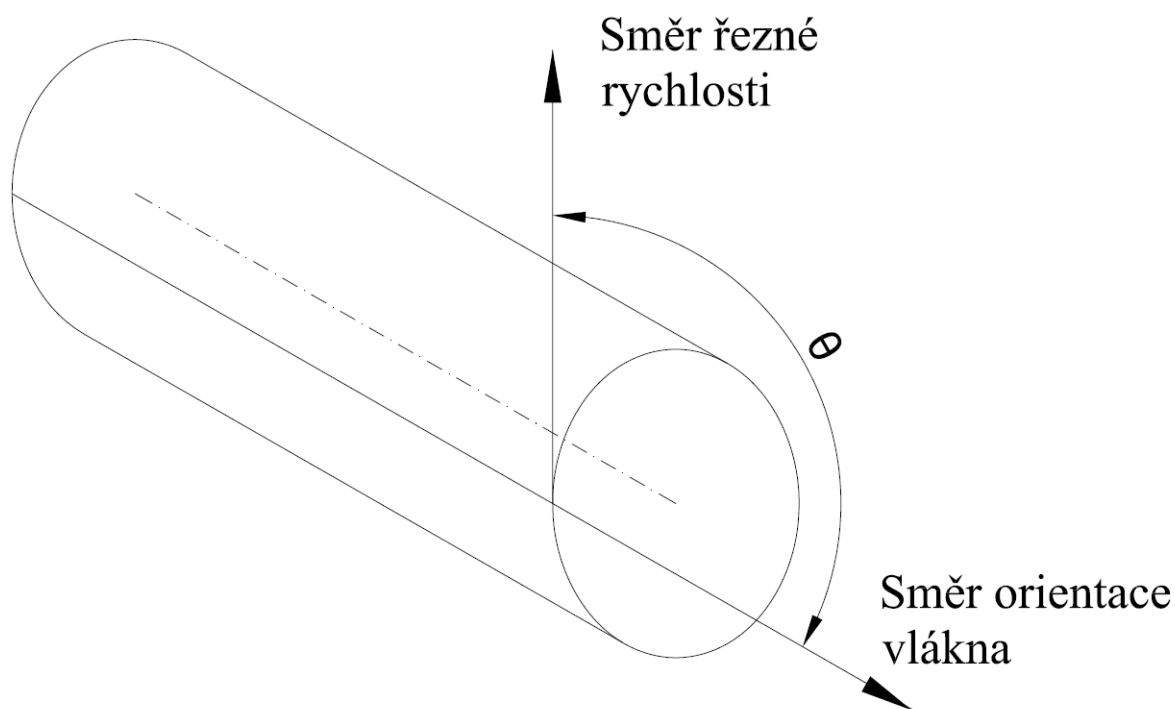
Obrobitelnost FRP je určena fyzikálními vlastnostmi vláken a matrice, orientací vláken a poměrným zastoupením jednotlivých fází. Při obrábění skelných a uhlíkových vláken dochází ke křehkému lomu při ohybu na rozdíl od aramidových vláken. Jejich lom je houževnatý. Obrobitelnost je také rozdílná podle délky vláken výztuže. Výztuž s krátkými vlákny klade mnohem menší odpor oproti té s dlouhými vlákny. Při výběru rezného nástroje je potřeba věnovat pozornost možným mechanismům opotřebení. Pro FRP je hlavním mechanismem opotřebení abraze. Opotřebení nástrojů souvisí především s fyzikálními a mechanickými vlastnostmi kompozitních materiálů. Při obrábění skelných a uhlíkových vláken se nástroj opotřebovává především kvůli silně abrazivnímu chování. Oproti tomu při obrábění aramidových vláken je opotřebení dáno především nízkou tepelnou vodivostí a tvárným chováním. [6]

K adhezivnímu opotřebení dochází, když se nanáší a usazuje na povrch nástrojů karbonizovaná nebo roztavená matrice. Mechanismy opotřebení jsou primárně závislé na fyzikálních a mechanických vlastnostech vlákno-matricových systémů. Rychlost opotřebení je výrazně závislá na obsahu vláken. Opotřebení čela je pouze menšího rozsahu oproti opotřebení hřbetu. Trhliny na hřbetu jsou hlavním výsledkem opotřebovávání. Jak bylo uvedeno dříve, je to způsobeno návratem předepnutého materiálu do původní pozice. Při

malém úhlu hřbetu bude docházet k velkému opotřebení, ale obrobený povrch bude mít lepší kvalitu. Je tedy třeba určit optimální úhel, který zajistí potřebnou kvalitu povrchu a zároveň nebude způsobovat přílišné opotřebení nástroje. Další omezující parametr je pevnost břítu. Velký úhel hřbetu a čela zeslabí břit. Pro hrubování lze tedy doporučit spíše větší úhel hřbetu a pro dokončení zvolit nástroj spíše s menším úhlem hřbetu. [6]

### 2.3.1 Úhel natočení vláken při soustružení

Úhel orientace vláken  $\theta$  má velký vliv na druh třísky, řezné síly a výsledný povrch. Je definován jako úhel mezi směrem řezné rychlosti a směrem orientace vlákna ve směru hodinových ručiček, jak je vidět na obrázku 9. Při soustružení má vektor řezné rychlosti stále stejný směr. Úhel natočení vláken tedy záleží pouze na tom, jak jsou vlákna uspořádána na konkrétním obrobku. Obvyklé je navíjet vlákna ve dvou směrech. Absolutní hodnota úhlu se nemění, střídá se kladné a záporné znaménko úhlu orientace vláken pro jednotlivé vrstvy. [5]



Obrázek 9: Úhel natočení vláken při soustružení

### 2.3.2 Řezné materiály

Při obrábění kompozitních materiálů jsou na nástroj kladeny zvýšené nároky. Nástroj by měl mít především vysokou tvrdost, aby odolal abrazivnímu opotřebení. Musí být zároveň i pevný. V tabulce 3 jsou popsány některé vlastnosti řezných materiálů. [5]

**Tabulka 3: Vlastnosti řezných nástrojů [5]**

Materiál	Ohybová pevnost [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Tvrdost HV30	Tvrdost Knoop [MPa]	Tepelná vodivost [W/m.°C]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	550	3000	1600	16	10,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	800	4500	2200	17	16,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	700	-	2230	-	10,5
SiAlON	800	3500	1870	17	20-25
SK (WC-Co, 6% Co)	1900	5380	1600	14	80
CBN	700-1200	3500	-	27-31	110-200
PCD	860-1950	7700	-	39-54	543
CVD	1300	9000	-	85-100	500-2200
Diamant	1350	6900	-	59-88	600-2100

### Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli nejsou prakticky vůbec používány, protože nemají dostatečnou tvrdost. Ta se při vysokých teplotách ještě více sníží metalurgickými změnami v materiálu. Proto nejsou při obrábění vlákniny vyztužených kompozitů používány. [5]

### Slinuté karbidy wolframu

Nástroje ze slinutého karbidu se skládají z tvrdých zrn, zejména karbidu wolframu spojených k sobě kovovým pojivem, kterým je nejčastěji kobalt. Vlastnosti výsledného materiálu závisí na podílu pojiva a tvrdé fáze. Dále také na velikosti zrn, která se pohybuje od 0,4 do 10 μm. Tato široká škála kombinací mikrostruktury poskytuje různé vlastnosti pro široký rozsah použití. Příklady chemického složení a vlastností karbidů wolframu jsou uvedeny v tabulce 4. Jedná se o slinuté karbidy s kobaltovým pojivem. Rozdílná je velikost zrna a obsah pojiva. Obecně platí, že se zvyšováním velikosti zrna se zvyšuje tvrdost a snižuje ohybová pevnost. Výjimku tvoří zrna menší než 1 μm, pro které tato závislost neplatí. Materiál se zrnitostí 0,7 μm má velmi vysokou tvrdost a zároveň největší ohybovou pevnost. Díky tomu je v porovnání s ostatními slinutými karbidy nejvhodnější pro obrábění kompozitních materiálů. [6]

Tabulka 4: Vlastnosti slinutých karbidů pro různé velikosti zrna [5]

Značení ISO	Značení USA	Složení (%)		Zrnitost ( $\mu\text{m}$ )	Tvrдость HRA	Pevnost v ohybu (MPa)	Pevnost v tlaku (MPa)
		WC	Co				
K30	C1	90.5	9.5	1.7	90.4	2,600	5,200
K20	C2	94.0	6.0	1.7	92.1	2,200	6,200
K10	C3	96.0	4.0	1.3	92.9	2,300	–
K10	C3/C4	96.5	3.5	1.2	93.0	1,900	6,900
–	–	97.0	3.0	1.2	94.0	2,100	–
–	–	97.0	3.0	0.7	93.9	3,300	7,800
–	–	95.0	5.0	0.8	94.0	2,300	–
–	–	97.0	3.0	0.8	94.1	2,000	8,500
–	–	97.5	2.5	0.4	95.4	1,800	12,500

Klasifikace ISO rozděluje slinuté karbidy do třech skupin - P, M, K dle jejich použití. Každá skupina je dále rozdělena do podskupin, např.: K01, K10, K20 atd. Ve Spojených státech amerických je používána především C klasifikace. Ta rozděluje karbidy do skupin C1 až C8. Skupina P (C5-C8) je pro obrábění materiálů s plynulou třískou, jako jsou například uhlíkové oceli. Řezné síly jsou značně veliké, nejvíce se objevuje kráterové opotřebení čela. Skupina M (C5-C8) je používána pro obrábění materiálů s dlouhou nebo střední třískou, jako je tvárná litina nebo austenitické korozivzdorné oceli. Řezné síly jsou velké až střední. Mezi nejčastější opotřebení patří vylamování ostří. Skupina K (C1-C4) je pro obrábění neželezných kovů a nekovových materiálů, jako jsou polymery a kompozity z nich vytvořené. Obecně platí, že řezné síly jsou zde nízké a nejčastější forma opotřebení je abraze. Vzhledem k nehomogenní povaze kompozitních materiálů vykazují řezné síly značné kolísání, které způsobí, že řezný nástroj je opotřeben odštípáváním. Řezný nástroj musí být navíc ostrý, aby vytvořil kvalitní povrch. Proto jsou pro obrábění kompozitů nejvhodnější slinuté karbidy s velikostí zrna pod 1  $\mu\text{m}$ . [5]

### Povlakované slinuté karbidy

Pro zlepšení vlastností jsou slinuté karbidy povlakovány vrstvou o tloušťce několika mikrometrů. Díky tomu se zlepší odolnost proti opotřebení. Povlaky se mohou vytvořit metodou chemické depozice z plynné fáze (CVD) nebo modernější metodou fyzikální depozice z plynné fáze (PVD). Je možné vytvořit jednu nebo více vrstev povlaku například z TiC, TiN, TiCN a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Metodou CVD se nanáší povlak při vysokých teplotách (900-1050°C) oproti metodě PVD (400-450°C). Díky menší teplotě není tolik ovlivněna struktura zrn povlakovaného slinutého karbidu. Metodou PVD je také vytvořena jemnější a houževnatější struktura. Další výhodou PVD je, že po nanesení zůstane v povlaku pnutí v tlaku oproti nevýhodnějšímu pnutí v tahu u CVD. Proto mají PVD povlaky vyšší pevnost TRS a vyšší odolnost proti vylamování než CVD. Nicméně přilnavost a odolnost proti opotřebení je lepší u CVD. Vzhledem k těmto protikladným vlastnostem jsou CVD povlaky obecně používanější při soustružení, zatímco PVD se používají tam, kde jsou velké řezné síly a je vyžadována odolnost proti vylamování. [6]

Tabulka 5: Vlastnosti některých řezných materiálů [5]

Materiál	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Bod tavení (°C)	Tvrдость (HV)	Součinitel tření	Součinitel tepelné roztlačnosti	Součinitel tepelné vodivosti (W/m <sup>°K</sup> )
TiC	4.94	3,150	3,000	0.4	7.7	29
TiN	5.44	2,950	2,100	0.2	9.4	19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.98	2,300	2,300	0.3	8.0	30
Slinutý karbid	11–15	1,298	1,300–1,800	0.3–0.4	5–6	30–80

Vlastnosti některých povlaků jsou uvedeny v tabulce 5. Na posledním řádku jsou pro porovnání uvedeny vlastnosti slinutých karbidů. Keramické povlaky mají vyšší tvrdost a jsou tepelně stabilnější než karbidy wolframu. Proto působí jako tepelná bariéra při obrábění vysokými řeznými rychlostmi. Povlaky je také výhodné použít vzhledem k tomu, že se díky nim zlepšuje odolnost proti opotřebení a tím životnost nástroje. Nejčastější formy opotřebení jsou vylamování a delaminace povlakové vrstvy. [5]

### Keramika

Řezné keramické nástroje jsou obvykle založeny na slinutém korundu (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Ten je slinut při vysokých teplotách a tlacích. Keramické řezné nástroje mají nejvyšší tepelnou stabilitu mezi nástrojovými materiály a vykazují vynikající výkonnost při vysokorychlostním obrábění, kde jsou řezné teploty velmi vysoké. Nevýhodou je velmi malá tuhost a jsou náchylné k vylamování při vyšších řezných silách nebo při přerušovaném zatěžování. Keramické řezné nástroje jsou často vyráběny s negativní geometrií právě kvůli zvýšení pevnosti břitu. Keramické nástroje jsou také známé špatnou odolností vůči tepelnému šoku, díky jejich špatné tepelné vodivosti, což je další nevýhoda. Zlepšení pevnosti je dosaženo přidáním keramických materiálů, jako jsou TiC a ZrO<sub>2</sub>. To má za následek zlepšení životnosti. Nicméně použití při obrábění kompozitních materiálů není příliš vhodné. Pro kvalitní povrch je dobrý pozitivní úhel čela, ale tím se u keramických nástrojů příliš sníží pevnost břitu. Dále mají nízkou odolnost proti opotřebovávání vylamováním. Při soustružení je možné jejich omezené využití, protože záběrové podmínky jsou téměř konstantní. [5]

### Polykrystalický diamant

Diamant je nejtvrdější známý materiál. Má vysokou odolnost proti otěru. Poskytuje dobrou tepelnou vodivost a nízký koeficient tření. Aplikace monokrystalického krystalu diamantu jsou omezeny z důvodu náchylnosti k lomu a vysoké ceny. Proto je monokrystalický diamant používán jen na ultrapřesné obrábění například optických povrchů. [5]

Polykrystalický diamant (PCD) je vyroben lisováním PCD a malého množství kovového pojiva, jako je například kobalt, při vysokých teplotách a tlacích. Tyto polotovary jsou poté řezány pomocí laseru nebo obrábění elektrickým výbojem na požadovaný tvar. Po zhotovení požadovaného tvaru jsou připájeny na podklad ze slinutého karbidu. Tloušťka PCD destičky tvořící ostří je menší než 1 mm. Výhodou PCD oproti monokrystalickým diamantům je vyšší

odolnost proti rázům a větší velikost nástroje. Oproti ostatním nástrojům jsou ovšem stále velmi drahé. Stojí běžně desetkrát více než běžné slinuté karbidy nebo keramické nástroje. Technologie slinování je drahá a řezání a broušení ostří je velmi obtížné. Proto jsou výrobní náklady tak vysoké. Pokud jsou ovšem použity za správných řezných podmínek, můžou být ekonomicky výhodné vzhledem k jejich životnosti a výkonnosti. Výkonnost je velmi závislá na velikosti zrn diamantu. Nástroje jsou vyráběny se zrn s velikostí od 2 do 30  $\mu\text{m}$ . Lomová houževnatost a tvrdost se zvyšuje nárůstem velikosti zrna. Jemná zrna (2 až 5  $\mu\text{m}$ ) poskytují dobrou odolnost proti otěru a velmi ostrou hranu ostří. Lze s nimi dosáhnout lepší kvality opracovávaného povrchu. Nástroj s jemnými zrnky se používá pro středně abrazivní materiály jako je hliník a plasty. Střední třída (okolo 10  $\mu\text{m}$ ) je univerzální variantou, která kombinuje výhody jemného a hrubého zrna. Používá se pro více abrazivní materiály, jako jsou například lamináty, keramika, hliník, skelná vlákna, guma, měď a uhlík. Nástroj s hrubými zrnky (25-30  $\mu\text{m}$ ) má vysokou rázovou houževnatost a snese větší zatížení. Vyznačuje se také delší životností. Používá se na vysoce abrazivní materiály (kompozity s podílem skelných vláken, hliníkové slitiny s podílem křemíku), přerušované řezy a hrubé obrábění. Nejlepší variantou pro soustružení kompozitních materiálů tedy bude nástroj s hrubou zrnitostí, protože se jedná o vysoce abrazivní materiál. Základní doporučení pro řeznou rychlost je 200-1000 m/min s provedením řezné hrany F, jak je vidět na obrázku 14. Obecně není nutné použít chlazení. Nesmí ale dojít k překročení teploty 600°C, protože při teplotách okolo 650°C dochází k přeměně diamantu na grafit. [5] [7] [8]



Obrázek 10: Provedení řezné hrany [7]

### Polykrystalický kubický nitrid boru

Polykrystalický kubický nitrid boru se vyrábí slinováním kubických krystalů bóru s keramickým či kovovým pojivem. Tvrdší řezný materiál než tento je pouze diamant. Tento materiál má velmi malou houževnatost, proto jsou nástroje z tohoto materiálu vyráběny s negativním úhlem čela. Díky tomu se zhorší kvalita obrobeného povrchu. Tyto nástroje nejsou vhodné pro obrábění nehomogenních materiálů a pro přerušované řezy. [5]

### Diamantem povlakované karbidy

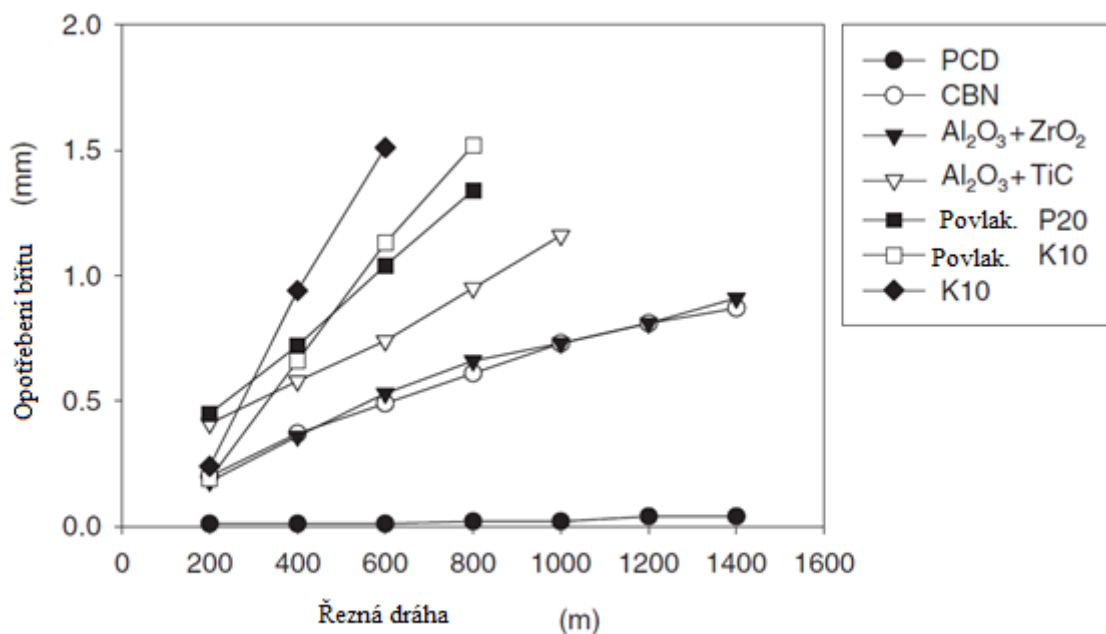
Povlaky jsou vytvořeny metodou CVD nebo PVD. Na nástroji je vytvořen film pouze PCD, to v podstatě znamená, že má lepší tvrdost a houževnatost než slinutý nástroj z PCD. Výhodou povlaků oproti slinutým PCD destičkám je nižší cena a možnost vytvořit tvarově složité nástroje. Největším problémem je špatná přilnavost povlaku na podklad. Tento problém se ještě zhoršuje u nástrojů při požadavku na ostrou hranu a malého úhlu břitu, který je



doporučen pro obrábění kompozitních materiálů. Při povlakování velmi ostrého břitu za vysokých teplot se snižuje jeho tuhost a zvyšuje se zbytkové tlakové pnutí v povlaku. Pro lepší přilnavost lze udělat řadu zlepšení. Například mechanické zdrsnění povrchu, chemické leptání kobaltového pojiva pro zlepšení nukleace diamantu, leptání karbidu wolframu pro zvýšení drsnosti a depozice přechodných vrstev. Tato vylepšení vedla ke značnému zlepšení životnosti diamantem povlakovaných karbidů. Přesto při obrábění dochází k delaminaci diamantové vrstvy, ovšem v omezené míře. Zároveň dochází k rovnoměrnému opotřebovávání vrstvy. [5]

### Porovnání řezných materiálů

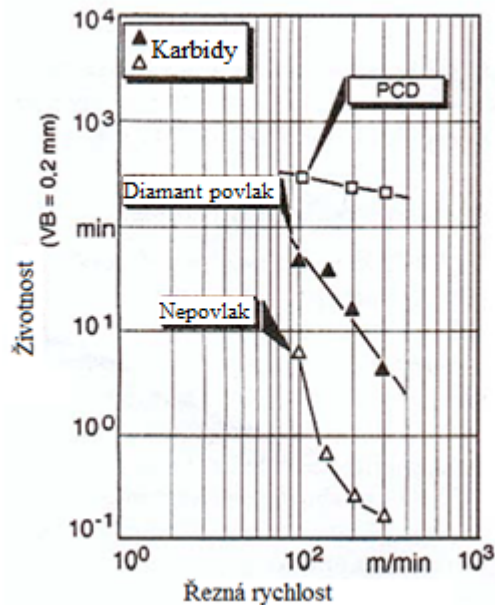
Na obrázku 11 jsou porovnány jednotlivé materiály a jejich opotřebení při soustružení kompozitního materiálu s polymerní matricí a uhlíkovými vlákny. Pokud u PCD nástroje nedojde k vylamování nebo k jejich prasknutí, má oproti ostatním daleko větší odolnost proti opotřebení. Po něm je materiálem s nejmenším opotřebováním CBN a keramický nástroj  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ . Slinuté karbidy povlakované i nepovlakované vykazují o hodně horší výsledky. [5]



Obrázek 11: Opotřebení řezných materiálů [5]

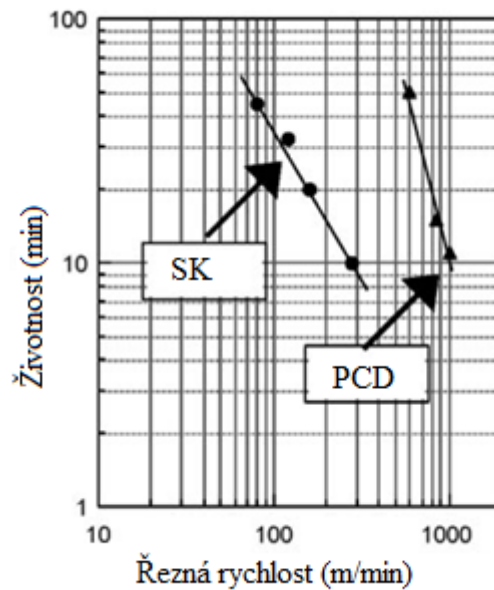
Nejčastější opotřebení je abraze a mikrotrhliny. Tvoření mikrotrhlin je zaviněno nehomogenitou materiálu, která způsobuje kolísání síly na špičce břitu. Obrobky z vláknových kompozitů jsou většinou vyráběny s minimálním přídavkem na obrábění. Proto obvykle není potřeba hrubovat. Díky tomu nevznikají tak velké řezné síly při obrábění. Při malé hloubce řezu je tedy většinou zamezeno vylamování a tvoření mikrotrhlin. Abrasivní opotřebení je zapříčiněno působením vláken. Aby se omezilo abrasivní opotřebovávání, je vhodné použít co nejtvrdší materiál. To jsou nástroje PCD a diamantem povlakované slinuté karbidy. Vývoj technologie povlakování slinutých karbidů povrchovou vrstvou, umožnil zvýšit přilnavost povrchové vrstvy k podkladu, a snížilo se tepelné ovlivnění podkladu. Ke zlepšení také dochází tříděním zrn karbidů tak, aby se snížil rozdíl v tepelné roztažnosti.

Rozdílná tepelná roztažnost povrchové vrstvy a podkladu způsobuje po zahřátí vznik výrazného napětí v nástroji. Výrazného zlepšení je dosahováno také nanášením nanopovlaků. S postupným vývojem se povlakované karbidy stávají stále více ekonomicky výhodnější náhradou PCD nástrojů. Porovnání životnosti PCD, povlakovaných a nepovlakovaných slinutých karbidů je vidět na obrázku 12. Výhodnější použití povlakovaných SK oproti PCD může být zejména při menších řezných rychlostech, kdy rozdíl v životnosti není tak veliký. [5]



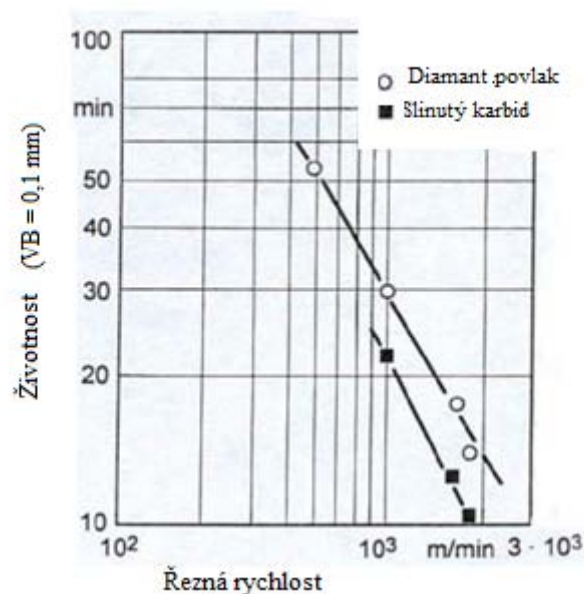
Obrázek 12: Závislost životnosti na řezné rychlosti [6]

Výhodnost použití PCD nástrojů s ohledem na životnost je vidět i z obrázku 13. Na něm je vidět srovnání karbidových a PCD nástrojů při soustružení CFRP s reaktoplastickou maticí. Při obrábění PCD nástroji mohou být použity opět vyšší řezné rychlosti. Při testech byla vzata v úvahu různá kritéria pro srovnání těchto dvou nástrojových materiálů. Při obrábění s karbidovým nástrojem bylo použito jako kritérium životnosti průměrné opotřebení hřbetu 0,2 mm, zatímco pro PCD nástroje byla vzata hodnota opotřebení pouze 0,1mm. Při použití stejné hodnoty opotřebení pro určení životnosti, byl celkový objem odebraný slinutým karbidem překonán PCD nástrojem 250 krát. [5]



Obrázek 13: Závislost životnosti na řezné rychlosti [6]

Na obrázku 14 je zobrazeno porovnání mezi SK bez povlaku a SK s polykrystalickou diamantovou povrchovou vrstvou při soustružení kompozitních materiálů CFRP s termoplastickou matricí. Opořebením během soustružení CFRP s nástrojem povlakovaným diamantem je charakteristické křehkým porušováním povlakové vrstvy. Řezná hrana se zaobljuje. Vznikají ostré přechody mezi povlakovou a karbidovou vrstvou. Materiál nástroje podléhá abrazivnímu působení uhlíkových vláken. Nezávisle na řezných parametrech na nástroji zůstávají usazeniny z termoplastické matrice. Tyto usazeniny se tvoří na čele a na hřbetu nástroje, ale jsou pravidelně odstraňovány v průběhu soustružení. [5]



Obrázek 14: Závislost životnosti povlakovaného a nepovlakovaného slinutého karbidu [6]

Životnost nástroje kromě materiálů ovlivňují také řezné podmínky. Největší vliv má řezná rychlost a posuv. Zvýšení tepelného namáhání na břitu je spojeno s nárůstem řezné rychlosti. Vzhledem k vysoké tepelné vodivosti vrstvy diamantu je možné vyšší tepelné zatížení, a proto je umožněno používat vyšší řezné rychlosti u slinutých karbidů s povrchovou vrstvou z polykrystalického diamantu oproti nepovlakovanému slinutému karbidu. [5]

Dalším velice tvrdým materiálem je CBN. Ten je také oproti keramickým nástrojům daleko více tepelně vodivý, ovšem ne tolik jako PCD, jak je vidět v tabulce 3. Jak už bylo ale napsáno dříve, špatně snáší rázy způsobené nehomogenitou materiálu, a proto se většinou musí použít negativní geometrie ostří, která nevytvoří tak kvalitní povrch. [5]

Nejvhodnějším materiálem je tedy slinutý diamant PCD, který je možné pro méně náročné aplikace nahradit levnějším slinutým karbidem s diamantovou povrchovou vrstvou.

### 2.3.3 Porovnání obráběných materiálů

Opotřebení nástroje při obrábění CFRP se výrazně liší od opotřebení nástrojů při obrábění GFRP. Při porovnání obrábění CFRP vznikají menší teploty oproti GFRP díky lepší vodivosti vláken. Proto může být využita vyšší řezná rychlost při soustružení CFRP. [5]

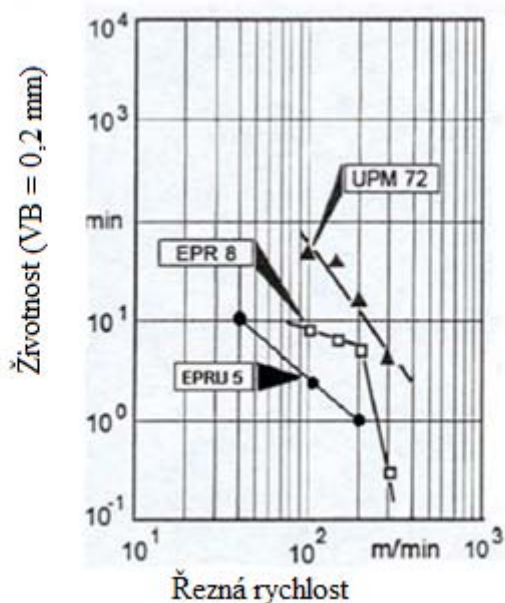
Tabulka 6: Fyzikální a lomové charakteristiky vláken [3]

Charakteristika	Jednotka	Skelné	Uhlíkové	Aramidové
Hustota	g/cm <sup>3</sup>	2,5	1,75	1,45
Tepelná vodivost	W/mK	0,8	15 až 100	0,13
Charakter lomu		Křehký	křehký	houževnatý

Nezáleží jen na druhu vláken, ale i na objemovém podílu výztuže. Na obrázku 15 je vidět porovnání závislosti životnosti na řezné rychlosti pro GFRP s různým objemovým podílem výztuže ( $V_f$ ). [6]

Testované materiály:

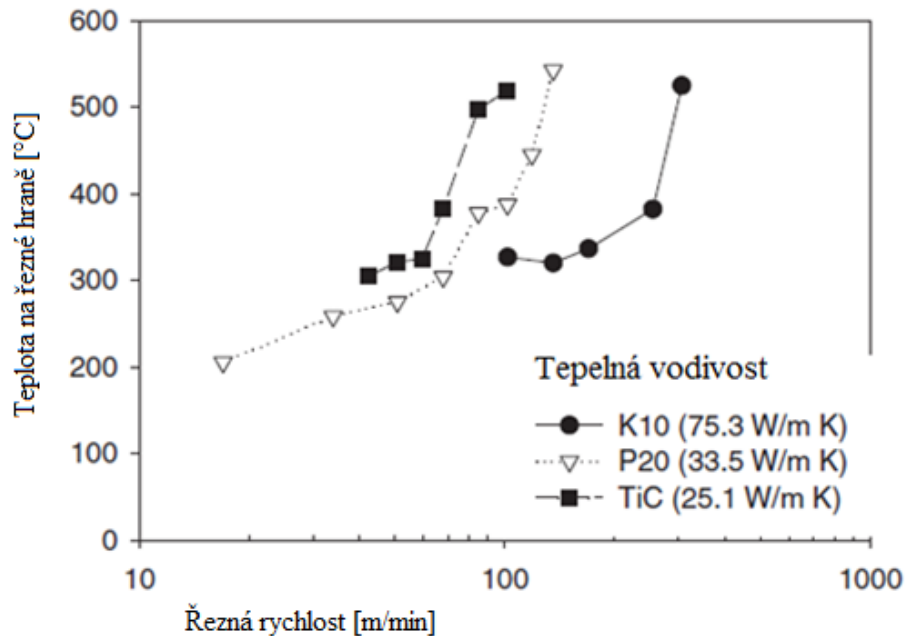
Označení	Objemový podíl v %
EPRU 5	55
EPR 8	45
UPM 72	35



Obrázek 15: Životnost SK s povrchovou vrstvou z PCD v závislosti na řezné rychlosti při soustružení různých GFRP [6]

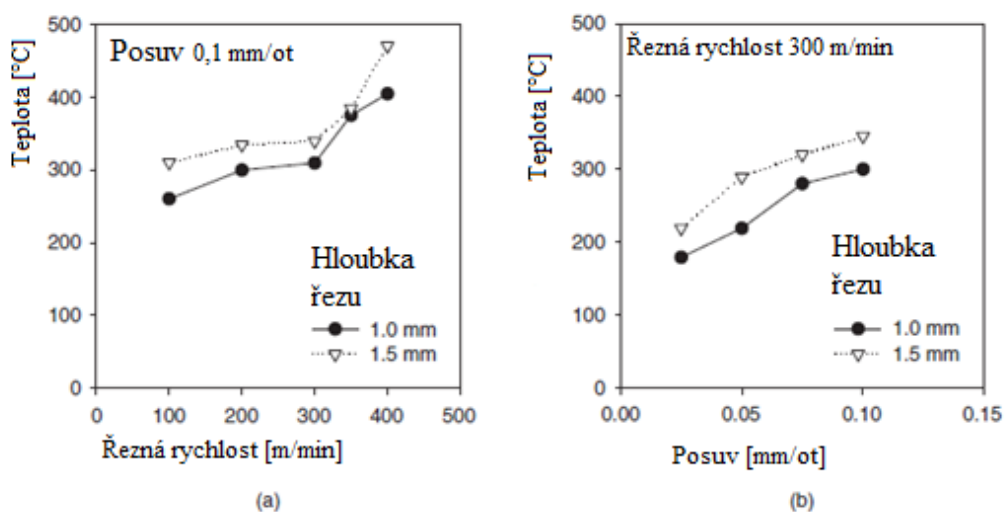
### 2.3.4 Teploty při soustružení

Teplo se při obrábění odvádí nástrojem, třískou a obrobkem. Při zanedbání energie spotřebované na deformaci a lom materiálu je všechna energie přeměněna na tepelnou a rovná se součinu řezné rychlosti a řezné síly. Ke tření dochází na čele i na hřbetě nástroje. Teplo se zvyšuje s řeznou rychlostí, jak je zobrazeno na obrázku 16 a 17. [5]



Obrázek 16: Teplota na řezné hraně [5]

Řezné teploty jsou ovlivněny rovněž hloubkou řezu, rychlostí posuvu a materiálem nástroje a obrobku. Na obrázku 17 je vidět, že řezná teplota je přímo úměrná hloubce řezu a posuvu. Výraznější je ale vliv řezné rychlosti. [5]



Obrázek 17: Vliv řezných parametrů na teplotu [5]

Podíl tepla absorbovaného třískou se zvyšuje společně s mírou rychlosti odstraňování materiálu. Tu je výhodnější zvýšit spíše posuvem než řeznou rychlostí, protože tak se méně zvýší vznik tepla a více tepla se odvede třískou. [5]

Část tepla odvedená obrobkem je závislá na materiálu obrobku, nástroje i řezných podmínkách. Uhlíková vlákna dokáží přenést větší množství tepla, jak bylo zmíněno výše. Díky tomu se více tepla odvede obrobkem než je tomu u GFRP. V případě nízké míry rychlosti odstraňování materiálu je teplo odváděné třískou stejné jako odváděné nástrojem. S narůstající mírou rychlosti odstraňování materiálu se zvyšuje podíl tepla odvedeného třískou. [5]

Teploty při obrábění mohou být tak vysoké, že mohou způsobit tání nebo rozklad polymerní matrice. Vysoká teplota způsobuje i vyšší opotřebení nástrojů. Teplota nástrojů je nižší při použití řezného nástroje s vyšší tepelnou vodivostí. Porovnání je vidět na obrázku 16. [5]

Pro různé nástroje byla nalezena přechodná rychlost, při které se stává nárůst teploty společně s řeznou rychlostí mnohem větší. Přechodná řezná rychlost je větší pro řezné materiály s lepší tepelnou vodivostí. To vysvětluje výbornou výkonnost PCD nástrojů. Obrobitelnost FRP je výrazně lepší při obrábění menší než přechodovou rychlostí. Tato přechodová rychlost je vyšší při obrábění CFRP než pro GFRP. Vyšší je také při použití materiálu s lepší tepelnou vodivostí, porovnání je vidět v tabulce. [5]

**Tabulka 7: Přechodová rychlost pro některé nástroje a materiály [5]**

Materiál obrobku	Materiál nástroje	Přechodová rychlost m/min
CFRP	TiC	300
GFRP	TiC	60
GFRP	slinutý karbid P20	150

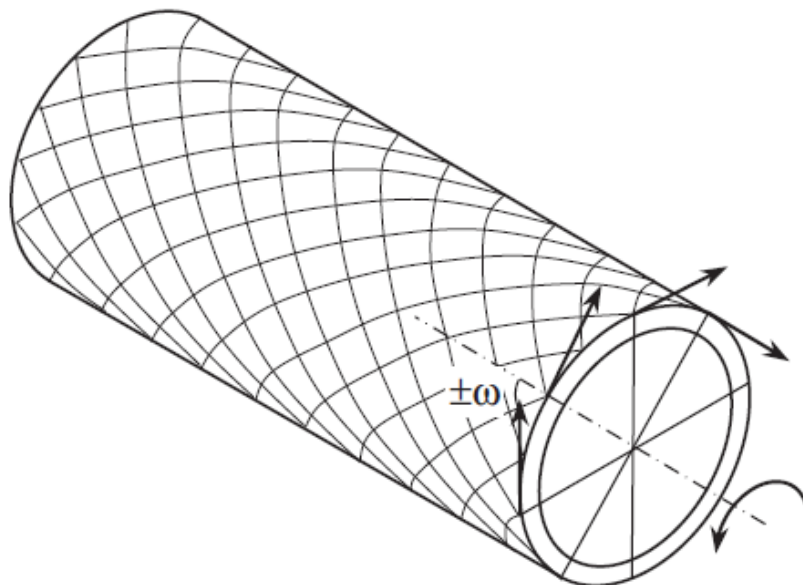
### 2.3.5 Kvalita povrchu

Při obrábění kompozitních materiálů dochází k nežádoucím fyzikálním a chemickým jevům, které negativně ovlivňují kvalitu povrchu. Jedná se například o vytažení vláken ven z matrice, poškození vlákno-matricového systému, delaminace, tavení a dekompozice matrice. Tyto jevy závisí na řezných podmínkách, na orientaci vláken, materiálu vláken a matrice, geometrii nástroje i na tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek. [5]

K popsání kvality povrchu slouží parametry povrchové drsnosti  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_p$ ,  $R_z$  atd. Ty však nevypovídají o kvalitě povrchu úplně přesně. Zvláště u kompozitních materiálů je také potřeba vizuální a jiná kontrola, protože může být zničena vlákno-matricová struktura, mohou být vytažena vlákna nebo mohlo dojít k delaminaci. Parametr drsnosti je tedy základní ukazatel kvality povrchu, který je vhodný doplnit další kontrolou povrchu. Bylo zjištěno, že  $R_a$  a  $R_q$  jsou nejméně citlivé na zhoršenou kvalitu povrchu. Nejvhodnější jsou parametry  $R_z$  a  $R_{10Z}$  pro kontrolu plochy po obrábění nehomogenních materiálů jako jsou FRP. [5]

#### 2.3.5.1 Vliv orientace vláken na kvalitu povrchu

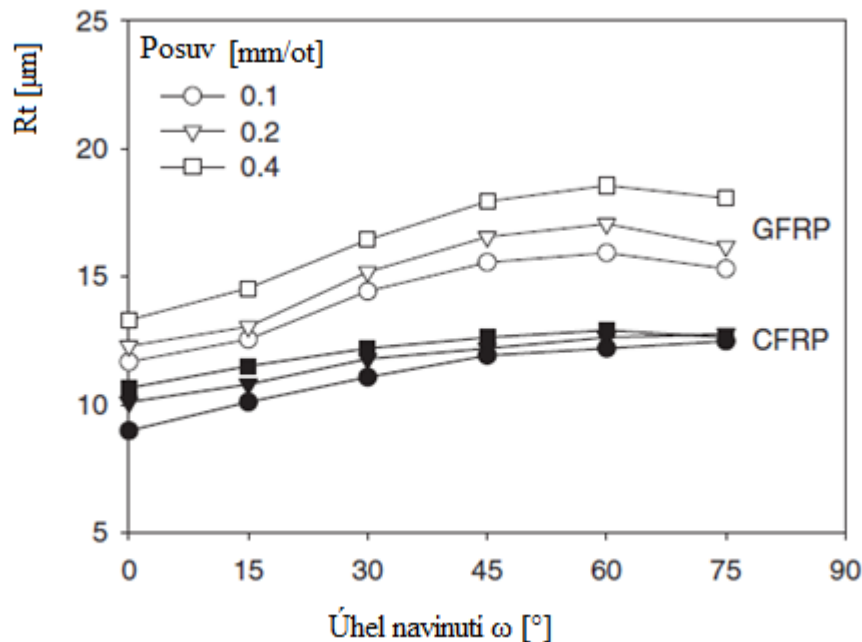
Rotační vláknové kompozitní materiály jsou nejčastěji vyráběny navíjením vlákna prosyceného pryskyřicí na trn, ze kterého jsou následně sejmuty. Poté dojde k obrábění. Mohou být navíjeny pod různým úhlem. Úhel navíjení vlákna  $\omega$  můžeme vidět na obrázku 18. V každé vrstvě je nejčastěji absolutní velikost úhlu stejná, pouze dochází ke střídání znaménka, které se pravidelně mění, tak jak je vlákno navíjeno z levého konce na pravý a opačně. Tento úhel můžeme změřit jako úhel mezi orientací vlákna a směrem osy obrobku. Hodnotu úhlu orientace vláken  $\theta$  dostaneme podle následující rovnice:  $\theta = 90^\circ - \omega$ . [5]



Obrázek 18: Úhel navinutí



Závislost parametru drsnosti na úhlu navíjení vlákna pro CFRP i GFRP je vidět na obrázku 19. Nejlepší drsnost je dosažena pro oba materiály při úhlu navíjení  $\omega = 0^\circ$ , to znamená při úhlu orientace  $\theta = 90^\circ$ . Nejhorší drsnost je pro CFRP při  $\omega = 75^\circ$  a pro GFRP při  $\omega = 60^\circ$ . Drsnost povrchu je obecně lepší u CFRP než u GFRP. Je to z důvodu menší tepelné vodivosti uhlíkových vláken. Uhlíková vlákna mají také lepší přilnavost k matici. [5]



Obrázek 19: Závislost drsnosti na úhlu navinutí pro různé hodnoty posuvu [5]

### 2.3.5.2 Vliv řezných parametrů na kvalitu povrchu

Řezné parametry hrají klíčovou roli ve výsledné kvalitě povrchu. Na rozdíl od úhlu orientace vláken, který je většinou určen tak, aby co nejlépe odpovídal požadavkům kladeným na finální výrobek, mohou být řezné parametry určeny pouze tak, aby povrch byl kvalitní a obrábění bylo produktivní bez dalších omezení. V předchozí kapitole byl porovnán vliv orientace vláken na výslednou kvalitu povrchu. Na kvalitu povrchu po obrábění má ale také vliv metoda výroby obrobku. Při použití jiné metody výroby může být hodnota drsnosti odlišná i při použití stejných řezných podmínek. [10]

V tabulkách 6 a 7 jsou vidět výsledky experimentu, při kterém byl porovnáván vliv řezných parametrů při obrábění kompozitních materiálů GFRP vyrobených dvěma různými metodami. Objemový podíl u obou trubek byl 65%. První obrobek byl vyroben navíjením předimpregnovaného vlákna pod úhlem  $\pm 45^\circ$  metodou "wet filament winding" (FW) - obrobek č. 1. Druhý obrobek byl vyroben metodou "hand lay-up" (HLU) - obrobek č. 2. Orientace vláken tohoto obrobku byla rovnoběžná s podélnou osou. Experimenty byly provedeny na trubkách o průměru 110 mm a 113 mm s tloušťkou stěny 4 a 6 mm. Experiment byl prováděn bez chlazení. Při testování bylo uvažováno 9 kombinací mezi třemi hodnotami řezné rychlosti a třemi hodnotami posuvu. Během experimentů byla použita konstantní hloubka řezu 0,5 mm. Experiment je navržen s použitím Taguchiho ortogonální matice L9 ( $2^4$ ), jak je vidět v tabulce 4. Taguchiho metoda se používá pro experimentování se dvěma

faktory ve třech úrovních. Hodnoty posuvové a řezné rychlosti použité v experimentu jsou zobrazeny v tabulce 8. [10]

**Tabulka 8: Hodnoty řezné rychlosti a posuvu použitých při experimentu [10]**

Stupeň	Řezná rychlost [m/min]	Posuv [mm/ot]
1	100	0,05
2	200	0,10
3	400	0,20

V tabulce 9 jsou uvedeny výsledky experimentu. První sloupec matice je přiřazen řezné rychlosti a druhý posuvové rychlosti. Experimentální plán se skládá z devíti testů. V experimentu byl použit soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou z PCD ( TPUN 16 03 04-D-CD10-PCD) s geometrií: úhel čela 6°, úhel hřbetu 11°, úhel nastavení hlavního ostří 91°, úhel sklonu hlavního ostří 0°. Zjištěné hodnoty drsností při experimentu jsou zaznamenány v tabulkách 9 a 10. Výsledky jsou porovnány pomocí tří dimenzionálních grafů na obrázcích 21 a 22. Třídídimenzionální grafy jsou více přehledné a je lépe vidět závislost všech tří faktorů. Vliv řezné rychlosti a posuvu je různý podle druhu materiálu a podle toho, který typ drsnosti měříme. Zřejmé ale je, že zvyšování řezné rychlosti nemusí nutně znamenat snížení drsnosti. Ovšem zvýšení posuvu téměř vždy způsobí zvýšení drsnosti povrchu. [10]

**Tabulka 9: Hodnoty drsností pro obrobek č. 1 [10]**

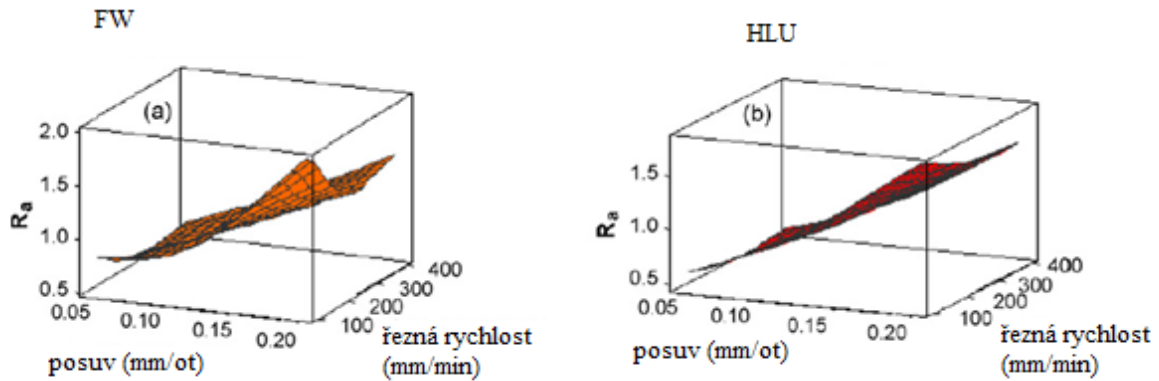
Řezná rychlost [m/min]	Posuv [mm/ot]	Ra[ $\mu$ m]	Rq[ $\mu$ m]	Rp[ $\mu$ m]	Rt[ $\mu$ m]	R <sub>3z</sub> [ $\mu$ m]
100	0,05	0,82	0,97	2,1	3,8	1
100	0,10	0,91	0,83	2,3	4,3	1,2
100	0,20	1,96	2,78	5,45	11,05	4,8
200	0,05	0,65	0,72	2,2	3,1	1
200	0,10	0,9	0,80	2,18	3,7	1,3
200	0,20	1,52	2,05	5,75	9,45	3,95
400	0,05	0,64	0,93	2,65	3,35	1,1
400	0,10	0,89	1,97	2,85	3,6	1,35
400	0,20	1,48	2,95	5,5	8,6	4,45

**Tabulka 10: Hodnoty drsností pro obrobek č. 2 [10]**

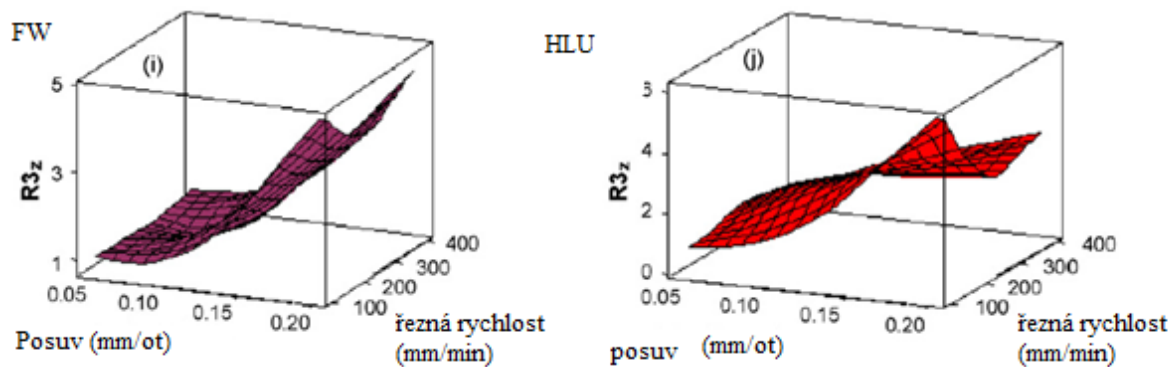
Řezná rychlost [m/min]	Posuv [mm/ot]	Ra[ $\mu$ m]	Rq[ $\mu$ m]	Rp[ $\mu$ m]	Rt[ $\mu$ m]	R <sub>3z</sub> [ $\mu$ m]
100	0,05	0,61	0,70	2,05	3,35	0,85
100	0,10	0,89	1,99	4,7	10,4	1,45
100	0,20	1,79	3,13	7,1	13,5	6
200	0,05	0,53	0,59	1,6	2,85	1,1
200	0,10	0,84	1,48	3,45	6,6	2,4
200	0,20	1,64	2,28	3,9	9,4	3,8
400	0,05	0,54	0,87	2,7	2,45	0,7
400	0,10	0,76	1,11	2,4	6,1	1,75
400	0,20	1,51	2,71	4,1	9,55	3,45

**Zhodnocení měření:**

Graf na obrázku 20 ukazuje, že hodnota parametru drsnosti  $R_a$  se zvyšuje společně se zvyšováním posuvu pro obrobek č. 1 i č. 2. Při sledování závislosti  $R_a$  na řezné rychlosti je vidět, že hodnota prudce klesá a poté mírně stoupá pro obrobek č. 1 a mírně klesá celou dobu pro obrobek č. 2. Chování materiálu vyrobeného metodou "HLU" (hand lay-up) se mírně liší. Zvýšení řezné rychlosti nad 100 m/min má ale velmi omezený vliv pro oba materiály. [10]

Obrázek 20: Porovnání vlivu na drsnost  $R_a$  [10]

Vztah mezi posuvem, řeznou rychlostí a parametrem drsnosti  $R_{3z}$  je zobrazen v grafech na obr. 21(c) a (d). Z grafů můžeme vidět, že nejlepšího povrchu dosahováno pro střední hodnoty řezné rychlosti při vyšší hodnotě posuvu. Pro malé hodnoty posuvu nemá řezná rychlost téměř žádný vliv. [10]

Obrázek 21: Porovnání vlivu na drsnost  $R_{3z}$  [10]

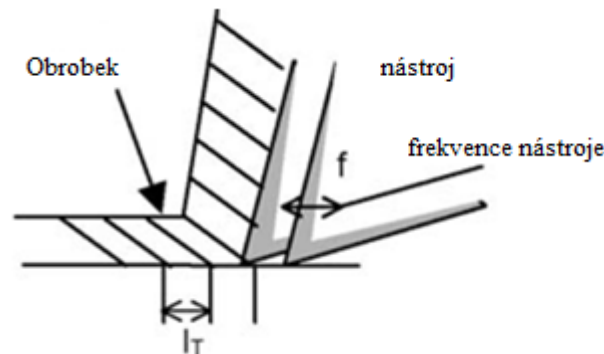
Z porovnání obou hodnot drsnosti  $R_a$  i  $R_{3z}$  vidíme, že největší vliv má na povrchovou drsnost hodnota posuvu. Po analýze těchto údajů můžeme snadno dojít k závěru, že povrchovou drsnost při obrábění GFRP ovlivňuje především posuv. Při vyšší hodnotě kolem 0,2 mm/ot musíme obrábět řeznou rychlostí nad 200 mm/min. [10]

### 2.3.6 Ultrazvukové vibrační soustružení

Vzhledem k obtížnosti obrábění kompozitních materiálů je v některých případech výhodné zvolit metodu ultrazvukového vibračního soustružení. Soustruh je doplněn o vibrační zařízení, které přenáší vibrace na nástroj. S dobrými výsledky bylo použito ultrazvukového vibračního soustružení experimentálně testováno při obrábění CFRP nástrojem ze slinutého karbidu s povrchovou vrstvou z polykrystalického diamantu. [6]

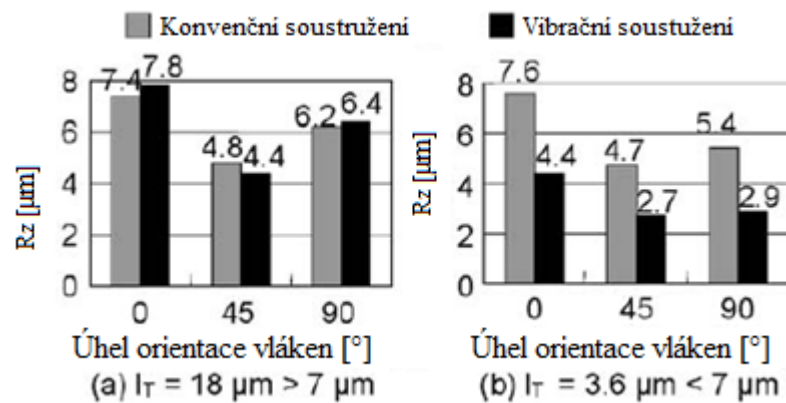
Výkonnost ultrazvukového řezání byla hodnocena z hlediska řezné síly, výskytu a velikosti otřepů a drsnosti povrchu. Ultrazvukové vibrace řezného nástroje při obrábění mají za výsledek lepší kvalitu povrchu. Použití ultrazvukových vibrací pro obrábění těžko-obrobitelných materiálů je umožněno tím, že při obrábění nedochází ke kontinuálnímu kontaktu povrchu čela s třískou. Při vyšších řezných rychlostech není čelo odděleno od třísky a to má za následek ztrátu efektivity použití ultrazvuku. Tato řezná rychlost se nazývá "kritická řezná rychlost" při vibračním obrábění a je určena rovnicí  $v_c = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot f$ , kde  $a$  je amplituda vibrací a  $f$  je jejich frekvence (například v tomto experimentu byla kritická řezná rychlost rovna 110 m/min). [6]

Mechanismus ultrazvukového vibračního řezání je přiblížen na obrázku 23. Výkonnost ultrazvukového vibračního obrábění je silně závislá na tom jakou dráhu urazí obrobek ve směru řezné síly během jedné periody vibrace nástroje -  $I_T = v_c / f$  (v tomto experimentu byla hodnota  $I_T$  rovna  $7\mu\text{m}$ ). Při experimentu bylo zjištěno, že tento rozměr musí být menší než průměr vlákna, aby byly využity výhody ultrazvukového obrábění. Pro rozměr  $I_T$  menší než průměr vlákna je umožněno, že matrice a vlákno, které mají různé mechanické vlastnosti, jsou oddělovány samostatně. Tím je docíleno toho, že vlákna nebrání oddělování plastové matrice. Zvyšuje se kvalita povrchu, a to i v případě, že úhel orientace vláken je roven  $90^\circ$ . [6]



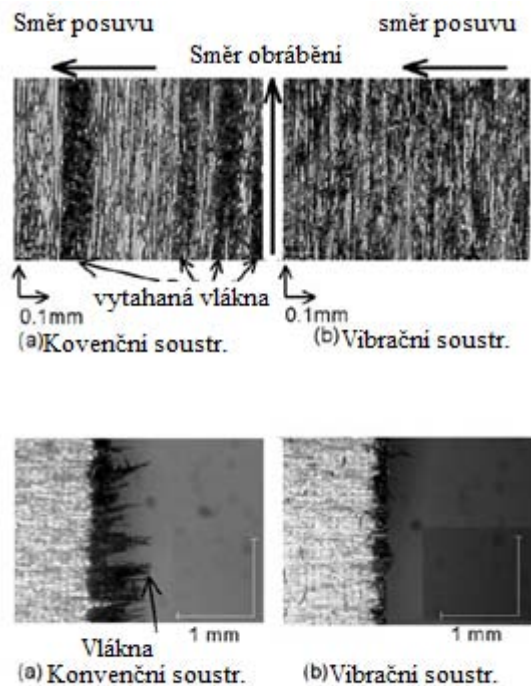
**Obrázek 22: Mechanismus ultrazvukového vibračního řezání -  $v_c$ =řezná rychlost;  $f$ =frekvence vibrací;  $I_T$ =dráha obrobku během jedné periody vibrace řezného nástroje [6]**

Srovnání drsnosti povrchu mezi konvenčním a ultrazvukovým vibračním soustružením je znázorněno na obrázku 9. Když je  $I_T$  větší, než je průměr vlákna, drsnost povrchu po ultrazvukovém vibračním soustružení je podobná jako u konvenčního obrábění. To je vidět z grafu na obrázku 9(a). Mnohem menší drsnost dosáhneme, pokud je  $I_T$  menší než průměr vlákna, jak je vidět z obrázku 9(b). [6]



Obrázek 23: Porovnání vibračního a konvenčního soustružení [6]

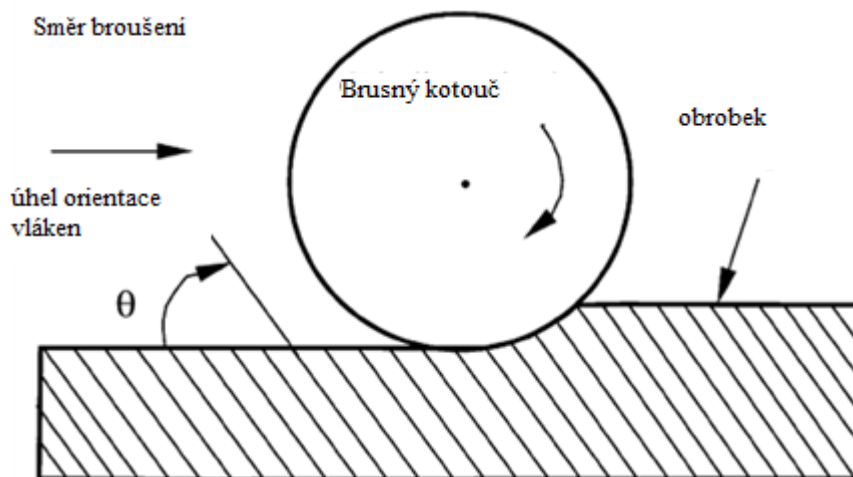
Zlepšení jakosti povrchu bylo potvrzeno mikroskopickými fotografiemi obrázku 24. Šipky na obrázku ukazují směr řezu a posuvu. Pro orientaci vláken  $0^\circ$ , je v konvenčním obrábění mnoho vláken vytaháno ven (obr11a). Při ultrazvukovém obrábění vlákna vytahána nejsou. Při obrábění materiálu s orientací vláken  $90^\circ$ , nejsou vlákna při konvenčním soustružení odříznuta přesně na hraně obráběného povrchu, jak je vidět na obrázku 12(a). Při ultrazvukovém obrábění k tomu nedochází, jak ukazuje obrázek 12(b). [6]



Obrázek 24: Mikroskopické snímky povrchu [6]

## 2.4 Broušení

Dalším způsobem, kterým lze obrábět vnější válcové plochy, je broušení. Při broušení má na výsledek velký vliv úhel orientace vláken. Tento úhel je definován opět jako úhel mezi směrem řezné síly a směrem orientace vláken vlákna, jak je vidět na obrázku 25. [11]

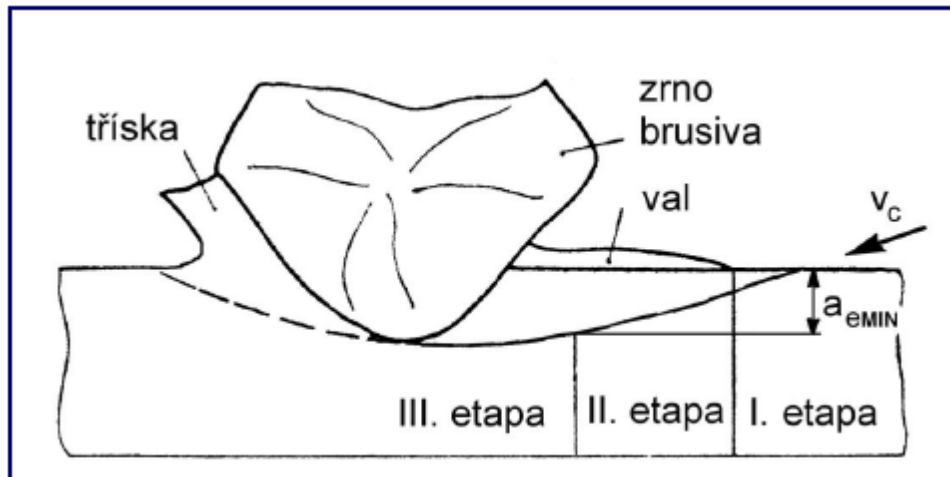


Obrázek 25: Úhel natočení vláken [11]

Pro broušení je typická velmi malá hloubka řezu a vysoká řezná rychlost, která je mnohonásobně větší než rychlost posuvu. Díky tomu vznikají velmi malé třísky, které jsou oddělovány každým brusným zrnem. Úhel záběru při broušení je oproti frézování velmi malý, a proto je úhel natočení vláken téměř konstantní. V důsledku toho se mechanismus tvoření třísky a velikost řezné síly mění pouze jako funkce tloušťky třísky, úhel orientace je dán materiálem a směrem broušení. Při broušení se používají obvykle mnohem větší rychlosti oproti posuvu (typicky 100 až 200 krát větší řezná rychlost oproti posuvu). Vzhledem k tomu vznikají velmi malé třísky, mohou být dokonce menší než průměr vlákna. Vysokými řeznými rychlostmi vznikají při broušení vysoké teploty. Proto je velmi žádoucí použití chladiva. To je ovšem vzhledem k nasákavosti matrice problematické. Řezná rychlost bude tedy významně omezena vznikáním tepla tak, aby nedošlo k tepelnému poškození obrobku. [5]

### Tvorba třísky

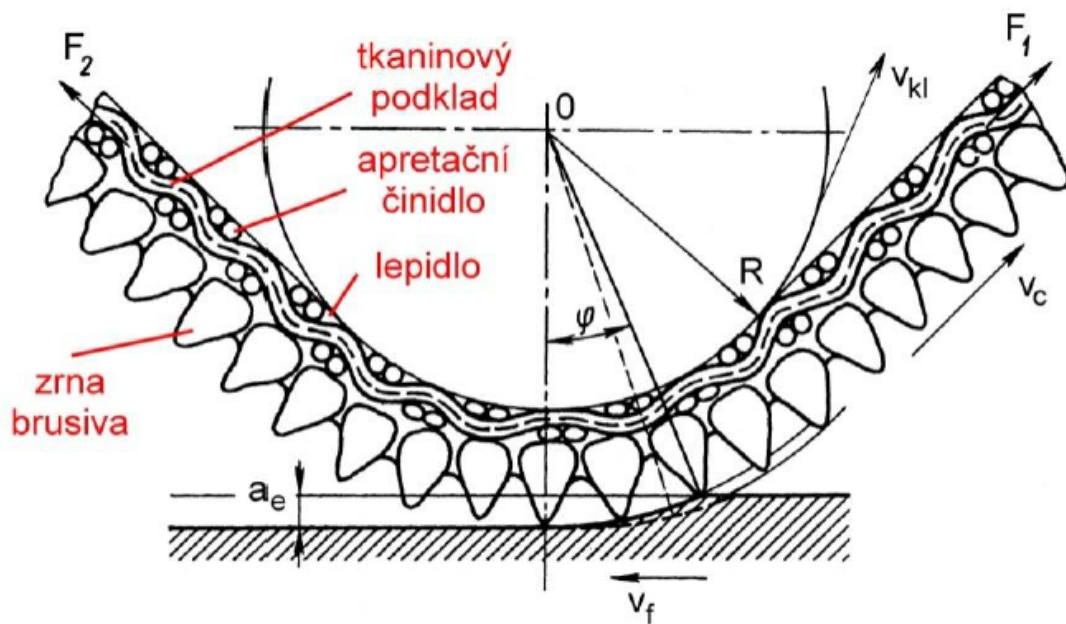
Při broušení zrna brusiva postupně vnikají do materiálu jak je vidět na obrázku 26. V první etapě dojde nejprve k rázu zrna do obráběné plochy, poté zrno klouže po povrchu. Třením vzniká teplo. V druhé etapě dojde k lokálnímu zvýšení teploty, vzniknou plastické deformace. Zrno brusiva vytvoří rýhu a na okrajích vznikne val. K odebrání materiálu dochází až ve třetí etapě. Zde se zrno dostává do hloubky, ve které je překročena hranice pro minimální tloušťku třísky  $a_{emin}$ . [12]



Obrázek 26: Vnikání brusného zrna do materiálu [12]

Při odebrání tenkých třísek nejprve měrný řezný odpor roste spolu s hloubkou řezu a do tzv. mezní tloušťky třísky (např. pro kalenou ocel je tzv. mezní tloušťka třísky 0,01 mm). Se zvyšující se hloubkou řezu nad tuto mez se měrný řezný odpor snižuje, protože se zmenšuje podíl odtlačování a k odebrání materiálu břitem dojde dříve. Zmenšování řezného odporu při zvětšení tloušťky třísky při tloušťce větší než tzv. mezní tloušťka třísky souvisí s vynaložením práce na rozpojení materiálu tuhého tělesa. Při vzrůstající kolmé řezné síle dojde nejprve pod působením brusného zrna k plastické deformaci a teprve poté k odebrání třísky. [12]

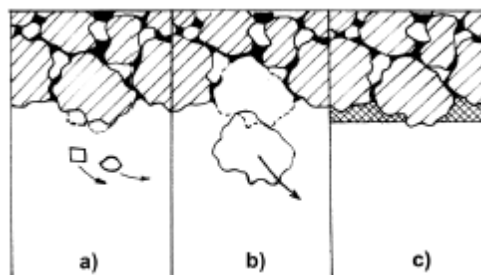
Poměr mezi délkou kluzu a délkou řezu je závislý na geometrii zrna, poměru poloměru zaoblení zrna brusiva a tloušťky odebírané třísky a na opotřebení zrn - jejich otupení a zanesení. Kratší délku dráhy kluzu mají zrna s malým poloměrem zaoblení. Pokud chceme zlepšit obrobitelnost materiálu při broušení, musíme zvýšit ostrost zrn a zlepšit geometrii zrn. Ke zlepšení dojde například vytvořením rovinného tvaru čela ve směru kolmém k vektoru rychlosti. To je dobře možné například při výrobě brousících pásů. [12]



Obrázek 27: Pásové broušení [12]

Dynamické působení síly při oddělování třísek způsobují plastickou deformaci vrstvy pod obrobeným povrchem. To je další důvod vzniku velkého množství tepla. Někdy může dojít dokonce k roztavení oddělovaných třísek. Obrobená vrstva je tedy ovlivněna plastickou deformací a teplem vzniklým při řezání. [12]

Spolu s růstem pevnosti obráběného materiálu a tloušťkou třísky se zvětšuje i potřebná řezná síla a kolmá řezná síla. Kolmá řezná síla je vždy větší než řezná síla v tangenciálním směru. Plastické vlastnosti kovu jsou ovlivněny rychlostí deformace. Pokud dojde při zvyšování rychlosti i k dostatečnému zvýšení teploty, plasticita vzroste. Pokud teplota dostatečně nevzrůstá, plasticita naopak klesá. Protože plastická deformace probíhá pomaleji oproti pružné, která se šíří rychlostí zvuku, při vyšších rychlostech probíhá plastická deformace pouze částečně. [12]



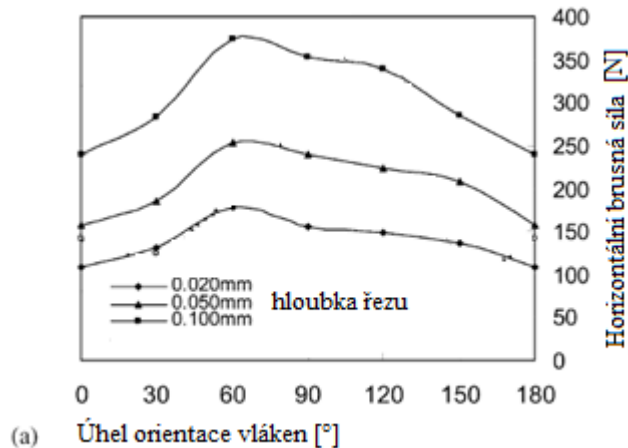
Obrázek 28: Ukázka opotřebení [12]

Opotřebení zrn můžeme vidět na obrázku 28. Může docházet ke křehkému lomu zrn brusiva - obrázek 28(a), k vylamování celých zrn - obrázek 28(b) a zanášení prostorů mezi zrna - obrázek 28(c). Brousící kotouče by měly být navrženy tak, aby se zrna vylamovala a tím docházelo k samoostření. [12]



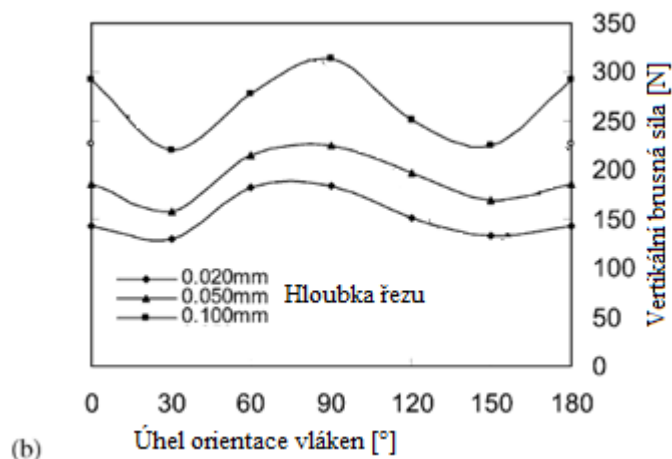
### 2.4.1 Řezné síly

Řezné síly závisejí především na hloubce řezu a na úhlu orientaci vláken. Na obrázku 29 je zobrazena závislost horizontální brusné síly na úhlu orientace vláken pro různé hloubky řezu. Hodnota horizontální brusné síly stoupá společně s úhlem orientace vláken, dokud není dosaženo hodnoty  $60^\circ$ . Zde horizontální síla dosahuje maxima. S dalším nárůstem úhlu orientace vláken mírně klesá až do hodnoty  $180^\circ$ . [11]



Obrázek 29: Závislost horizontální brusné síly na úhlu orientace vláken [11]

Na obrázku 30 je vidět závislost vertikální brusné síly na úhlu orientace vláken opět pro různé hloubky řezu. Vysoké hodnoty této síly je dosahováno pro úhel okolo  $0^\circ$  nebo  $90^\circ$ . Nejmenší vertikální síla se objevuje při úhlu natočení vláken okolo  $30^\circ$  a  $150^\circ$ . Z obou grafů je patrné, že pro větší hloubku řezu, jsou větší i brusné síly. [11]

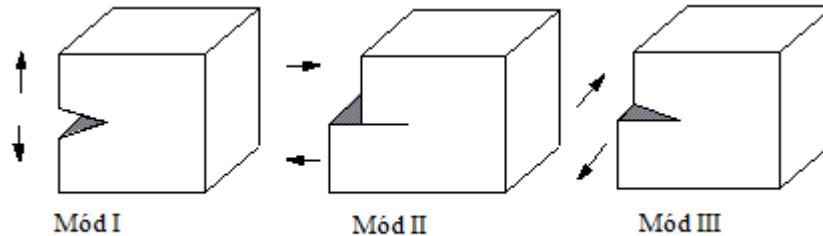


Obrázek 30: Závislost vertikální brusné síly na úhlu orientace vláken [11]

Tyto hodnoty byly zjištěny při obrábění obrobku, kterým byl CFRP laminát. Velikost vzorků používaných při experimentu byla 45 mm x 15 mm x 4 mm (délka x šířka x tloušťka). Tyto vzorky byly odebrány tak, aby se dosáhlo požadované orientace vláken u vzorku. Materiál pro brusný kotouč byl použit oxid hlinitý ( $Al_2O_3$ ). [11]

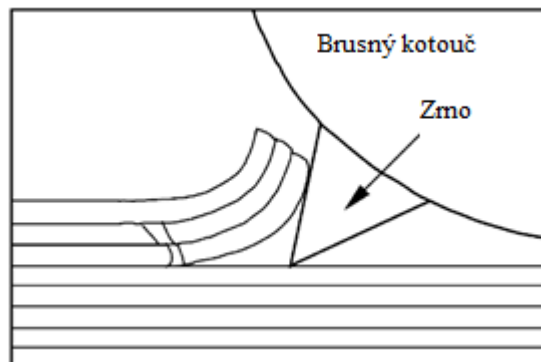
Změna velikosti řezné síly pro různý úhel natočení je způsobena různým způsobem namáhání vláken. Jde o to, jakým způsobem jsou zatěžovány obě plochy trhliny. Zatěžování může být charakterizováno třemi základními módy, jak je zobrazeno na obrázku 31: [11]

- Mód I - rozevírání, tah
- Mód II - stříh
- Mód III - příčný smyk



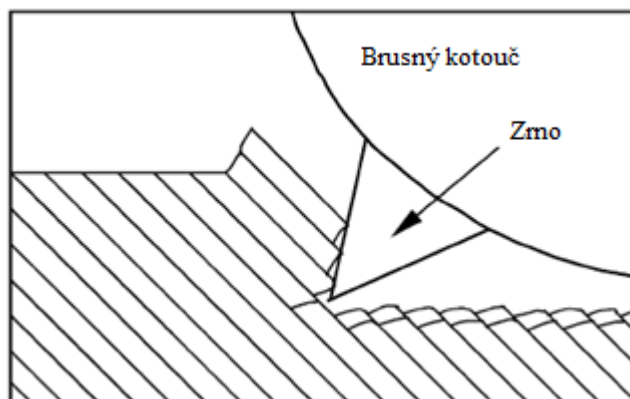
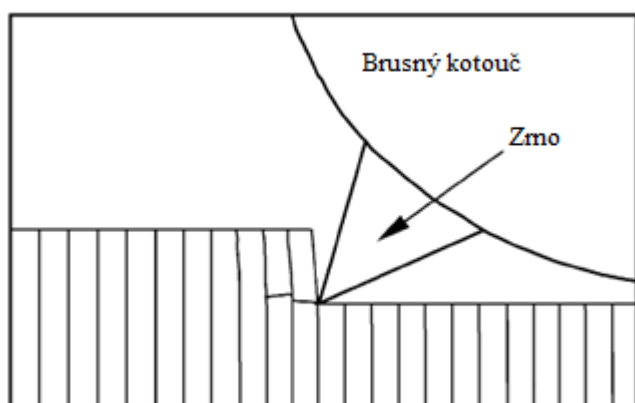
Obrázek 31: Módy zatěžování [13]

Při obrábění kompozitu s úhlem natočení vláken  $\theta = 0^\circ$  je materiál odebírán především napětím, které odpovídá módu II a I na rozhraní vláken, jak je vidět na obrázku 32. Vzhledem k tomu, že síla potřebná k oddělení vlákna od matrice je nižší, bude nižší i brusná síla. [11]

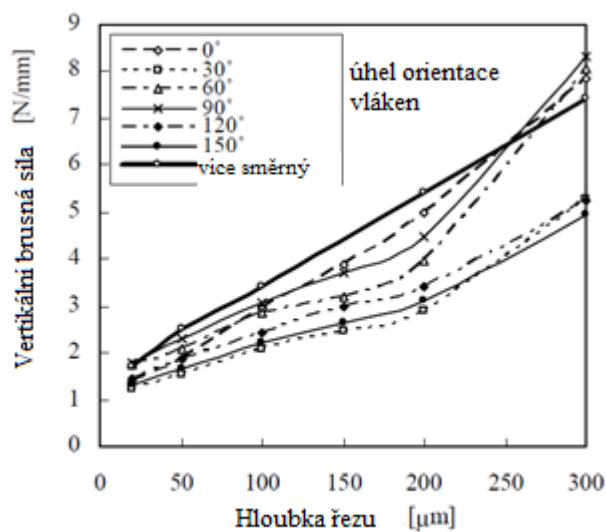


Obrázek 32: Odebírání materiálu při  $\theta = 0^\circ$  [11]

S tím, jak se bude zvyšovat úhel natočení vláken, se bude zvyšovat namáhání módem II při odstraňování materiálu. To znamená, že bude zahrnovat i lom vláken a ne pouze delaminaci vrstev, jak je zobrazen na obrázku 33 a 34. Vzhledem k tomu, že vlákna mají vysokou pevnost ve stříhu, roste brusná síla. Horizontální síla dosáhne maxima při hodnotě  $\theta = 60^\circ$ . Vertikální síla dosáhne vrcholu až při  $\theta = 90^\circ - 120^\circ$ . Je to proto, že vlákna mají velkou podélnou pevnost a jsou odolná vůči odtlačení. [11]

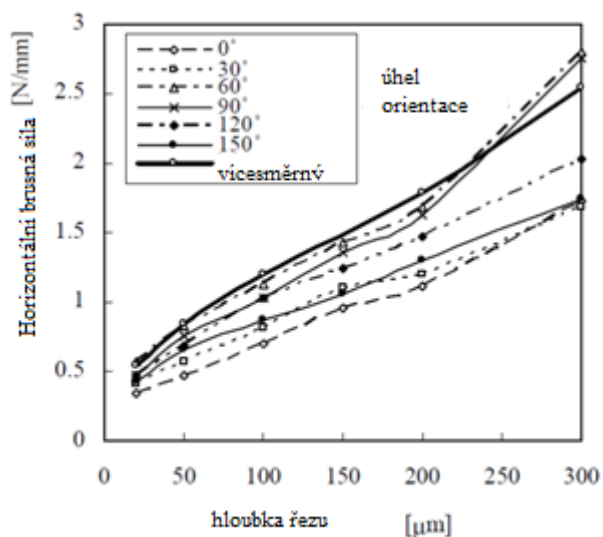
**Obrázek 33: Odebírání materiálu při  $\theta = 45^\circ$  [11]****Obrázek 34: Odebírání materiálu při  $\theta = 90^\circ$  [11]**

Pro porovnání byly měřeny brusné síly i pro vícesměrně navinuté kompozity. Při těchto testech byl použit materiál se směrem vláken  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  ( $-45^\circ$ ). Materiálem byl opět CFRP laminát a měřena byla horizontální a vertikální brusná síla v závislosti na hloubce úběru a hodnoty získané pro vícesměrný kompozit byly porovnány s jednosměrnými materiály s různými úhly natočení vláken. Výsledek experimentu je vidět na obrázcích 35 a 36. [11]



(a)

Obrázek 35: Vertikální brusná síla v závislosti na hloubce řezu [14]



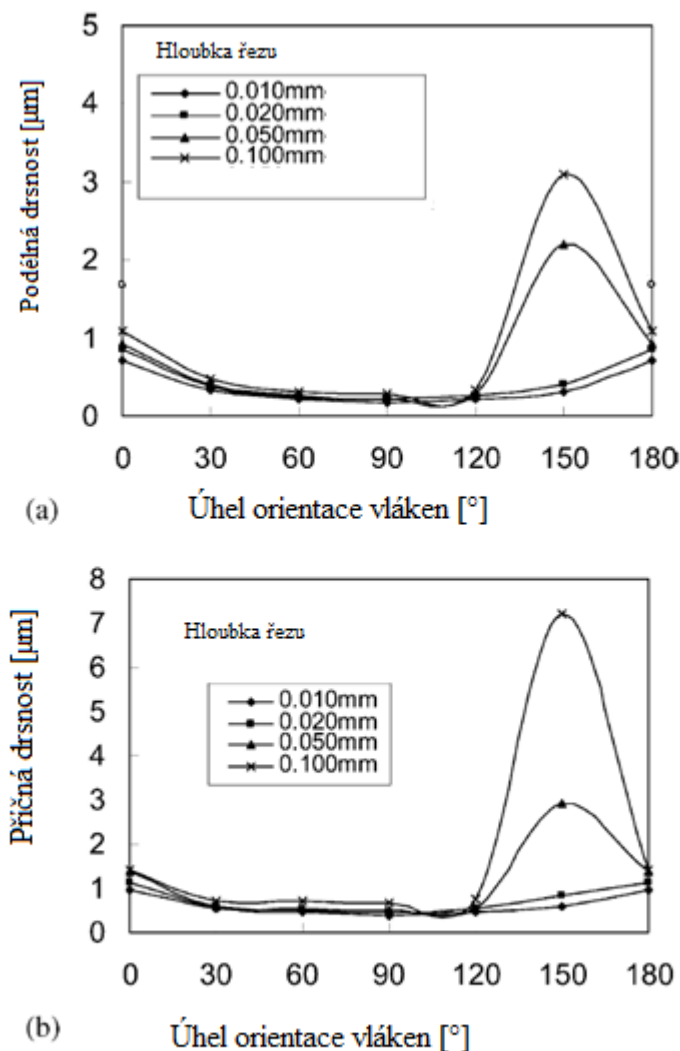
(b)

Obrázek 36: Horizontální brusná síla v závislosti na hloubce řezu [14]

Z obrázků 35 a 36 vidíme téměř konstantní závislost velikosti řezné síly na hloubce řezu. Při broušení je brusná síla téměř vždy nejvyšší při obrábění vícesměrného kompozitu. To může být zapříčiněno tím, že vrstvy s různou orientací se navzájem podporují silněji. Při větších hloubkách řezu vzniknou větší brusné síly pro obrobek s úhlem orientace vláken 0°, 60° a 90° v porovnání s vícesměrným kompozitem. To může být způsobeno zanášením brusného kotouče při broušení těchto materiálů. [14]

## 2.4.2 Povrchová drsnost

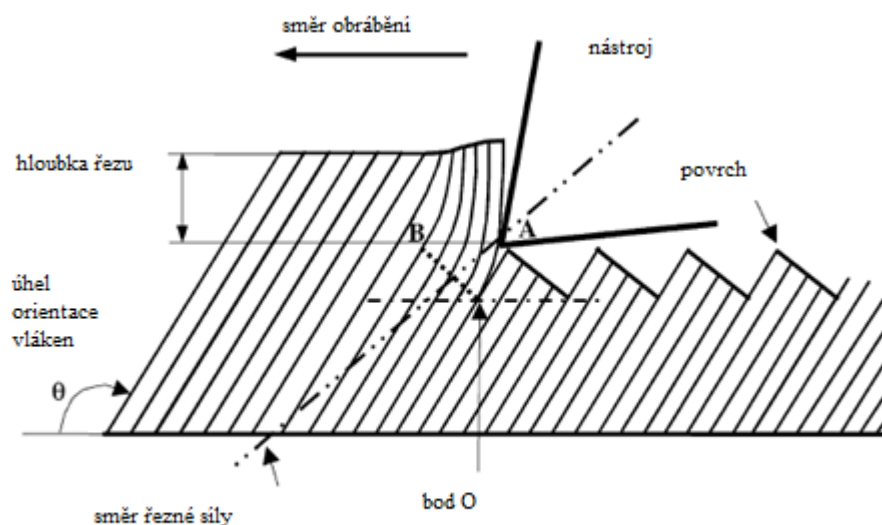
Úhel natočení vláken má obrovský vliv i na povrchovou drsnost. Na obrázku 37 je vidět vliv úhlu natočení vláken na podélnou a příčnou drsnost. [11]



Obrázek 37: Vliv úhlu orientace vláken na drsnost [11]

Z grafu je zřejmé, že při překročení hranice úhlu natočení  $120^\circ$  se náhle zvýší drsnost a při  $150^\circ$  začne znovu klesat. Drsnost tedy dosahuje nejvyšších parametrů mezi  $120^\circ$  a  $180^\circ$ . Nejlepší drsnost byla získána při úhlu natočení vláken  $90^\circ$  až  $120^\circ$  a hloubka řezu zde má nejmenší vliv. Testy byly prováděny se stejnými parametry jako při určování brusných sil u jednosměrně vinutých kompozitů. [11]

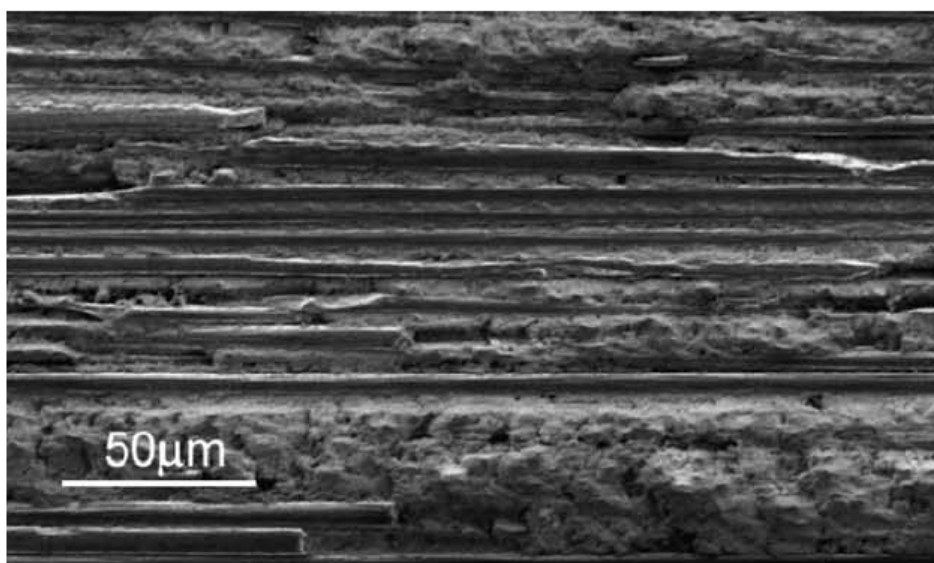
Experimentálně bylo dokázáno, že výsledky broušení odpovídají ortogonálnímu obrábění stejného obrobku při použití nástroje s úhlem hřbetu  $7^\circ$  a s úhlem čela  $-20^\circ$ . Řezná rychlost musí být  $1\text{m}/\text{min}$ . To, proč vniká horší povrch při úhlech natočení vláken mezi  $120^\circ$  a  $180^\circ$ , je vidět na obrázku 38. [11]



Obrázek 38: Schéma odebrání materiálu s orientací vláken  $\theta > 90^\circ$  [11]

Řezný nástroj ohýbá vrstvy vláken. K přerušení vlákna dojde až po dosažení potřebného napětí v ohybu a k přerušení vlákna dojde až v bodě O. Tímto způsobem vzniká drsnější povrch a dochází k hlubšímu průniku do povrchu obrobku. Toto chování je zcela odlišné od oddělování materiálu při úhlu orientace vláken mezi  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , kde jsou vlákna oddělována tahem, a proto se lámou v blízkosti ostří. Tato skutečnost byla potvrzena vysokorychlostními kamerami. [11]

Úhel natočení vláken přestává mít vliv ve velmi malých hloubkách, přibližně okolo  $1\mu\text{m}$ . Povrchová úprava je pak nejhorší při úhlu orientace vláken  $0^\circ$ . To je proto, že v tak malé hloubce broušení nedojde při této orientaci vlákna k lomu vláken, ale pouze k narušení vlákno-matricového systému a to způsobí zhoršení drsnosti. Typickou strukturu povrchu můžeme vidět na obrázku 39. [11]



Obrázek 39: Struktura povrchu pro velmi malé hloubky řezu při  $\theta = 90^\circ$  [11]

Na obrázcích 40(a), 40(b) a 41(a) jsou vidět drobná poškození povrchu při hloubce řezu  $20\mu\text{m}$ . Výsledky odpovídají grafu na obr. 4. Na obrázku 40(a) je vidět, že obrobek s úhlem  $0^\circ$  má velké množství mikrotrhlin podél rozhraní vláken a matrice. Může docházet k delaminaci. Drsnost je opět nejhorší při úhlu  $150^\circ$ . Na obrázku 41(b) je vidět pilový profil v souladu s mechanismem obrábění zobrazeným na obrázku 38. Při porovnání obrázků 41(a) a 41(b) je vidět velké zhoršení kvality povrchu při hloubce řezu  $50\mu\text{m}$  oproti  $20\mu\text{m}$ . [11]

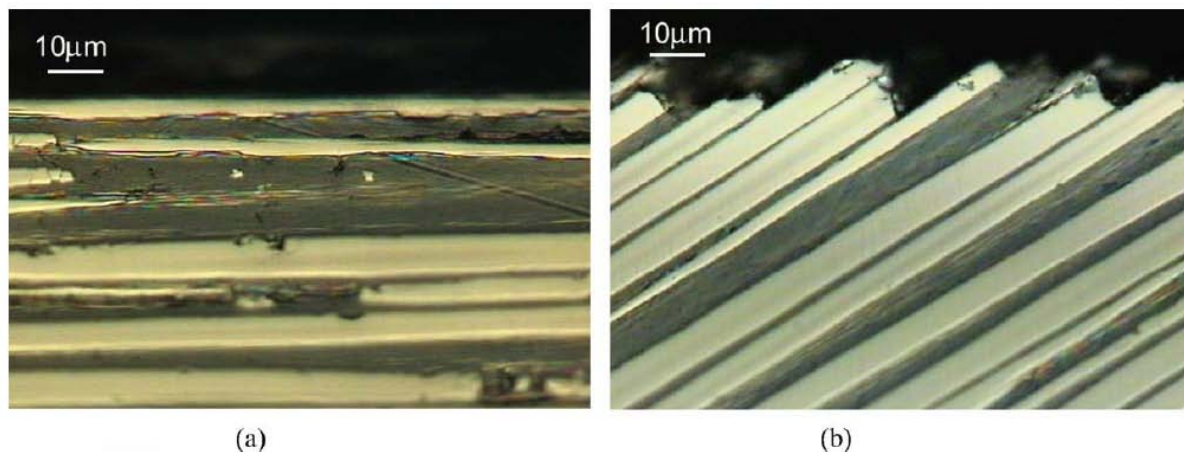


Fig. 7. Cross-sections of ground surfaces at different fibre orientations ( $d = 20\mu\text{m}$ ): (a)  $\theta = 0^\circ$  and (b)  $\theta = 150^\circ$ .

**Obrázek 40: Hloubka řezu  $20\mu\text{m}$ , (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 150^\circ$  [11]**

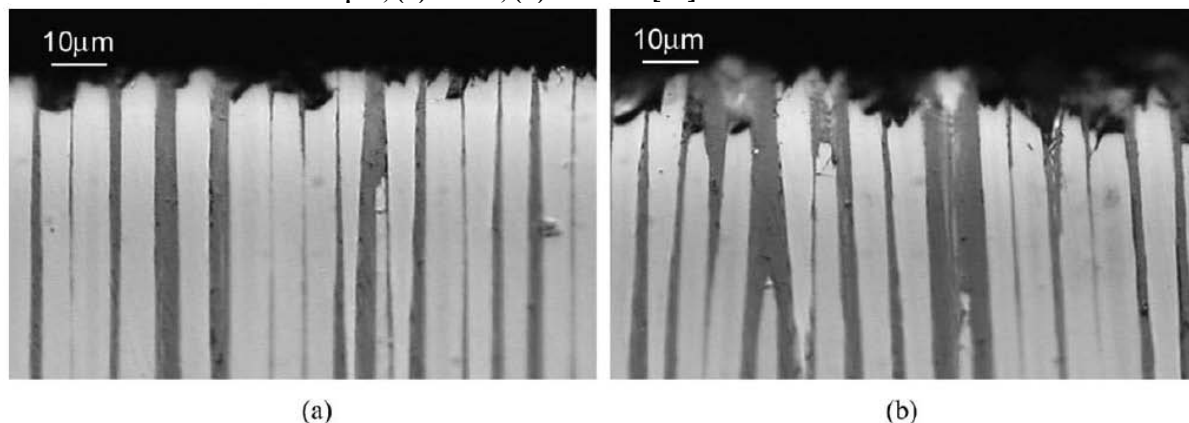
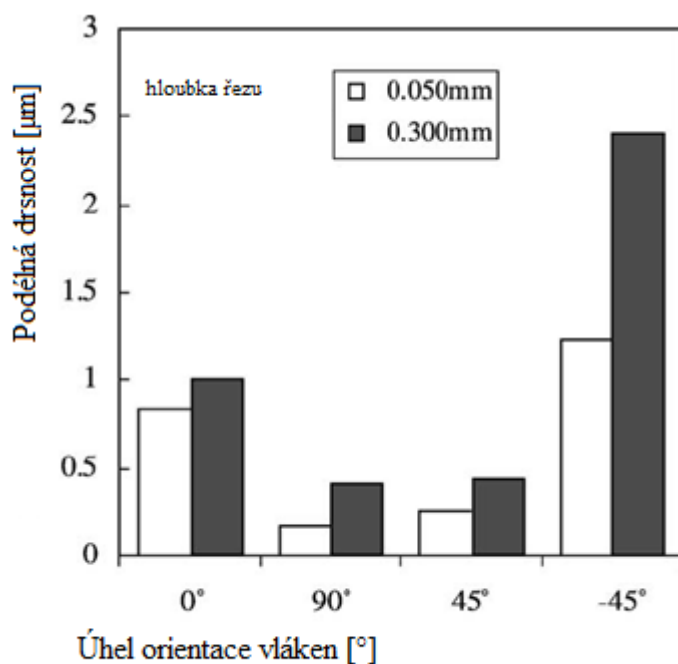


Fig. 8. Cross-sections of ground surfaces at different grinding depths ( $\theta = 90^\circ$ ): (a)  $d = 20\mu\text{m}$  and (b)  $d = 100\mu\text{m}$ .

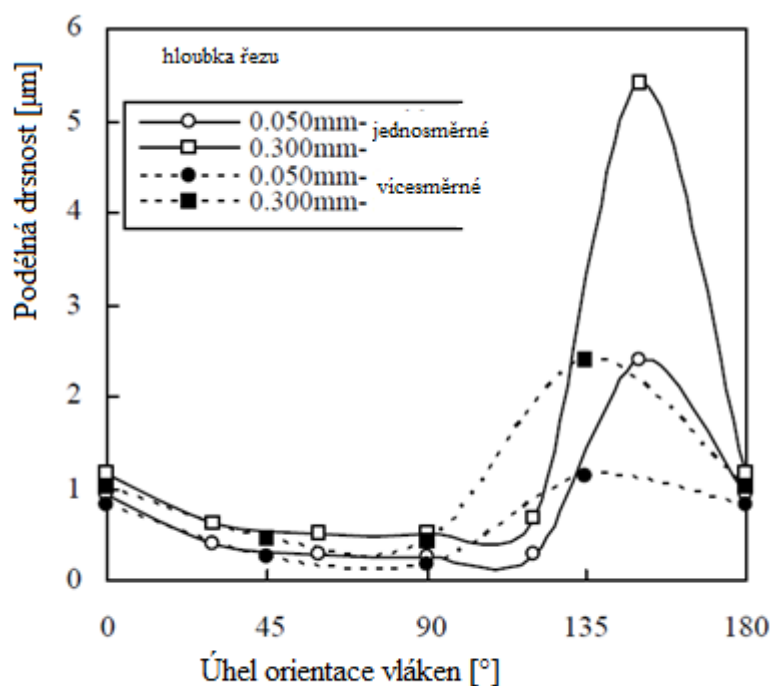
**Obrázek 41:  $\theta = 90^\circ$ , (a) hloubka řezu  $20\mu\text{m}$  (b) hloubka řezu  $50\mu\text{m}$  [11]**

Ve snaze porovnat vliv natočení vláken i u vícesměrných kompozitů byl proveden experiment, kde byla odebírána vrstva s určitou orientací vláken. Materiál i podmínky byly stejné jako v experimentu při zkoumání brusné síly u vícesměrných kompozitů. Na obrázku 42 je znázorněn výsledek tohoto experimentu. Vidíme, že výsledky ukazují podobný nárůst drsnosti jako pro jednosměrné kompozity. [14]



Obrázek 42: Broušení v různých vrstvách vicesměrného kompozitu [14]

Na obrázku 43 je zobrazeno porovnání vicesměrných a jednosměrných kompozitů. Z obrázku je vidět, že oproti jednovrstvým má pro stejnou brusnou hloubku mnohem menší drsnost. Nedochází k tak výraznému "pilovému" efektu, protože vrstva pod obráběnou vrstvou má jinou orientaci a bude bránit odehnutí vláken. [14]

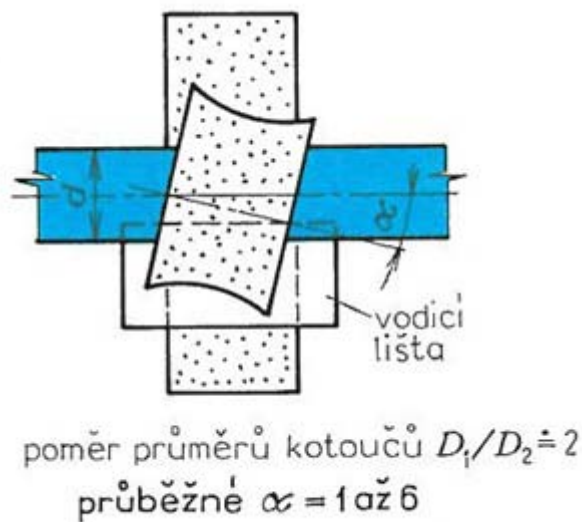


Obrázek 43: Porovnání drsnosti pro jedno a vicesměrné kompozity [14]



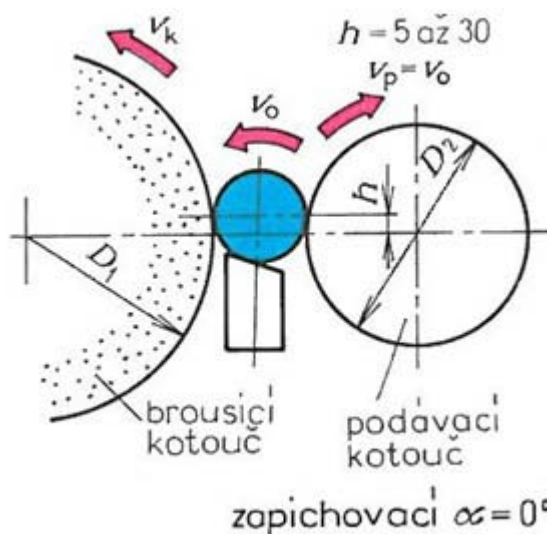
### 2.4.3 Bezhruté broušení

Speciálním typem broušení vnějších válcových ploch je bezhruté broušení. Používá se pro broušení vnějších (nebo vnitřních) válcových ploch. Bezhruté broušení může být průběžné (obrobek se otáčí i posouvá) nebo zapichovací (obrobek se pouze otáčí). Na rozdíl od běžného broušení mezi hroty není obrobek mechanicky uchycen. U průběžného broušení je obrobek volně veden po vodící liště mezi brusným a podávacím kotoučem. Podávací kotouč přenáší na obrobek rotační a posuvný pohyb. Aby podávací kotouč vytvořil posuvný pohyb, je skloněn obvykle o  $2^\circ$  až  $15^\circ$ , jak je vidět na obrázku 44. Bezhruté broušení může být průběžné nebo zapichovací. Velkou výhodou je vysoká produktivita, zvláště u průběžného způsobu. Na obrobku nemusí být vytvořena základna pro mechanické upnutí. Broušení je také přesnější díky podepření obrobku, který se díky tomu neprohne. Schéma bezhrutého broušení je na obrázku 45. [15]



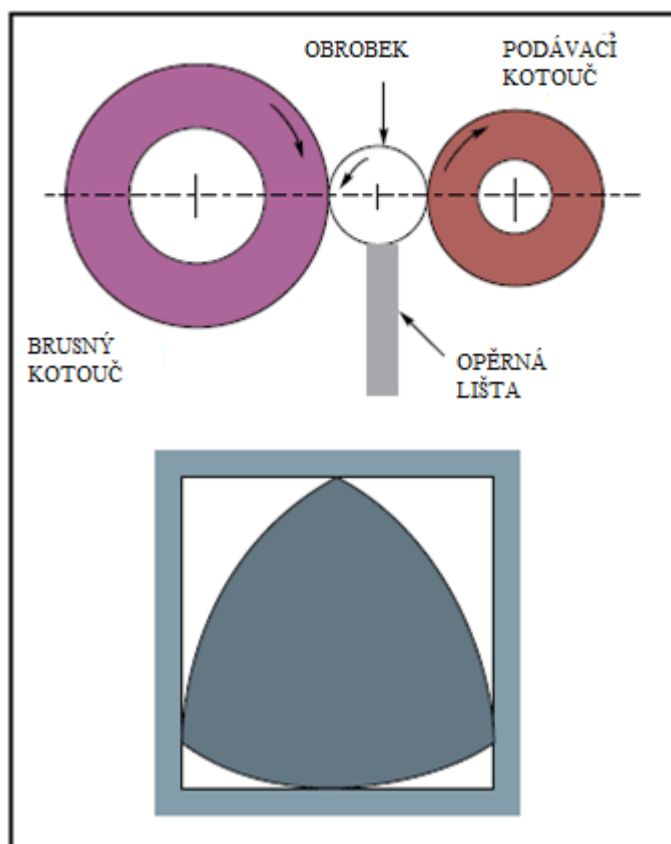
Obrázek 44: Schéma bezhrutého broušení-boční pohled [15]

Při bezhrutém broušení, je-li nastaveno správně, je dosahováno kruhovitosti, povrchové úpravy a rozměrové tolerance, která patří k nejlepším, které můžeme dosáhnout při obrábění. Vytvoření kruhovitého obrobku z nesoustředného polotovaru je dáno na základě vztahů mezi brusným kotoučem, podávacím kotoučem a vodící lištou. Na obrázku 45 je vidět schéma bezhrutého broušení. Vlevo je brousící kotouč, vpravo podávací, uprostřed je vodící lišta a na ní obrobek. Většinou je střed brusného a podávacího kotouče ve stejné výšce. Pro dosažení kruhového tvaru obrobku musí být vodící lišta nastavena tak, aby střed obrobku ležel nad spojnicí středů brusného a podávacího kotouče - výška  $h$  na obrázku 45. Správné určení výšky  $h$  je zásadní parametr pro úspěšný proces bezhrutého broušení. [16]



Obrázek 45: Schéma bezhrotého broušení- čelní pohled [15]

Pokud je výška  $h$  nulová jako na obrázku 46 tvoří kontaktní místa 3 strany čtverce. Vzhledem k tomu je část materiálu odbroušena, ale tak že některý bod obrobku, vzdálenější od středu se posune po vodící liště. Časem se vytvoří tvar, který je vidět na obrázku 46 dole. Ten sice může být přesný, ale není kruhovitý. [15]



Obrázek 46: Bezhraté obrábění pro  $h=0$  [16]

Pro dosažení kruhového profilu musí být splněny dvě základní podmínky. Horní plocha vodící lišty musí být skloněna pod určitým úhlem směrem k podávacímu kotouči. Vodící lišta musí podírat obrobek tak, aby výška  $h$  nebyla nulová. Při správném nastavení není při broušení vytvářen tvar jako na obrázku 46 dole, ale naopak pokud by byl nepřesně vyroben polotovar, tak se jeho kruhovitost během bezhrotého broušení zlepší. Sklon vodící lišty pomáhá udržovat obrobek v kontaktu s podávacím kotoučem a pomáhá tím k tomu, aby se obrobek otáčel stejnou rychlostí jako podávací kotouč. Nesmí dojít k tomu, aby brusná síla byla větší, než třecí síla udržující obrobek ve stejné rychlosti s podávacím kotoučem. Sklon vodící lišty může být až  $45^\circ$ . U většiny případů je nejlepší zvolit úhel  $30^\circ$ . Základem úspěšného bezhrotého broušení je správné nastavení výšky vodící lišty, které udržuje střed obrobku nad spojnicí středů podávacího a vodícího kotouče. Základní doporučení je, že střed obrobku má být výše o polovinu jeho poloměru. Maximální zvednutí středu pro větší obrobky je 15 mm. [16]

Produktivita bezhrotého broušení je značně omezena třemi typy nestabilit: [17]

1. Chvění, jehož nárůst je mnohem zřetelnější než u konvenčního broušení
2. Házení, které se objeví, když obrobek není souměrný a začne kmitat mezi koly
3. Nestabilní pracovní uchycení se objeví, když regulační kolo není schopno rotovat obrobkem jeho obvodovou rychlostí

Přesnost a produktivitu ovlivňuje také statická tuhost soustavy a tolerance obrobku. Při bezhrotém broušení není obrobek upnut, ale pouze podepřený brusným kotoučem, vodící lištou a podávacím kotoučem. Je redukován nevyužitý čas stroje a odpadá nutnost vystředění děr na obrobku. Vzhledem k obrovským úsporám manipulačního času a ceny obrábění je bezhroté broušení rozsáhle používáno při hromadné výrobě například komponentů automobilového a ložiskového průmyslu.[17]

#### 2.4.4 Volba brusného nástroje

Pro správné zvolení brusného nástroje je potřeba určit několik parametrů, které jsou dále popsány. Mezi tyto parametry patří:

##### Zrnitost:

Zrnitost se určuje podle velikosti zrn brusiva. Zrna se třídí podle velikosti, hrubší (do 240) se třídí proséváním přes přesná síta, jemnější se rozdělují plavením - sedimentací. Velikost zrna je značena číslem, které závisí na velikosti otvorů v sítu. Velikost zrna je určena sítem, jímž propadne nejméně 75% ze všech zrn. Dalším sítem může propadnout 3% zrn a 5% zrn může zůstat na hrubším síti. Označení zrnitosti kotouče je pak určeno podle zrn, kterých je v kotouči asi 50% a 25% zrn může být nejbližze menších nebo větších. [18]

Č. zrna	Otvor síta mm		Č. zrna	Otvor síta mm	
	běžný	DIN		běžný	DIN
8	2,34	2,12	90	0,21	0,63
10	1,87	1,90	100	0,19	0,60
12	1,56	1,73	120	0,16	0,55
14	1,34	1,60	150	0,13	0,49
16	1,17	1,50	180	0,10	0,45
20	0,94	1,34	220	0,09	0,41
24	0,78	1,23	240	0,08	0,39
30	0,63	1,10	280	0,07	0,36
36	0,52	1,00	320	0,06	0,34
46	0,41	0,89	400	0,05	0,30
60	0,31	0,78	500	0,04	0,27
70	0,27	0,72	600	0,03	0,25
80	0,23	0,67	1000	0,02	0,19

Obrázek 47: Určení zrnitosti [18]

##### Tvrдост:

Průběh a výsledky broušení významně ovlivňuje charakteristika brousícího nástroje - tvrdost. Touto charakteristikou je vyjádřena míra houževnatosti a pružnosti pojivových můstků mezi zrna a soudržnost pojiva se zrna. Tvrдост je závislá na vlastnostech pojiva, na počtu a velikosti můstků, velikosti počtu i tvaru zrn. "Tvrдост je definována jako odpor, který klade pojivo brousícího nástroje proti vylomení nebo uvolnění zrn brousícího materiálu." [19]

##### Struktura: (sloh)

Mezi pojivem a zrna nástroje pro broušení zůstávají póry. Při menším počtu póru je materiál hutnější. Pokud je struktura řidší, póry jsou větší a napomáhají odstraňování třísek. Struktura je dána pórovitostí, která je značena čísly od 1 do 15. [18]

Sloh č.	1	2	3	4	5	6	7
póry %:	do 5	5,1—10	10,1—15	15,1—20	20,1—25	25,1—30	30,1—35
Sloh č.: 8	9	10	11	12	13	14	15
póry %:	35,1—40	40,1—45	45,1—50	50,1—53	53,1—57	57,1—60	60,1—63
							63,1—66

Obrázek 48: Struktura brusného kotouče [18]

Hutnější kotouče brousí jemněji. Kotouče s velkou pórovitostí se hodí pro hrubování, protože má větší prostor mezi zrna. Brousí tzv. chladněji. Problematické je někdy chlazení, protože kotouč může nerovnoměrně nasát kapalinu a ztratit vyvážení. Kotouče se zvláště velkou pórovitostí se nezanášejí třískami. Lze s nimi brousit i s velkou stykovou plochou brusného nástroje a obrobku. Správná struktura brusného kotouče je taková, při které se tříška nenatlačí mezi zrna, ale sama vyletí při výběhu kotouče ze záběru. Pokud se póry ucpávají, zvyšuje se tření. Při zvyšování tření se začnou třísky tavit a zanášení kotouče se ještě zvýší. Na měkké materiály je proto dobrá pórovitá struktura, protože pak je umožněno hlubší zařezávání do materiálu. Pokud brousíme tvrdý materiál, zrna by měla být hustší pro využití většího počtu menších zrn. Pouze na opravdu velmi tvrdé materiály, jako jsou např. slinuté karbidy, volíme zrna řidší. [17]

Sloh (struktura)	Označ.	Pórovitost	
		přes %	do %
Velmi hutný	1	—	5
	2	5	10
Hutný	3	10	15
	4	15	20
Polohutný	5	20	25
	6	25	30
Pórovitý	7	30	35
	8	35	40
Velmi pórovitý	9	40	45
	10	45	50
Zvláště pórovitý	11	50	53
	12	53	57
	13	57	60
	14	60	63
	15	63	66

Hutná struktura má č. 3 a 4. Je vhodná k broušení tvrdých a křehkých materiálů a tam, kde žádáme jemný povrch.

Střední struktura má č. 5 a 6. Je vhodná k vnějšímu i vnitřnímu broušení.

Pórovitá struktura má č. 7 a vyšší. Je vhodná k broušení měkkých a houževnatých kovů, k rovinnému broušení.

Obrázek 49: Pórovitost pro jednotlivé struktury kotouče [18]

**Základní doporučení pro volbu řezných podmínek: [18]***Zrnitost*

Hrubší zrnitost se volí pro větší úběr a zároveň pokud dochází k zanášení kotouče. Čím bude materiál více tažný a měkčí, tím má být zrno hrubší. Jemnější se volí pro tvrdší materiál a pro lepší drsnost.

*Velikost*

Pokud zvolíme moc široký brusný nástroj, může příliš ohřívat obrobek. Pro broušení hřídele s malým průměrem je vhodné zvolit kotouč také s malým průměrem, pro velký hřídel velký kotouč. Většinou jsou výhodnější kotouče většího průměru díky tomu, že vyžadují méně orovnávaní a náklady za opotřebení na  $1 \text{ cm}^3$  jsou menší. V některých případech je ale výhodnější použití kotoučů malých, vzhledem k tomu, že vznikne menší styková plocha a tím i lepší broušený povrch.

*Tvrdost*

Pro broušení tvrdých materiálů je vhodný měkčí kotouč a pro měkčí materiál tvrdší kotouč.

*Struktura*

Pro měkčí a houževnatější materiál je doporučeno zvolit pórovitější kotouč a naopak.

Na volbu správného nástroje má také vliv stroj, na kterém brousíme. Pokud brousíme na lehčím stroji a může vniknout větší chvění, je vhodné zvolit tvrdší kotouč s jemnější zrnitostí a pórovitější strukturou. Pro stabilnější stroje je možné volit měkčí kotouče s hrubší zrnitostí a hutnější strukturou. [18]

**Pásové broušení:**

Pro pásové broušení je výběr pásu dán především zrnitostí. Čím je pás širší, tím více tepla bude při broušení vznikat. Po výběru pásu je nutné určit také vhodné kontaktní kolo. Je nutné zvolit jeho průměr, tvrdost. Kontaktní kolo nemusí být pouze hladké, ale může mít vrubové ozubení. Pokud ne zvolíme hladké kolo, musíme určit poměr mezi vyříznutým povrchem vůči nevyříznutému. Dále pak úhel vrubového ozubení. Vrubové ozubení má vliv na tlak, kterým působí kontaktní kolo na kotouč a obrobek. Čím menší plocha, tím vyšší tlak, který způsobí zvýšení úběru. Je nutné také zvolit vhodný materiál, který bude mít přiměřenou pružnost. [18]

Poté co zvolíme vhodný brusný pás a kontaktní kolo, musíme zvolit vhodné parametry procesu broušení. Je potřeba zvolit správnou řeznou rychlost. Ta nesmí být příliš vysoká, aby nedošlo k tepelnému poškození obrobku.

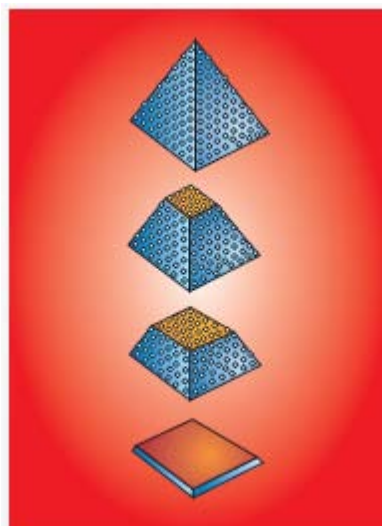
Jak už bylo zmíněno, je výhodné použít brusná zrna s vylepšenou geometrií. Brusné pásy s vylepšenou geometrií zrn vyrábí např. společnost 3M. Společnost produkuje brusné pásy s

obchodními označeními Cubitron™, Trizact™, Cubitron™II rozdělenými podle použité technologie.

Technologií Trizact se vyrobí mikroreplikační technologií pyramidy vytvořené z brusných minerálů mikronové velikosti. Při opotřebování struktury se obnažuje neopotřebený materiál jak je vidět na obrázku 51. Porovnání značení tohoto brusného pásu s běžným značením je zobrazeno na obrázku 50. [20]

<b>Smírek = P- ...</b>	P-2500	P-1200	P-600	P-400	P-280	P-240	P-220	P-120
<b>Trizact = A- ...</b>	A-6	A-16	A-30	A-45	A-65	A-80	A-100	A-160

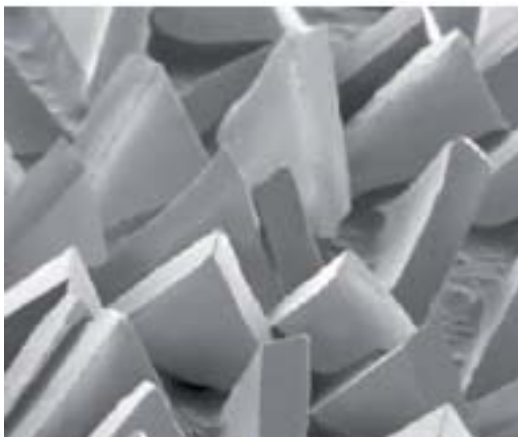
Obrázek 50: Porovnání značení zrnitosti SMIRKU a TRIZACTU [20]



Obrázek 51: Typické pyramidy pro brusný pás Trizact [21]

Brusná zrna 3M Cubitron mají mikroskopickou strukturu, pomocí které se dosahuje toho, že jsou zrna stále ostrá, protože se zrna lámou v předem určených bodech na rozhraní jednotlivých krystalů. Tím se odkrývají nové brusné hrany. [22]

Technologie 3M Cubitron II je už podle názvu vylepšená technologie 3M Cubitron. Technologie Cubitron II spočívá v použití minerálů trojúhelníkového tvaru jak je vidět na obrázku 52. Díky tomu že jsou zrna ostrá, je i menší vývin tepla během broušení, jak se můžeme přesvědčit na obrázku 53. [22]



Obrázek 52: Typická trojúhelníková zrna brusného pásu Cubitron [22]

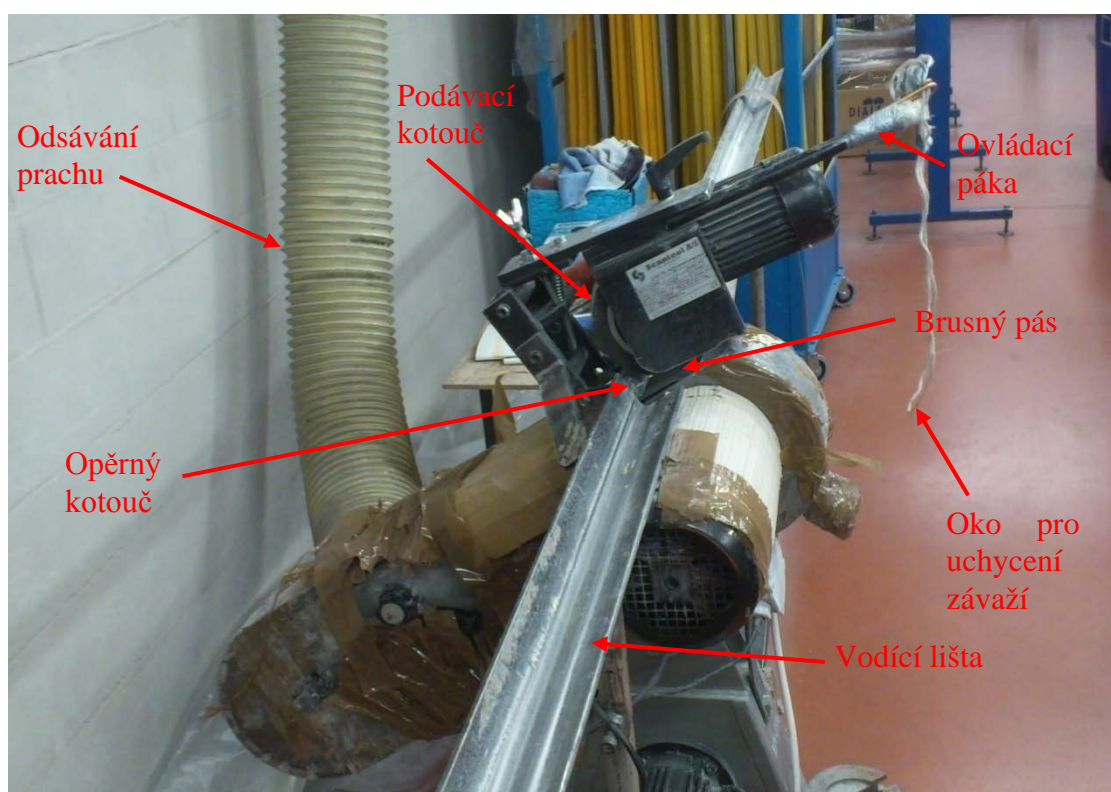


Obrázek 53: Porovnání tepelného ovlivnění obrobku [22]



### 3 Návrh vhodné metodiky obrábění

Jedna z mála firem v České republice, která se zabývá výrobou a obráběním kompozitních materiálů je firma Compo Tech PLUS s.r.o. Firma v současné době používá pro přesnější obrábění vnějších válcových ploch bezhrotou brusku jednodušší konstrukce, která je zobrazena na obrázku 54. Zákazníci této firmy prozatím nepožadují větší přesnost obrobku, kterou by nebylo možné dosáhnout na této brusce. Do budoucna podnik ale plánuje modernizaci vybavení pro zvýšení přesnosti výroby. Vhodná metodika obrábění na tomto stroji byla po dohodě s firmou zkoumána experimentálně. Výsledky experimentu mohou sloužit nejen jako vylepšení dosavadní technologie, ale také jako základ pro další rozvoj a zpřesňování výroby.



Obrázek 54: Bezhrotá bruska - popis stroje

Základní parametry, které mají vliv na výsledek obrábění u tohoto stroje a lze je měnit, jsou úhel natočení podávacího kotouče a velikost přitlačné síly. Úhel natočení podávacího kotouče a jeho obvodová rychlost určuje hodnotu posuvu a rychlost otáčení obrobku. Tento parametr byl ale dlouhodobě sledován a upravován a s jeho správným nastavením si je obsluha stroje jistá. Tento parametr byl tedy nastaven zkušenou obsluhou stroje a nebyl dále měněn. Velikost přitlačné síly je u tohoto stroje určena silou, kterou obsluha tlačí na ovládací páku. Určení správné přitlačné síly je klíčové pro zlepšení výsledků obrábění, a proto byl experiment zaměřen především na určení této síly. Zásadní je také zvolit správný brusný pás. Podle požadavků firmy byl tedy naplánován experiment, jehož cílem bylo stanovit vhodnou přitlačnou sílu a porovnat běžně používaný pás SX373 P240 a pás s obchodním označením Trizact. Běžné brusné pásy má firma ozkoušené, a proto měla zájem o porovnání běžně používaného pásu s označením SX373 P240 a pásu s obchodním označením Trizact, který je vyroben speciální mikroreplikační technologií. Ta byla popsána v předchozí kapitole.

Požadované parametry, které byly sledovány po dohodě s firmou, byly velikosti úběru, řezné síly, házení a drsnosti. Zde jsou základní informace o experimentu:

Obráběcí stroj:

Bezhrotá pásová bruska Centerless Scantool 75x2000

Elektromotor: 3,0 kW 50/60Hz 3x400V, 10,6/3,1A,3000-3400 ot/min

Rozměr pásu: 75x2000 mm

Rozměr kladky: 200x75x42 mm

Rychlost pásu: 30-34 m/s

Pohon otáčení obrobku:

Hnací kladka: 150x50x19 mm

Opěrná kladka: 35x90x22 mm

Elektromotor: 0,25 kW, 50/60 Hz, 3x230/400V, 2770 ot/min

Převodovka: LAC 30,  $i=1:30$

Obráběcí nástroj:

Brusný pás Flexoit SX373 75x2000 P240

Přibližná cena: 100 Kč

Brusný pás Trizact 237 AA 75x2000 A-30 (odpovídá P600)

Přibližná cena: 230 Kč

Řezné podmínky:

posuv: 12,6 m/s

Obráběný materiál:

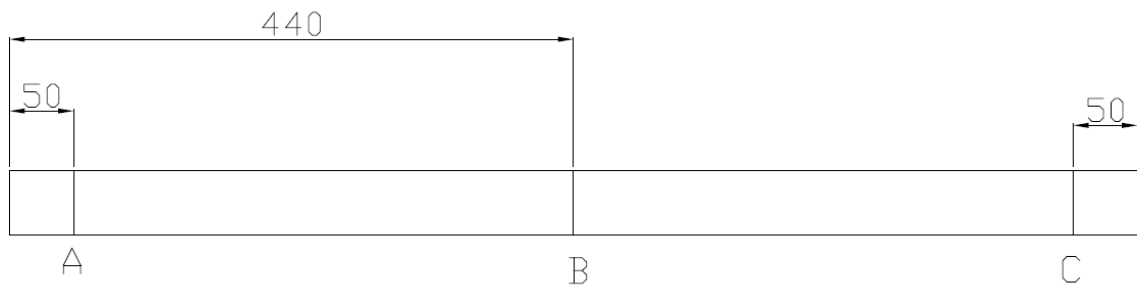
skelné vlákno - epoxidová pryskyřice

úhel navinutí  $\omega = \pm 30^\circ$

### 3.1 Velikost úběru materiálu

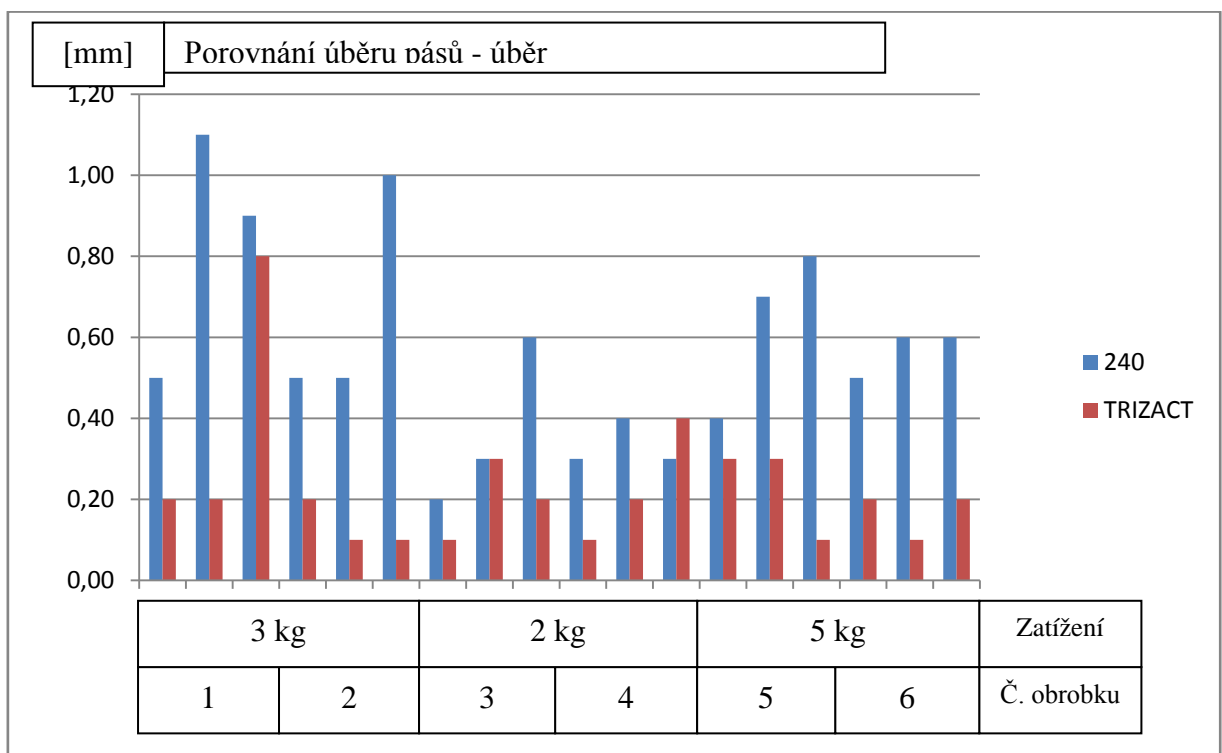
Přítlačná síla je na tomto typu brusky určena silou, kterou tlačí obsluha na páku a váhou podávacího zařízení. Pro určení vlivu přítlačné síly bylo na páku připevněno závaží, jak je vidět na obrázku 59. Závaží bylo voleno dle informací poskytnutých obsluhou a orientačně byla změřena síla, kterou obsluha zatěžuje rameno odpovídající zátěži závaží o hmotnosti 2,3 kg. Podle toho bylo zvoleno závaží 2 kg, 3 kg a 5 kg. Řezná síla byla určena nepřímo, změřením proudu klešťovým multimetrem na jedné fázi.

Během této části experimentu bylo obráběno šest trubek dlouhých 880 mm s průměrem přibližně 30 mm. Na třech místech označených A, B, C byl změřen průměr před a po obrobení a podle toho byla stanovena hodnota úběru. Místa A a C byla od levého a pravého konce vzdálena 50 mm, místo B se nacházelo uprostřed tak, jak je vidět na obrázku 55.



Obrázek 55: Schéma měření

Zatížení 2 kg vyvodí přítláčnou sílu 125 N, 3 kg závaží vyvodí 155 N a pro zatížení 5 kg je hodnota přítláčné síly 210 N. Hodnoty úběru jsou vidět v tabulce 13 (viz příloha č. 1). Porovnání hodnot sloupcovým grafem je vidět na obrázku 56.

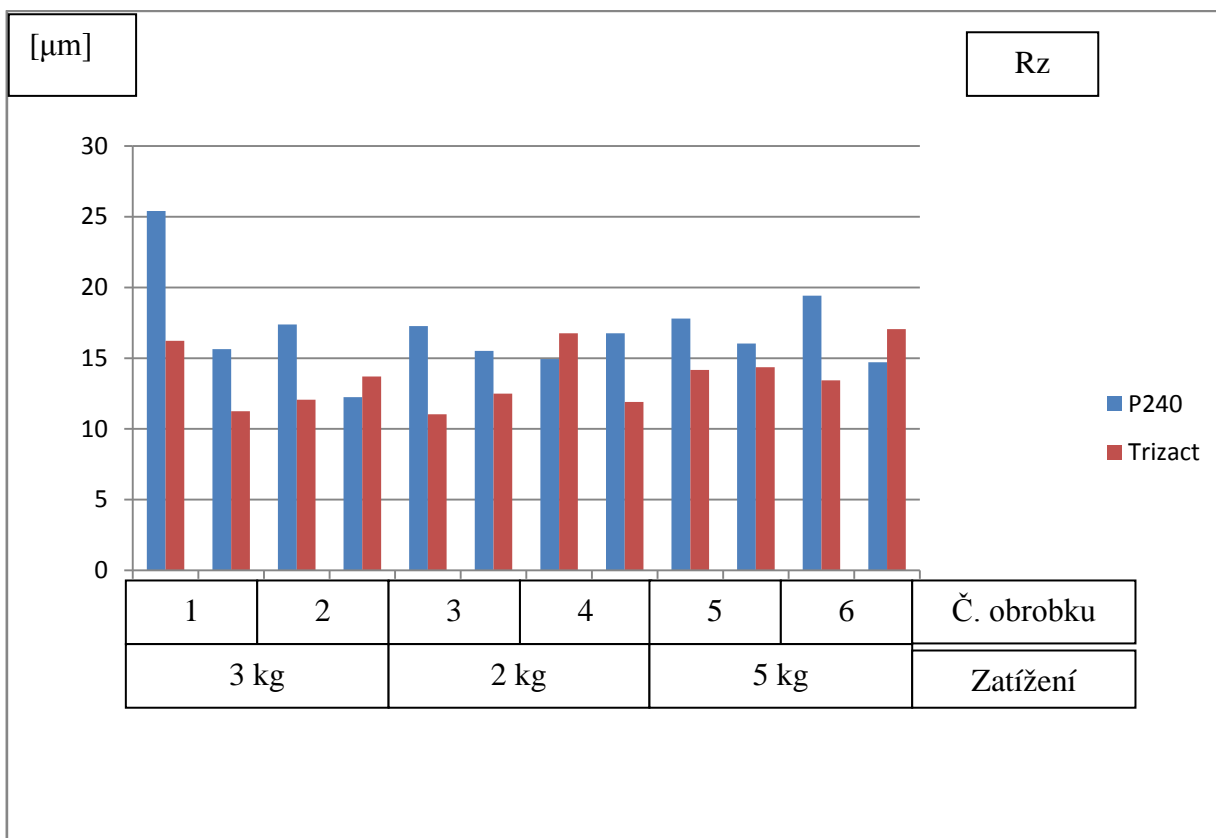


Obrázek 56: Porovnání velikosti úběru

Z grafu je patrné, že největší hodnoty úběru jsou u prvního obrobku. Je to způsobeno tím, že byl použit nový pás, u kterého dojde k výraznému zanesení už během obrábění prvního obrobku. Nejnižší hodnoty úběru jsou pro zatížení 2 kg. O něco vyšší pro 5 kg. Platí tedy, že pro větší zatížení je hodnota úběru vyšší, ale velký vliv má také postupné zanášení a opotřebování pásu. Zvláště u prvního kusu, kdy dojde k velkému úběru, ale zároveň k velkému zanesení. Hodnoty úběru budou tedy na začátku a na konci obrobku velmi rozdílné. Při obrábění dalších kusů se zanášení zpomaluje a nemá už tak velký vliv.

### 3.2 Kvalita obrobeného povrchu

V tabulce 14 (viz příloha č. 1) jsou vidět naměřené hodnoty drsnosti po broušení SX373 P240. Hodnoty drsnosti po broušení pásem Trizact jsou uvedeny v tabulce 15 (viz příloha č. 1). Drsnost byla měřena v jedné a ve dvou třetinách délky obrobku. Na obrázku 64 je vidět porovnání parametru drsnosti Rz, který je vhodný pro určení kvality povrchu u kompozitních materiálů. Vyšší drsnost na prvním obrobku na jedné části je nejspíše způsobena tím, že pás ještě nebyl zanesený. Po zanesení se pás chová, jako kdyby měl menší zrnitost, byl jemnější. Po té, co dojde k nejméně výraznější změně na nástroji u prvního obrobku, z důvodu zanesení a opotřebení, jsou hodnoty drsnosti málo rozdílné. Přítlačná síla nemá velký vliv na drsnost povrchu, ale z grafu můžeme vidět, že drsnost roste spolu s růstem přítlačné síly. Z experimentu je vidět, že velký vliv na kvalitu povrchu má zrnitost. Čím vyšší zrnitost, tím lepší drsnost povrchu. V některých místech vyšla hodnota drsnosti po druhém obrobení jemnějším pásem větší, než po prvním. Je to pravděpodobně chyba měření, která mohla vzniknout, protože místo měření drsnosti nebylo úplně stejné jako při prvním měření.



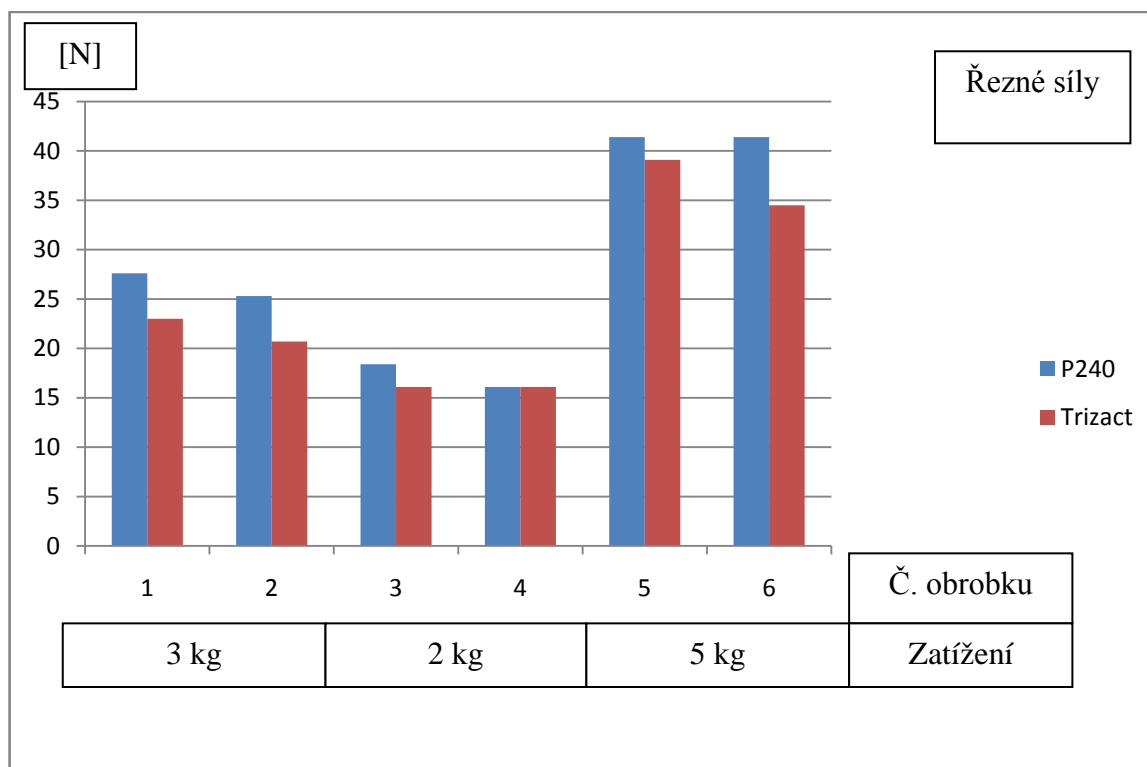
Obrázek 57: Porovnání hodnot drsnosti Rz

U kompozitních materiálů je důležité kontrolovat kvalitu obrobené plochy i jinými způsoby, než pouze kontrolou hodnot parametrů drsnosti. Po každém obroušení byla plocha posouzena ještě hmatem. Při zatížení 2 kg byl povrch hladký, bez vroubků a vlnky. Při zatížení 3 kg byly na povrchu slabě cítit vlnky. Při zatížení 5 kg byl povrch silně vroubkovaný. Zatížení tedy nemělo velký vliv na drsnost povrchu, ale přesto mělo velký vliv na jeho kvalitu. Při broušení docházelo k výraznému chvění, házení a nestabilnímu vedení obrobku. Při velké přítlačné síle byly kmity obrobku zesíleny a na povrchu se vytvořili vroubky. Pokud tedy nebude upravena

konstrukce stroje a podávací lišty tak, aby nedocházelo k tak výrazně nestabilnímu vedení obrobku, bude nejlepší povrch vytvořen se zatížením 2 kg. Při obrobení trubky bez zatížení ramena závažím, kdy byla pouze páka jemně přidržena, byl povrch na pohmat hladký. Bylo by tedy možné přitlačnou sílu ještě zmenšit. Pokud by byl ale obráběn větší obrobek, mohlo by se stát, že bude přitlačná síla moc malá a obrobek vypadne z vodící dráhy.

### 3.3 Řezné síly

Z grafu na obrázku 58 můžeme vidět porovnání řezných sil pro standartní pás P240 a pás Trizact. U pásu Trizact je vidět že řezná síla je menší než u standartního P240. Je to pravděpodobně dáno tím, že je jemnější. Nižší řezné síly vznikají také proto, že pyramidy vytvořené z mikrokrytalů na pásu trizact jsou ostřejší než standartní zrna. Z grafu je také vidět nárůst řezné síly společně se zvyšováním přitlačné síly. U šestého obrobku byla zvýšena stabilita vedení tím, že obsluha přidžovala konec trubky rukou. Z toho je patrné, že zvýšení stability by vedlo k snížení řezné síly.



Obrázek 58: Porovnání řezných sil

### 3.4 Porovnání brusných pásů

Pás s obchodním označením Trizact vyrobený moderní technologií, kdy na jeho povrchu jsou vytvořeny mikroreplikační technologií malé pyramidy, byl při obrábění kompozitního materiálu již po obrobení šestého kusu naprosto opotřeben. Tvar pyramid je výhodný, ale bylo by nutné vylepšit technologii tak, aby byl pás odolnější. Na obrázku 59 je vidět nový pás a na obrázku 60 pás po obrobení 6 kusů. V katalogu výrobce je uvedeno, že pokud je vidět na páse hnědá barva, je pás úplně opotřeben. Na obrázku 60 je vidět, že na některých místech je pás hnědý. Na pohmat byl pás, až na výjimku pravého kraje, úplně hladký. Takto rychlé opotřebení je ekonomicky nepřijatelné. Z obrázku je také vidět silné zanášení pásu.



Obrázek 59: Neopotřebený pás Trizact



**Obrázek 60: Opotřebený brusný pás Trizact**

Na obrázku 61 je vyfocen standartní brusný pás P240. Z obrázku je vidět, že došlo k výraznému zanesení. Na pohmat je pás ale stále ostrý a schopný dalšího provozu. Tento pás je tedy vhodnější pro obrábění kompozitních materiálů. Při požadavku na vyšší kvalitu povrchu je vhodný stejný druh pásu pouze s jemnější zrnitostí. Pro větší úběr je vhodné zvolit hrubší zrnitost. Pás s hrubší zrnitostí se bude také méně zanášet.



**Obrázek 61: Opotřebení brusného pásu SX373 P240**

### 3.5 Geometrické tolerance

Pro porovnání vlivu broušení na celkovou házivost byly vybrány tři trubky s epoxidovou maticí vyztužené skelnými vlákny. Jejich úhel navinutí byl  $\omega = \pm 30^\circ$  a délka přibližně 2000 mm. Hodnoty celkového házení pro tyto tři obrobky jsou vidět v tabulce. Obrobky byly broušeny brusným pásem SX373 P240. Bezhrtým broušením se při experimentu házivost buď nezměnila nebo zhoršila. Příčina bude především v nestabilním vedení obrobku.

**Tabulka 11: Naměřené hodnoty házení**

Číslo obrobku	1	2	3
Průměr [mm]	44	44,4	44,5
Celkové házení [mm]			
před broušením	3,9	3,2	3,5
po broušení	4,1	3,2	3,6

Při experimentu bylo také ověřeno, že pokud má trubka velké obvodové házení, zhorší se její kruhovitost. Po obroušení trubky s celkovým házením 6,6 mm byly uprostřed trubky naměřeny průměry (kolmo na sebe) 43,9 a 43,6 mm. To je zapříčiněno tím, že díky průhybu trubky se obráběná plocha nadzvedne a je méně obroušena. Dojde tedy k nerovnoměrnému obroušení, které má za výsledek zhoršenou kruhovitost obrobku.

Na jednom vybraném kuse byly změřeny orientačně i hodnoty drsnosti. V tabulce 6 jsou tyto hodnoty zobrazeny. Pokud je porovnáme s hodnotami drsnosti při obrábění kratších trubek, vidíme výrazné zhoršení kvality povrchu. Nestabilita vedení obrobku se zvyšuje s jeho délkou a zajištění jeho větší stability je tedy potřeba o to více.

**Tabulka 12: Naměřené hodnoty drsnosti**

Drsnost	A	B	C
Ra	4,324	3,948	5,272
Rz	26,7	22,49	28,07
Rt	34,36	32,29	33,13
Rsm	203	188	223



### 3.6 Zhodnocení výsledků experimentů

Pro zvýšení přesnosti výroby by bylo potřeba učinit taková konstrukční opatření, která by zvýšila stabilnější vedení obrobku. Poté by hodnota přítláčné síly mohla být volena pouze s ohledem na potřebnou velikost úběru, protože na drsnost povrchu má malý vliv. Poslední úběr by byl proveden s menší přítláčnou silou a tak by byla dobrá kvalita povrchu zajištěna. Pokud je ovšem vedení nestabilní, musí být použita malá přítláčná síla okolo 125 N. Použita musí být vždy, protože se díky tomu vytvoří na povrchu vroubky. Při větším přířívku na obrábění by bylo vhodné zvolit nejdříve hrubý pás a poté použít jemný pokud by bylo potřeba snížit drsnost povrchu. Z porovnání brusných pásů vyplývá, že pás s obchodním označení Trizact není vhodný pro obrábění kompozitních materiálů z důvodu velmi nízké životnosti nástroje. Při sledování geometrických tolerancí bylo zjištěno, že broušení má negativní vliv na házivost obrobku. Na vině je opět nestabilita řezného procesu.

## 4 Závěr

Prvním cílem bakalářské práce byl rozbor současného stavu obrábění vnějších válcových ploch z kompozitních materiálů s důrazem na přesnost a kvalitu povrchu. Tyto materiály mohou mít velice různé vlastnosti a při obrábění se mohou chovat při stejných podmínkách velice rozdílně. Proto se práce zaměřila pouze na skupinu vlákný vyztužených kompozitů s polymerní matricí. Základem teoretického výzkumu obrábění je ortogonální obrábění. Proto se práce nejprve zabývá právě touto problematikou na svém začátku. Práce se zaměřuje na obrábění vnějších válcových ploch. Proto jsou na dalších stránkách popsány nejčastější metody obrábění těchto ploch a to soustružení a broušení. Pro tyto technologie byla porovnána vhodnost jednotlivých nástrojů. Vliv řezných parametrů pro dosažení dobré kvality povrchu a další informace, které by mohly mít vliv na obrábění kompozitních materiálů. Pro vlákný vyztužené plasty není důležité znát pouze to, ze kterých materiálů se skládá, ale také jakou technologií byl vyroben a jak jsou vlákna orientována vzhledem ke směru řezné síly. Tuto problematiku práce rovněž reflektuje.

Dalším cílem práce bylo aplikovat získané informace na konkrétní problémy ve firmě Compo Tech PLUS s.r.o., která se zabývá výrobou a obráběním vlákný vyztužených polymerů. K obrábění vnějších válcových ploch zde používají bezhrotou pásovou brusku. Proto se práce při rozboru současného stavu zabývala právě i bezhrotým a pásovým broušením. Pro používanou pásovou bezhrotou brusku jsou pak v této práci zjišťovány možnosti zpřesnění a zkvalitnění výroby. Informace byly zjišťovány experimentálně přímo na konkrétním stroji. Zde byla podle požadavků firmy zjištěna vhodná přítláčná síla a srovnány dva brusné pásy.

V této práci jsou tedy uvedeny základní informace pro obrábění vnějších válcových ploch, získané z různých odborných publikací a především vědeckých experimentů. Další informace byly získány vlastním experimentem bezhrotého pásového broušení. Tyto informace mohou být použity jako základ při modernizaci a zpřesňování výroby nejen ve firmě Compo Tech PLUS s.r.o.

## 5 ZDROJE

- [1] MICHNA ŠTEFAN, [http://www.stefanmichna.com/download/technicke-Materialy\\_II/kompozitni\\_materialy.pdf](http://www.stefanmichna.com/download/technicke-Materialy_II/kompozitni_materialy.pdf), (dostupné 10.5.2013)
- [2] HUMÁR, ANTON, *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů, teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru strojírenská technologie*, Brno : Vutium, 2004. sv. 143. ISBN 80-214-2740-X.
- [3] PÍŠKA, M., *Speciální technologie obrábění*, Brno : Akademické nakladatelství Cerm, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [4] VASILKO, K., *Nové materiály a technológie ich spracovania*, Bratislava : ALFA, 1990. ISBN 80-7099-416-9.
- [5] SÝKORA, R., *Obrábění kompozitních materiálů*, 2012.
- [6] SHEIKH-AHMAD, J.Y., *Machining of Polymer Composites*, New York : Springer, 2009. ISBN 978-0-387-35539-9.
- [7] TETI, R., *Machining of Composite Materials*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 2, 2002, Pages 611-634, ISSN 0007-8506, [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61703-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61703-X).  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060761703X>)
- [8] [http://www.superhard.cz/uploads/files/superhard\\_pkd\\_a\\_cbn\\_katalog\\_9-2011.pdf](http://www.superhard.cz/uploads/files/superhard_pkd_a_cbn_katalog_9-2011.pdf), (dostupné 11.6.2013)
- [9] PAVELKA, R., *Analýza vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů*, Brno : Diplomová práce, 2010.
- [10] PALANIKUMAR, K., MATA, F., PAULO DAVIM, J., *Analysis of surface roughness parameters in turning of FRP tubes by PCD tools*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 204, Issues 1–3, 11 August 2008, Pages 469-474, ISSN 0924-0136, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.088>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607014343>)
- [11] HU, N. S., ZHANG, L., C., *Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastic*, N.S. Hu, L.C. Zhang, Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics, Journal of Materials Processing Technology, Volume 152, Issue 3, 30 October 2004, Pages 333-338, ISSN 0924-0136, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.374>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604007514>)
- [12] [https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent13/help/ans\\_str/Hlp\\_G\\_STRFRINTRO.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent13/help/ans_str/Hlp_G_STRFRINTRO.html), (dostupné 12.6.2013)
- [13] N.S. Hu, L.C. Zhang, *A study on the grindability of multidirectional carbon fibre-reinforced plastics*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 140, Issues 1–3, 22 September 2003, Pages 152-156, ISSN 0924-0136, [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00704-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00704-0).  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603007040>)
- [14] <http://zoei.sssebrno.cz/brouseni---zpusoby/>, (dostupné 10.6.2013)
- [15] KOEPFER, C., *Modern Machine Shop*, <http://www.mmsonline.com/articles/centerless-grinding-not-magic>
- [16] GALLEGO, I., *Intelligent Centreless Grinding: Global Solution for Process Instabilities and Optimal Cycle Design*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 56, Issue 1, 2007, Pages 347-352, ISSN 0007-8506, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.080>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607000856>)

[17] HU, N. S., ZHANG, L., C., *A study of grindability of multidirectional carbon fibre-reinforced plastic*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 140, Issues 1–3, 22 September 2003, Pages 152-156, ISSN 0924-0136, [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00704-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00704-0).

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603007040>)

[18] HUMÁR, ANTON, *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů*, Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Habilitační a inaugurační spisy ; sv. 143, ISSN 1213-418X, 2004, Brno, VITIUM .

## **6 Seznam příloh**

PŘÍLOHA Č. 1: - Zjištěné údaje při experimentu

## **PŘÍLOHA č. 1**

### **Zjištěné údaje při experimentu**

V tabulce 8 jsou zobrazeny naměřené hodnoty průměrů na 6 trubkách dlouhých 880 mm a z nich vypočtená hodnota úběru.

**Tabulka 13: Hodnoty průměrů a z nich určený úběr**

	1			2			3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Před broušením									
Průměr	32,2	32,3	32,5	32,1	32	32,2	32	32,3	32,4
Po 1. br., pás P240									
Průměr	31,7	31,2	31,6	31,6	31,5	31,2	31,8	32	31,8
Úběr	0,50	1,1	0,9	0,50	0,5	1	0,20	0,3	0,6
Po 2. broušení, pás: Trizact									
	31,5	31	30,8	31,4	31,4	31,1	31,7	31,7	31,6
Úběr	0,2	0,2	0,8	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2
	4			5			6		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Před b.									
Průměr	32,1	32,2	32,3	32,1	32,2	32	32,4	32,3	32,4
Po 1. br.									
Průměr	31,8	31,8	32	31,7	31,5	31,2	31,9	31,7	31,8
Úběr	0,30	0,4	0,3	0,40	0,7	0,8	0,50	0,6	0,6
Po 2. br.									
	31,7	31,6	31,6	31,4	31,2	31,1	31,7	31,6	31,6
Úběr	0,1	0,2	0,4	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2

V tabulce 14 a 15 jsou uvedeny naměřené hodnoty drsnosti. V tabulce 14 je zavedeno označení místa, kdy písmena označují jednotlivé obrobky a číslo 1 a 2 označuje místo na jednotlivých obrobkách. V tabulce 15 je zavedeno odlišné označení. Jednotlivé obrobky jsou označeny římskou číslicí. Konkrétní místo na obrobku opět číslem 1 a 2. Drsnost byla měřena v jedné a ve dvou třetinách délky obrobku.

**Tabulka 14: Hodnoty drsnosti po broušení pásem SX373 P240**

	1		2		3		4		5		6	
Drsnost	Po 1	P240										
Místo	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1	E2	F1	F2
Ra	4,238	2,887	3,026	2,188	3,031	2,704	2,831	2,868	2,987	2,841	3,358	2,695
Rz	25,4	15,64	17,38	12,25	17,27	15,51	14,94	16,76	17,8	16,03	19,42	14,71
Rt	40,55	19,05	22,66	15,3	22,44	20,18	17,51	21,32	25,78	19,83	27,16	16,96
Rsm	210	178	137	122	151	173	169	141	162	121	175	162

**Tabulka 15: Hodnoty drsnosti po broušení pásem Trizact.**

	1		2		3		4		5		6	
Drsnost	Po 2	Trizact										
Místo	I-1	I-2	II-1	II-2	III-1	III-2	IV-1	IV-2	V-1	V-2	VI-1	VI-2
Ra	3,071	1,857	2,371	2,333	1,971	2,38	2,52	2,201	2,819	2,172	2,409	2,98
Rz	16,23	11,25	12,06	13,7	11,03	12,49	16,76	11,91	14,17	14,36	13,43	17,05
Rt	19,09	13,8	15,14	18,29	13,34	13,54	22,3	15,43	16,83	20,7	16,38	24,96
Rsm	176	147	168	127	144	158	147	150	169	177	200	178



