

# Obrobitelnost vláknově vyztužených kompozitů

Bc. Juraj Greguš

---

Diplomová práce  
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Juraj GREGUŠ**  
Osobní číslo: **T10548**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení jakosti**

Téma práce: **Obrobitelnost vláknově vyztužených kompozitů**

Zásady pro vypracování:

Vypracujte literární studii k dané problematice  
Příprava kompozitních vzorků  
Volba vhodných nástrojů  
Vyhodnocení naměřených hodnot složek řezné síly  
Technicko ekonomické hodnocení

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

HUMÁR, A. Obrábění vláknově vyztužených kompozitu. 1. vyd. BRNO: VUTIUM, 2004. 26 s. ISBN 80-214-2740-X.

KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2

MACHEK, V. Nauka o materiálu. 4. část, Polymery a kompozity s polymerní matricí. 1. vyd. PRAHA: Nakladatelství CVUT, 2008. 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: GREGUS JURAJ

Obor: ŘÍZENÍ JAKOSTI

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3<sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 27. 5. 2012



<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací;

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělků jím dosažených v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Táto diplomová práca je zameraná na oblasť obrábania vláknovo vystužených kompozitných materiálov. Obsahuje obecný rozbor problematiky rezných síl pri frézovaní, popis experimentálneho zariadenia pre meranie rezných síl, charakteristiku kompozitných materiálov, ich vlastnosti, výrobu a využitie. Vyhodnotenie experimentálne nameraných zložiek rezných síl pri valcovom nesúslednom frézovaní.

Kľúčové slová: frézovanie, rezné sily, kompozitné materiály, matrice, vlákna.

## **ABSTRACT**

This thesis is aimed at the area of fiber-reinforced composites machining. It contains cutting forces problems analyses during milling operation, description of experimental machinery for measuring cutting forces, characteristic of composite materials, their properties, production and usage. Evaluation of experimentally measured values of cutting forces during cylindrical conventional milling.

Keywords: milling, cutting forces, composite materials, matrix, fibres

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu práce Ing. Ondřejovi Bílkovi Ph.D. za odborné vedenie práce a poskytnutie rád pri vypracovaní.

Prehlasujem, že diplomovú prácu na tému Obrobiteľnosť vláknovĕ vyztužených kompozitů, som vypracoval samostatne, s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname použitej literatúry.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

V Zlíne 17.4.2012

.....

Podpis študenta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČASŤ</b> .....	<b>10</b>
<b>1 FRÉZOVANIE</b> .....	<b>11</b>
1.1 PRIEREZ TRIESKY .....	13
1.2 REZNÉ SILY .....	14
<b>2 EXPERIMENTÁLNE ZARIADENIE PRE MERANIE REZNÝCH SÍL</b> .....	<b>17</b>
2.1 INDUKČNÉ SNÍMAČE SÍL .....	17
2.2 KAPACITNÉ SNÍMAČE SÍL .....	18
2.3 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE SÍL .....	18
2.4 TENZOMETRICKÉ ODPOROVÉ SNÍMAČE SÍL.....	19
2.5 MAGNETICKÉ SNÍMAČE SÍL .....	20
<b>3 KOMPOZITNÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>24</b>
3.1 VLASTNOSTI VLÁKNOVÝCH KOMPOZITOV .....	27
3.2 ZLOŽENIE KOMPOZITOV .....	32
3.2.1 Vystužujúce vlákna .....	32
3.2.2 Matrice .....	38
3.3 VÝROBA VLÁKNITÝCH KOMPOZITOV .....	41
<b>II PRAKTICKÁ ČASŤ</b> .....	<b>47</b>
<b>4 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT ZLOŽIEK REZNEJ SILY</b> .....	<b>48</b>
4.1 REZNÉ PODMIENKY .....	48
4.2 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH MATERIÁLOV .....	51
4.3 POUŽITÉ NÁSTROJE .....	53
4.4 ROZBOR SILOVÉHO NAMÁHANIA FRÉZ .....	56
<b>ZÁVER</b> .....	<b>64</b>
<b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY</b> .....	<b>65</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK</b> .....	<b>67</b>
<b>ZOZNAM OBRÁZKOV</b> .....	<b>68</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK</b> .....	<b>70</b>
<b>ZOZNAM PRÍLOH</b> .....	<b>71</b>



## ÚVOD

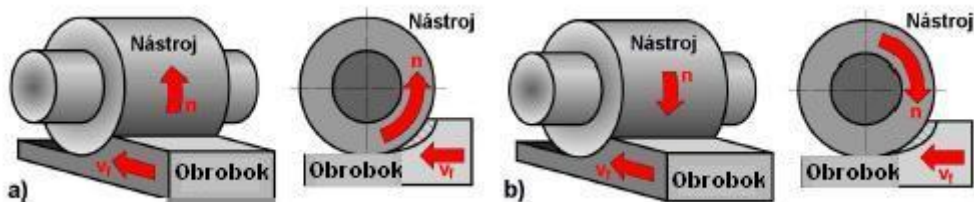
Výroba a spotreba moderných kompozitných materiálov podporená silným dopytom z leteckého, automobilového a medicínskeho priemyslu neustále stúpa. Zároveň vzrastajú požiadavky na výrobné metódy, ktoré zaručia požadovanú kvalitu a tiež produktivitu výroby. Kompozitné materiály sú väčšinou značne abrazívne. Pri tvorbe triesky nastávajú problémy s odvodom vzniknutého tepla, pri vstupe a výstupe nástroja z materiálu zase s delamináciou (oddeľovaním jednotlivých vrstiev materiálu). Materiály, ktoré sú zložené z vrstiev s rôznymi vlastnosťami majú odlišné požiadavky na trieskové obrábanie. Z tohto dôvodu som sa rozhodol zamerať moju diplomovú prácu na túto tému, a prakticky si overiť vhodné nástroje pre obrábanie vláknitých kompozitných materiálov, ich pôsobenie na tento materiál, ďalej ako sa kompozit chová behom rezného procesu a predovšetkým jeho výstupné fyzikálne, mechanické a materiálové vlastnosti a jeho vhodnosť pre následné využitie v praxi.

## I. TEORETICKÁ ČASŤ

## 1 FRÉZOVANIE

Frézovanie, je obrábacia metóda, pri ktorej sa materiál obrobku odoberá britným rotujúcim nástrojom. Posuv koná najčastejšie súčiastka, prevažne v smere kolmom na os nástroja. U moderných frézovacích strojov sú posuvné pohyby plynulo meniteľné a môžu sa realizovať vo všetkých smeroch (obrábacie centrá, viacosé CNC frézky). Rezný proces je prerušovaný, každý zub frézy odrezáva krátke triesky rôznej dĺžky.

V závislosti na aplikovanom nástroji sa z technologického hľadiska rozlišuje frézovanie valcové ( frézovanie obvodom nástroja - Obr.1.) a čelné (frézovanie čelom nástroja Obr.2.). Od týchto základných spôsobov sa odvodzujú niektoré ďalšie spôsoby, ako je frézovanie okružné a planétové. (2)



Obr. 1. Valcové frézovanie: a) nesúsledné, b) súsledné (4)



Obr. 2. Čelné frézovanie (4)

**Valcové frézovanie** sa prevažne uplatňuje pri práci s valcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy sú vytvorené iba po obvode frézy, hĺbka odoberanej vrstvy sa nastavuje kolmo na os frézy a smer posuvu. Obrobená plocha je rovnobežná s osou otáčania frézy. V závislosti na kinematike obrábacieho procesu sa rozlišuje frézovanie nesúsledné (protismerné, proti-bežné) a súsledné (súbežné).

Pri nesúslednom frézovaní je zmysel rotácie nástroja proti smeru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká pri vnikaní nástroja do obrobku. Hrúbka triesky sa postupne mení z nullo-

vej hodnoty na maximálnu hodnotu. K oddeľovaniu triesky nedochádza v okamihu jej nulovej hrúbky, ale po určitom sklze britu po ploche vytvorenej predchádzajúcim zubom. Pritom vznikajú silové účinky a deformácie spôsobujúce zvýšené opotrebenie britu. Rezná sila pri protismernom frézovaní má zložku, ktorá pôsobí smerom nahor a odťahuje obrobok od stola stroja.

#### Výhody nesúsledného frézovania:

- trvanlivosť nástroja nezávisí na okujách, piesčitom povrchu obrobku a pod.
- nie je potreba vymedzovať vôľu medzi posuvnou skrutkou a maticou stolu stroja
- menšie opotrebenie skrutky a matice
- záber zubov frézy nezávisí na hĺbke rezu

Pri súslednom frézovaní je zmysel otáčania nástroja v smere posuvu obrobku. Maximálna hrúbka triesky vzniká pri vníkaní zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha sa vytvára, keď zub frézy vychádza zo záberu. Rezné sily pôsobia obvykle smerom dolu, proti stolu stroja.

#### Výhody súsledného frézovania:

- vyššia trvanlivosť britu, čo umožňuje použitie vyšších rezných rýchlostí a posuvov
- potrebný menší rezný výkon
- rezná sila pritlačuje obrobok k stolu stroja, takže je možné použiť jednoduchšie upínacie prípravky
- menší sklon k chveniu
- obvykle menší sklon k tvoreniu nárastkov
- menšia drsnosť obrobeného povrchu (2)

**Čelné frézovanie** sa uplatňuje pri práci s čelnými frézami, ktoré majú brity vytvorené na obvode a čele nástroja. Podľa polohy osi frézy vzhľadom k frézovanej ploche sa rozlišuje symetrické (os nástroja prechádza stredom frézovanej plochy) a nesymetrické (os nástroja je mimo stredu frézovanej plochy). U čelného frézovania pracuje fréza súčasne súsledne aj nesúsledne.

Hlavný rotačný pohyb u všetkých druhov frézovania koná nástroj, posuvný pohyb je väčšinou priamočiary a koná ho obrobok. Hodnota reznej rýchlosti sa vypočíta podľa vzťahu:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} \quad [1]$$

Základnou jednotkou posuvného pohybu je posuv na zub  $f_z$ , čo je dĺžka dráhy, ktorú prejde obrobok po dobu záberu zubu. Z posuvu na zub sa dá spočítať posuv na otáčku  $f_n$ :

$$f_n = f_z \cdot z \quad [2]$$

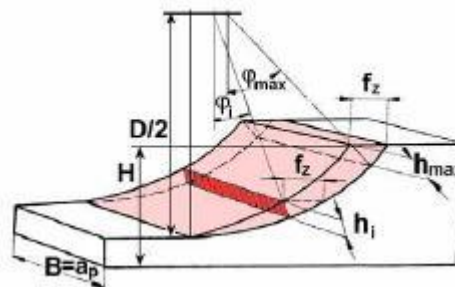
Posuvná rýchlosť sa vypočíta podľa vzťahu: (4)

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [3]$$

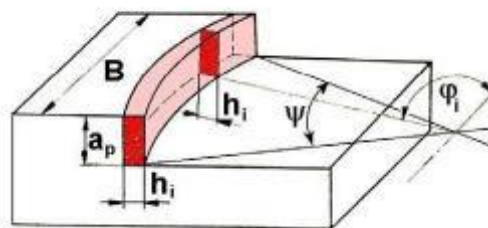
### 1.1 Prierez triesky

Hrúbka odrezávanej triesky  $h_i$  sa pri valcovom nesúslednom frézovaní mení od nulovej do maximálnej hodnoty a od maximálnej hodnoty do nuly pri súslednom frézovaní. Menovitá hrúbka triesky  $h_i$  v ľubovoľnej fáze jej odrezávania sa vyjadří vzťahom:

$$h_i = f \cdot \sin \varphi_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [4]$$



Obr. 3. Prierez triesky pri valcovom frézovaní (4)



Obr. 4. Prierez triesky pri čelnom frézovaní (4)

Menovitý prierez triesky pre polohu zubu frézy  $i$  sa vyjadrí na základe pomeru naznačených na Obr.3.

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [5]$$

Maximálna veľkosť menovitého prierezu triesky bude pri  $\varphi_i = \varphi_{\max}$ :

$$A_{D\max} = a_p \cdot h_{\max} = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_{\max} \quad [6]$$

$$\sin \varphi_{\max} = \frac{2}{D} \sqrt{D \cdot H - H^2} \quad [7]$$

U čelného frézovania sa hrúbka triesky takisto mení v závislosti na uhle posuvného pohybu  $\varphi_i$  a je navyše ovplyvnená i uhlom nastavenia hlavného ostria  $\kappa_r$ , preto sa jej okamžitá hodnota vypočíta podľa vzťahu:

$$h_i = f_z \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \kappa_r \quad [8]$$

Menovitá šírka triesky  $b_i$  je pre ľubovoľné  $\varphi_i$  konštantná a vypočíta sa podľa vzťahu: (2)

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [9]$$

Menovitý prierez triesky  $A_{Di}$  pre  $\kappa_r=90^\circ$ :

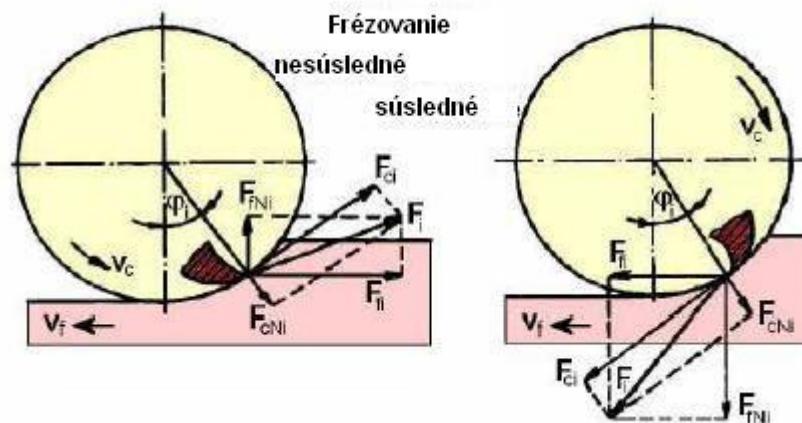
$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [10]$$

Maximálna veľkosť menovitého prierezu triesky je pri  $\varphi_i=90^\circ$ :

$$A_{Di} = a_p \cdot f_z \quad [11]$$

## 1.2 Rezné sily

Pri špecifikácii rezných síl pri frézovaní sa vychádza zo silových pomerov na jednom brite, ktorý je v polohe určenej uhlom  $\varphi_i$ . Pre valcové frézovanie nástrojom s priamymi zubmi sa celková rezná sila pôsobiaca na brite  $F_i$  rozkladá na zložky  $F_{ci}$  a  $F_{cNi}$  resp. na zložky  $F_{fi}$  a  $F_{fNi}$  (Obr.5.) (4)



Obr. 5 Rezné sily na zube valcovej frézy v pracovnej rovine  $P_{fe}$  (4)

Rezná sila  $F_{ci}$  sa vyjadri na základe mernej reznej sily  $k_{ci}$  a prierezu triesky  $A_{Di}$ :

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad [12]$$

Merná rezná sila  $k_{ci}$  sa vyjadri pomocou vzťahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{f_z \cdot \sin \varphi_i^{1-x}} \quad [13]$$

Po dosadení a úprave:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \quad [14]$$

Pri čelnom frézovaní sa rezná sila  $F_{ci}$  sa vyjadri obdobným postupom:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i$$

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i^{1-x}} \quad [15]$$

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin \kappa_r^{x-1} \cdot \sin^x \varphi_i$$

Pretože frézy sú v prevažnej väčšine viacbrité nástroje, je pri frézovaní vždy v zábere niekoľko zubov súčasne. Výsledné sily potom závisia na počte zubov v zábere a na okamžitej polohe zubu frézy vzhľadom k obrobku. Z hľadiska potrebného krútiaceho momentu a výkonu na vretene frézy je potom dôležitá celková rezná sila  $F_c$ , ktorá sa pre valcové frézovanie vypočíta podľa vzťahu:

$$F_{ci} = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad [16]$$

Pre čelné frézovanie:

$$F_{ci} = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f^x \cdot \sin^{x-1} \cdot \kappa \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad [17]$$

Počet zubov v zábere sa pre valcové frézovanie vypočíta podľa vzťahu:

$$n_z = \frac{\varphi_{\max}}{360} \cdot z \quad [18]$$

Pre čelné frézovanie: (2)

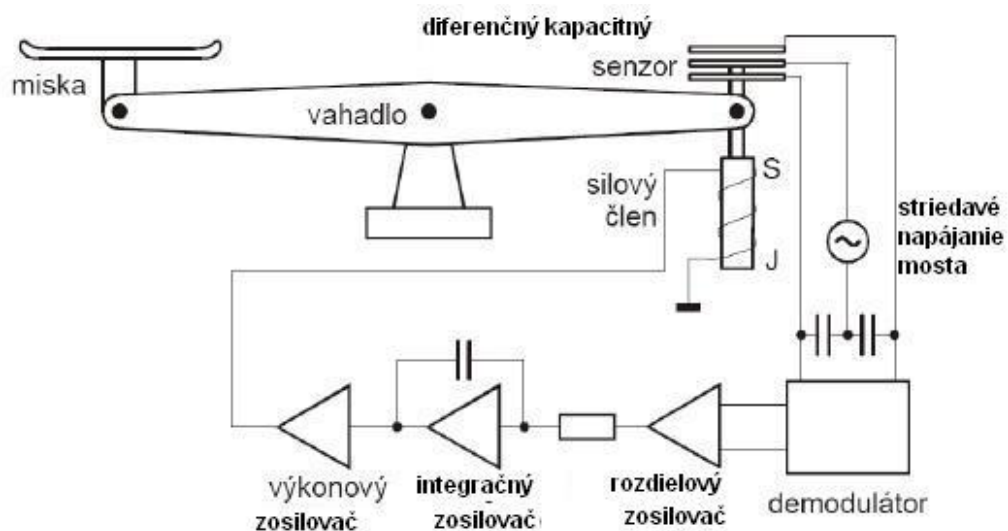
$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \quad [19]$$



## 2 EXPERIMENTÁLNE ZARIADENIE PRE MERANIE REZNÝCH SÍL

Sily (obecne) môžu byť merané niektorou z nasledujúcich základných metód:

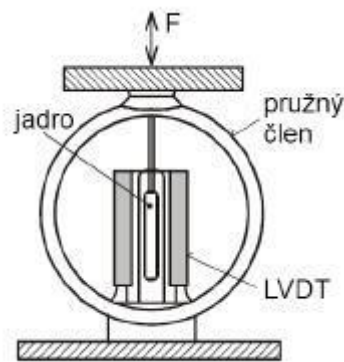
- vyváženie meranej sily známou gravitačnou silou, vyvedenou telesom so štandardnou hmotnosťou, buď priamo alebo sústavou pák, (Obr. 6.)
- meranie zrýchlenia telesa známej hmotnosti, na ktoré pôsobí meraná sila
- vyváženie meranej sily magnetickou silou, vyvedenou elektrickým prúdom, ktorý prechádza cievkou umiestnenou v magnetickom poli
- prevedenie sily na tlak kvapaliny (prípadne plynu) a následné meranie toho tlaku
- pôsobenie sily na pružné teleso a meranie deformácie tohto telesa
- pôsobenie sily na špeciálny kryštál a meranie elektrického náboja, ktorý vzniká pri deformácii kryštálu.



Obr. 6. Vyváženie meranej sily známou gravitačnou silou (16)

### 2.1 Indukčné snímače síl

Sú tvorené deformačným členom, ktorý zmenou svojho tvaru spôsobí posun jadra v dutine cievky. Pre rozsahy 10 N až  $10^6$  N sa používajú snímače v spojení s prstencovým pružným členom podľa obrázku. Sú to pasívne snímače. Ich presnosť je 1 až 3%. (17)



Obr. 7. Prstencový pružný člen (16)

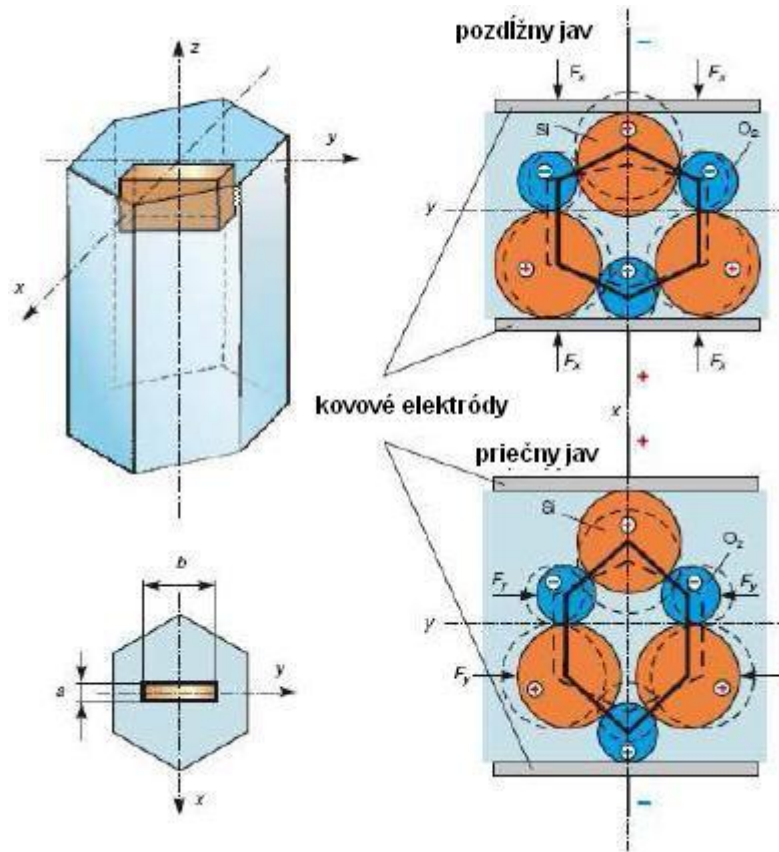
## 2.2 Kapacitné snímače síl

Pracujú na princípe zmeny kapacity vplyvom sily. Deformačný člen má väčšinou tvar dosky, ktorá zároveň tvorí jednu elektródu kondenzátoru. Pôsobením sily sa mení vzdialenosť medzi elektródami a tým aj kapacita kondenzátoru. Ich nevýhodou je pomerne malá zmena kapacity v závislosti na pôsobiacej sile a teda malý výstupný signál. Tieto snímače sú taktiež pasívne. (17)

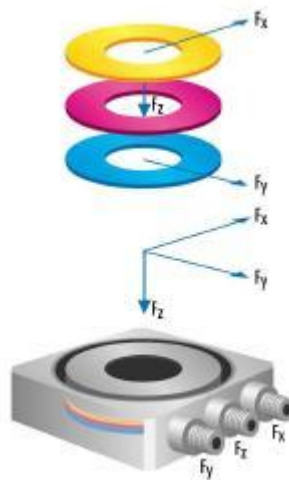
## 2.3 Piezoelektrické snímače síl

Fyzikálnou podstatou týchto snímačov je piezoelektrický jav spočívajúci v polarizácii niektorých kryštalických alebo aj polykryštalických dielektrík, ak sú podrobené mechanickému napätiu (priamy piezoelektrický jav), alebo v deformácii kryštálov pri pôsobení vonkajšieho elektrického pola (nepriamy piezoelektrický jav). V senzore na piezoelektrickom princípe pôsobí mechanické napätie buď kolmo na elektródy pre zber náboja (pozdĺžny jav), alebo rovnobežne s ich rovinou (priečny jav).

Piezoelektrický jav nastáva u kryštálov s istou štruktúrou kryštálovej mriežky (Obr.8.). O tom, či nastane či nenastane jav rozhoduje poloha stredu symetrie základnej bunky kryštálovej mriežky. Sú to aktívne snímače a používajú sa k meraniu časovo premenných síl. (16)



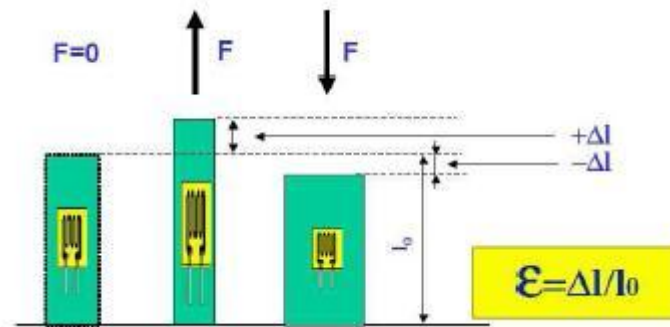
Obr. 8. Piezoelektrický jav u kryštálov kremeňa(18)



Obr. 9. Usporiadanie prstencov kryštálov (10)

## 2.4 Tenzometrické odporové snímače síl

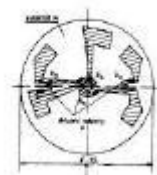
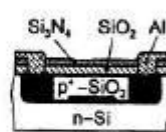
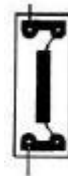
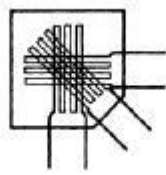
Pracujú na princípe pružnej deformácie meracieho člena pôsobiacou silou. Deformácia sa meria odporovými kovovými alebo polovodičovými tenzometrami. (17)



Obr. 10. Schéma tenzometrického snímání síl (19)

- kovové: drôtové, fóliové, vrstevné (Obr.11.)
- polovodičové: monokryštalické, polykryštalické (Obr.12.)

Rozsah meraných síl u týchto snímačov je 1 N až desaťtisíce N. U niektorých typov sa dosahuje presnosti až 0,04%.



Obr. 11 Polovodičové tenzometre (19)

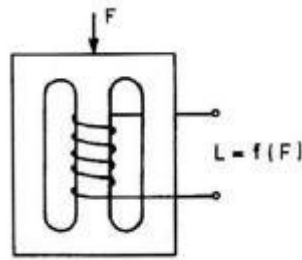
Obr. 12 Kovové tenzometre(19)

## 2.5 Magnetické snímače síl

Činnosť snímačov je založená na stanovení magnetických zmien magnetických veličín vyvolaných deformáciami feromagnetických materiálov usporiadaných v magnetických obvodoch, v ich dôsledku sa mení impedancia magnetického obvodu alebo vlastná či vzájomná indukčnosť cievok. Pre meranie sily sú najdôležitejšie princípy magnetoanizotropie a magnetostrikcie.

### Magnetostrikčné snímače

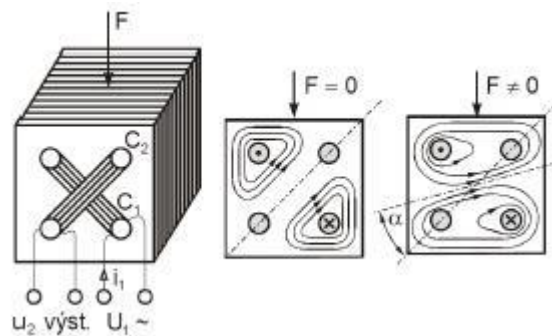
Využívajú javu, ktorý vplyvom deformácií vyvolaných vonkajšími silami (tlakom) mení permeabilitu feromagnetika a tým aj veľkosť indukovaného napätia do cievky.



Obr. 13 Magnetostrikčný snímač(10)

### Magnetoanizotropné snímače

Využíva sa deformácie magnetického pola pri deformácii feromagnetika. Snímač má dve vinutia, ktoré sú na seba kolmé. Pri pôsobení sily dôjde k anizotropnému rozloženiu permeability. Snímače sú vhodné pre veľké sily, rádovo MN.



Obr. 14. Magnetoanizotropný snímač(10)

Zariadenia, slúžiace pre meranie rezných síl sa obecné nazývajú dynamometre. Podľa princípu snímačov je možné dynamometre rozdeliť do niekoľkých skupín:

- mechanické
- pneumatické
- hydraulické
- elektrické (pre meranie statických síl sú reostatové)
- potenciometrické
- pre meranie dynamických síl (uhlíkové)
- indukčné
- kapacitné
- polovodičové

- tenzometrické (odporové)
- piezoelektrické

Pre meranie síl pri frézovaní sa používajú:

### **Mechanické dynamometre**

Ich hlavným konštrukčným prvkom je tzv. silomerný strmeň, ktorý sa pri zaťažení vonkajšou silou deformuje. Deformácia je snímaná meracím prístrojom pre meranie dĺžky (napr. číselníkovým úchylkomerom) a z jej veľkosti je na základe ciachovacích kriviek vypočítaná veľkosť zaťažujúcej sily. Medzi výhody patrí:

- jednoduchá konštrukcia (v prípade snímania sily iba v jednom smere, pri snímaní síl vo viacerých smeroch, býva konštrukcia zložitejšia)
- jednoduchá obsluha
- nízke obstarávacie náklady

Nevýhody:

- nízka tuhosť
- merací rozsah je obmedzený
- meranie je časovo náročné a najmä vyhodnocovanie jeho výsledkov
- nižšia presnosť merania

### **Piezoelektrické dynamometre**

Piezoelektrické dynamometre patria k najčastejšie používaným dynamometrom a to najmä z nasledujúcich dôvodov:

- veľmi široký rozsah meraných síl
- meranie síl v rôznych smeroch
- vysoká citlivosť
- takmer absolútna tuhosť
- malé rozmery a hmotnosť pri vysokých hodnotách zaťažujúcich síl a momentov
- vysoká reprodukovateľnosť meraní

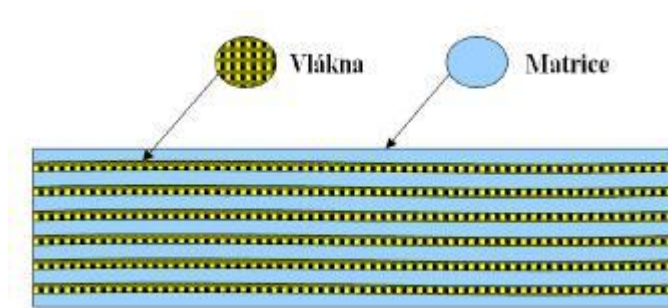
- lineárna závislosť vzniknutého napätia na zaťažujúcej sile
- jednoduchá obsluha
- možnosť riadenia cez počítač

Nevýhody:

- pokles napätia na kryštáli pri odbere prúdu meracím prístrojom (tzv. "ujíždění nuly")
- nutnosť použitia špeciálnych zosilovačov signálov z kryštálov
- vysoká cena zariadenia (10)

### 3 KOMPOZITNÉ MATERIÁLY

Slovo "kompozitný" znamená „vytvorený, či skladajúci sa z dvoch alebo viacerých odlišných častí“. Materiál, ktorý ma dve alebo viac odlišných zložiek, je možné za kompozitný považovať len v tom prípade, keď jednotlivé zložky majú rozdielne fyzikálne a mechanické vlastnosti, ktoré sú výrazne odlišné od vlastností výsledného kompozitu. Jednu zložku takýchto kompozitných materiálov tvorí matrica (pojivo), druhú rôznym priestorovým spôsobom usporiadané vystužujúce vlákna.



Obr. 15. Zloženie: matrica - vlákno(15)

#### Matrice

- polymerné
  - reaktoplasty ( PET- polyestery, EP- epoxidy, PIM- polyimidy, bismaleimidy)
  - termoplasty (PP- polypropylény, PA- polyamidy, napr. nylon, PEEK- polyéteréterketon, PC- polykarbonáty)
  - kaučuky (kordy)
- keramické (oxidy, nitridy, karbidy rôznych prvkov)
- kovové (najmä hliník a jeho zliatiny)

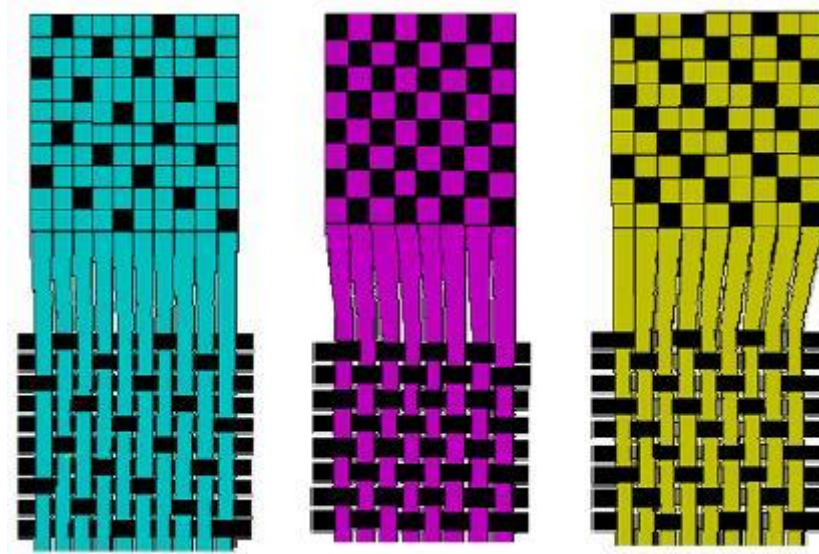
**Vystužujúce vlákna** (objem môže v niektorých prípadoch dosiahnuť podielu až 80%)

- prírodné (bavlna, sisal, juta, celulóza)
- anorganické (sklené, uhlíkové, kovové, bórové, SiC)
- organické (aramidy- kevlar, polyamidy, UHMWPE- polyetylén s ultra vysokou molekulovou hmotnosťou)



Podľa tvaru a priestorového usporiadania vystužujúcich vlákien je možné kompozity klasifikovať nasledujúcim spôsobom:

- **jednosmerné** (vlákna sú orientované prevažne v jednom smere)
  - krátkovláknové (pomer dĺžka/priemer je  $<100$ )
  - s dlhými vláknami (pomer dĺžka/priemer je  $>100$ , alebo je dĺžka vlákna totožná s dĺžkou dielca)
    - prepregy (nevytvrdnutou živicom preimpregnované vrstvy vlákien v tvare tenkých pásov rôznej šírky)
    - ťahané profily (tyčovina)
- **mnohosmerné** (vlákna sú náhodne alebo pravidelne orientované dvoma či viacerými smermi)
  - krátkovláknové
  - s dlhými vláknami
    - lamináty (striedanie vrstiev jednosmerných kompozitov s rovnakými alebo rôznymi vzájomnými orientáciami výstuže)
    - lamináty s tkanou výstužou (vlákna sú pred presýtením živicom utkané bežnými alebo špeciálnymi textilnými technológiami-Obr.16.)
    - lamináty s netkanou výstužou (vlákna sú spracované do rún bez toho aby boli tkané)
  - ťahané profily (komplikovanejšie tvary s kombináciou vystužujúcich vlákien)

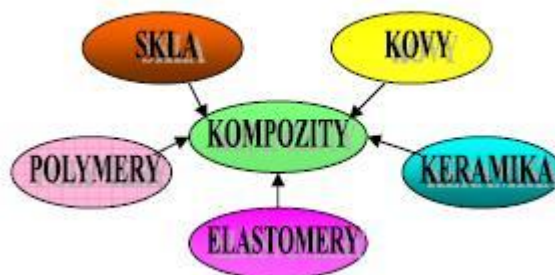


Obr. 16 Typy väzieb tkanín- saténová, plátňová, keprová(10)

Hlavnou prednosťou vystužených kompozitov je to, že sa v nich synergicky kombinujú vlastnosti matrice a vystužujúcich vlákien tak, že výsledný materiál má úplne unikátne vlastnosti, ktoré sú u samotných zložiek nedosiahnuteľné. Úlohou matrice je chrániť výstuž pred mechanickým poškodením, udržovať ju v danom tvare a umožniť prenos vonkajších napätí do výstuže.

Matrica kompozitov ma v porovnaní s vystužujúcou fázou nižšie pevnostné vlastnosti, väčšiu plasticitu a húževnatosť. Vystužujúca fáza má vysokú pevnosť a modul pružnosti.

Kompozitné materiály je možné do konečnej kompozitnej štruktúry kombinovať zo všetkých materiálových skupín- kovov, polymerov, keramiky, prípadne iných anorganických materiálov (Obr.17.). (1)



Obr. 17 Materiálové skupiny pre výrobu kompozitov(3)

### 3.1 Vlastnosti vláknových kompozitov

Vlastnosti kompozitov sú ovplyvňované predovšetkým vlastnosťami ich materiálových zložiek, ich distribúciou a interakciou medzi nimi. Pri popise kompozitov ako materiálového systému je potreba vedľa špecifikácie jednotlivých materiálových zložiek a ich vlastností špecifikovať tiež geometriu vystuženia, ktorá môže byť popísaná tvarom, koncentráciou a orientáciou.

Tvar jednotlivých častíc nespojitej fázy je možné často približne stotožniť s guľou alebo valcom. Sú niektoré prírodné materiály, ako slúda a íly a niektoré človekom vytvorené materiály, ako sklenené vločky, u ktorých je možné tvar ich častíc najlepšie charakterizovať ako hranoly s pravouhlým prierezom alebo doštičky. Veľkosť a distribúcia častíc riadi textúru materiálu. Spolu s objemovým podielom určujú tiež medzifázový povrch, ktorý má dôležitú úlohu pri určovaní rozsahu vzájomného pôsobenia medzi vystužením a matricou.

Koncentrácia sa obvykle udáva v objemovom alebo hmotnostnom podiele. Je obecné považovaná za jediný najdôležitejší parameter ovplyvňujúci vlastnosti kompozitov. Je tiež ľahko kontrolovateľnou výrobnou premennou, požívanou pre upravovanie vlastností kompozitov. Koncentračná distribúcia je mierou homogenity alebo rovnomernosti systému. Homogenita je dôležitou charakteristikou, ktorá určuje rozsah, v ktorom sa môže reprezentatívny objem materiálu líšiť vo fyzikálnych a mechanických vlastnostiach od priemerných vlastností materiálu. Nerovnomernosti by v systéme nemali byť pripustené, pretože zhoršujú tie vlastnosti, ktoré sú riadené najslabším článkom v materiály.

Orientácia vystuženia ovplyvňuje izotropiu systému. Ak majú vystužujúce častice tvar s približne rovnakými rozmermi vo všetkých smeroch (sú rovnoosé), chová sa kompozit v podstate ako izotropný materiál, ktorého vlastnosti sú nezávislé sa smere výstuhy. Keď nie sú rozmery reprezentatívnych vystužujúcich častíc rovnaké, môže sa kompozit tiež chovať ako izotropný materiál, za predpokladu že častice sú usporiadané náhodne, ako v náhodne orientovanom kompozite vystuženom krátkymi vláknami. V ostaných prípadoch môže výrobný proces (napr. odlievanie krátko vláknového kompozitu) spôsobiť rôznu orientáciu vystuženia a tým pádom anizotropiu. V kompozitoch vystužovaných spojitými vláknami, napr. v jednosmerných alebo vrstevných kompozitoch, môže byť anizotropia žiaduca. Skutočnosť, že potrebnú anizotropiu je možné dosiahnuť vhodným návrhom a výrobou, je základnou prednosťou týchto kompozitov.

Vlastnosti vláknových kompozitov závisia na rade faktorov, predovšetkým na:

- materiály matrice
- druhu vláknovej výstuže, dĺžke vlákien a ich orientácie v materiály
- objemovom množstve vláknovej výstuže
- kvalite medzifázového rozhrania medzi matricou a vláknami
- zbytkovom napätí a výrobných vadách

#### Materiály matrice

Pre matricu by mali byť volené materiály pokiaľ možno húževnaté a tvárne. Matrica prenáša vonkajšie zaťaženia na vlákna a obmedzuje šírenie trhlin z porušených (prasknutých) vlákien. Pevnejšie matrice potom prispievajú viac k celkovej pevnosti kompozitu.

#### Vlastnosti vlákien

Vystužujúce vlákna majú byť pevné, tuhé, ľahké, majú mať vysokú teplotu tavenia a vysokú hodnotu pomeru  $R_m/\rho$  (mernej pevnosti) a pomeru  $E/\rho$  (merného modulu pružnosti v ťahu). Pevnosť vlákien priamo ovplyvňuje pevnosť kompozitu. Najvyšší merný modul pevnosti v ťahu majú materiály s nízkym atómovým číslom a s kovalentnou väzbou medzi atómami, sú to napríklad bór a grafit. Majú tiež vysokú pevnosť a teplotu tavenia.

U vystužujúcich vlákien je pre spevnenie kompozitov dôležitá ich dĺžka, charakterizovaná tzv. aspektívnym pomerom, vyjadrujúcim pomer dĺžky vlákna ( $l$ ) k jeho priemeru ( $d$ )-  $l/d$ . Priebežné (dlhé, kontinuálne) vlákna s vysokou hodnotou  $l/d$  dávajú lepšie vlastnosti, výroba kompozitov je však často náročná, zvlášť ukladanie vlákien v matrici. Kompozity s krátkymi vláknami sa síce vyrábajú ľahšie, avšak ich vlastnosti sú čiastočne horšie.

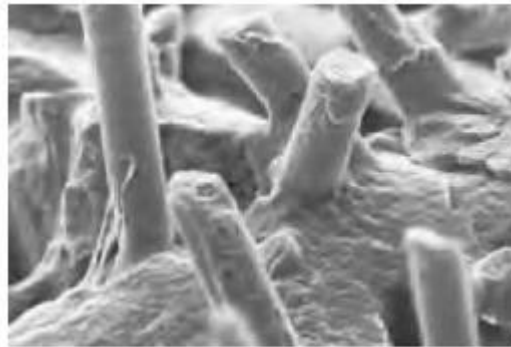
V kompozitoch nie je zaťaženie aplikované priamo na vlákna, ale na materiál matrice a z nej na vlákna prostredníctvom ich koncov. V prípade dlhých vlákien je vplyv koncov zanedbateľný, pretože napätie pozdĺž vlákien je možné považovať za konštantné. Oproti tomu u krátkych vlákien na ich koncoch dochádza ku koncentrácii napätia, ktoré je zdrojom vzniku porúch v týchto oblastiach, dochádza k oddeľovaniu koncov vlákien od matrice a v matrici vznikajú mikrotrhliny, ktoré sa šíria so vzrastajúcim napätím.

### Objemové množstvo vlákien

Významný vplyv na vlastnosti kompozitov má objemové množstvo vlákien. So zvyšujúcim sa množstvom vlákien vzrastá jeho pevnosť a tuhosť. Najväčší objemový podiel vlákien (asi 80%), je obmedzený požiadavkou, aby jednotlivé vlákna boli vzájomne dobre oddeľné materiálom matrice.

### Fázové rozhranie

Táto oblasť je zodpovedná za prenos zaťaženia z matrice na vlákna. Pevnosť kompozitov je teda hlavne určená kvalitou medzifázového rozhrania. Silná väzba medzi matricou a vláknami je tiež dôležitá z hľadiska vzniku a šírenia mikrotrhliniek pozdĺž vlákien. Pri dostatočne silných väzbách tieto porušenia nehrozia.



Obr. 18. Fázové rozhranie vlákno – matrica(13)

### Orientácia vlákien

Ďalším dôležitým parametrom je orientácia vlákien (Obr.19.) voči hlavnému smeru pôsobiaceho zaťaženia. Príspevok vlákien k vlastnostiam kompozitov je maximálny iba vtedy, ak sú vlákna rovnobežné so smerom zaťažovania. Ak nie sú rovnobežné, pevnosť a tuhosť kompozitu sa znižuje.



Obr. 19. Orietácie vlákien(13)

### Zvyškové napätia

Pevnosť a iné odozvy kompozitov na mechanické zaťaženie ovplyvňujú tiež zvyškové napätia, vznikajúce v zložkách na fázových rozhraniach v dôsledku výrobných procesov alebo napätí, vznikajúcich v okolí výrobných väd v kompozite. Zvyškové napätia bývajú spôsobené dvoma príčinami, rozdielom v teplotnej rozťažnosti zložiek kompozitov a rozdielom medzi výrobnou a prevádzkovou teplotou kompozitov. Výrobné vady (póry, dutiny, vruby) pôsobia v kompozite ako koncentrátoři napätia. Oboje pôsobia ako iniciačné centrá vzniku a rozvoja trhlín a následného porušenia. (3)

Všeobecne je možné základné fyzikálne mechanické vlastnosti vláknových kompozitov zhrnúť nasledovne:

- nízka merná hmotnosť
- vynikajúce mechanické vlastnosti
- flexibilita tvarov, povrchov, farieb
- vysoká rozmerová stálosť
- nekoroziivosť
- elektrická nevodivosť
- nízka tepelná vodivosť
- nulový útlm elektromagnetických vln
- ľahká montáž
- minimálna dlhodobá údržba

Nízka merná hmotnosť kompozitov predurčuje ich užitie nielen pri výrobe leteckej a kozmickej techniky, ale aj v konštrukciách pozemných dopravných prostriedkov všetkých typov (osobné i nákladné automobily, autobusy, trolejbusy, koľajové vozidlá, riečne i námorné plavidlá). Nižšia hmotnosť vozidiel i lodí, v ktorých konštrukcii sú vo veľkej miere použité ľahké kompozitné materiály, sa nutne prejaví vo výraznom znížení spotreby pohonných hmôt.

Odolnosť kompozitov proti korózii má veľký význam v stavebníctve, kde znamená predĺženie životnosti konštrukcií i vo veľmi agresívnych prostrediach a zníženie nákladov na ich údržbu na minimum. Navyše sa veľmi zefektívňuje montážny proces a otvárajú sa nové

možnosti pre zaujímavé a netradičné architektonické a technologické riešenia, pretože jednotlivé konštrukčné prvky je možné vyrobiť v ľubovoľnej farbe a v mnohých povrchových úpravách. Možnosť zostaviť celú konštrukciu z dopredu pripravených a na miesto stavby vcelku dopravených modulov výrazne zrýchľuje montáž konštrukcie.

Prakticky nulový útlm elektromagnetických vln znamená, že antény nadstavby na výškových budovách sú pre tieto vlny úplne priepustné a pritom poskytujú anténym systémom dokonalú ochranu proti vonkajšiemu prostrediu.

Nízka tepelná vodivosť výrazne uľahčuje zásah hasičov v prípade požiaru, pretože na rozdiel od oceľových konštrukcií nedochádza v dôsledku žiaru ku kolapsu konštrukcie a teplota so vzdialenosťou od ohniska požiaru veľmi rýchlo klesá. (1)

Tab. 1. Porovnanie vlastností vystužujúcich vlákien a konvenčných materiálov(3)

Materiál		Merná hmotnosť $\rho$ [g.cm <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti v ťahu E[GPa]	Medza pevnosti v ťahu R <sub>m</sub> [GPa]	Merný modul [E/ $\rho$ ]	Merná pevnosť [R <sub>m</sub> / $\rho$ ]
Vlákná	E-sklo	2,54	72,4	3,5 <sup>4)</sup>	28,5	1,38
	S-sklo	2,48	85,5	4,6 <sup>4)</sup>	34,5	1,85
	Grafit <sup>1)</sup>	1,9	390	2,1	205	1,11
	Grafit <sup>2)</sup>	1,9	240	2,5	126	1,32
	Bór	2,63	385	2,8	146	1,06
	Kremeň	2,19	72,4	5,8	33,1	2,65
	Wolfram	19,3	414	4,2	21,5	0,22
	Berylium	1,83	240	1,3	131	0,71
	Kevlar 49 <sup>3)</sup>	1,5	130	2,8	87	1,87
Konvenčné materiály	Oceľ	7,8	210	0,34-2,10	26,9	0,043- 0,269
	Al zliatiny	2,7	70	0,14-0,62	25,9	0,052- 0,230
	Sklo	2,5	70	0,7-2,1	28	0,280- 0,840
	Wolfram	19,3	350	1,1-4,1	18,1	0,057- 0,212
	Berylium	1,83	300	0,7	164	0,38

1) vysokomodulový; 2) s vysokou pevností v tahu; 3) aramidový polymér; 4) hodnoty panenskej pevnosti (hodnota skutočnej pevnosti pred zabudovaním do kompozitu jej 2,1GPa)

Elektrická nevodivosť robí z kompozitných profilov ideálne konštrukčné prvky pre výrobu zariadení používaných v blízkosti vedenia elektrickej energie (transformátory, rozvádzače, nosiče káblov a iné konštrukcie v rozvodových zariadeniach, montážne rebríky, manipulačné tyče, kryty).

V praxi je treba okrem výhod starostlivo zvážiť i prípadné nevýhody kompozitov. Sú to napríklad nižšie teploty použitia, vysoké materiálové a výrobné náklady, navlhosť, dostupnosť konkrétnych konštrukčných dát a komplikovaná alebo nedostatočná recyklácia.

(1)

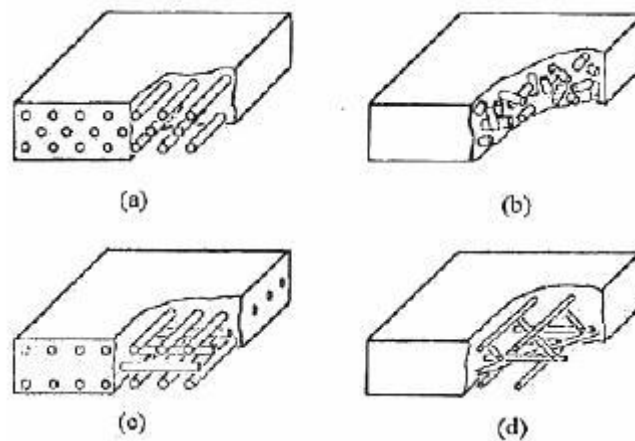
## 3.2 Zloženie kompozitov

### 3.2.1 Vystužujúce vlákna

Pre pevnosť kompozitov majú najväčšiu dôležitosť defekty vlákien, ktoré znižujú jeho pevnosť. Pevnosť vlákna rastie so zmenšujúcim sa prierezom, pretože prirodzené defekty sa tiež zmenšujú. Väčšina vyrábaných vlákien má kruhový prierez s priemerom od 5 $\mu$ m do 20 $\mu$ m. Vlákna majú preto v porovnaní s kompaktným materiálom omnoho väčšiu v smere dĺžky, pretože nečistoty sú v štruktúre vlákna minimalizované v dôsledku jeho malého prierezu.(5)

Z dôvodu malých prierezových rozmerov sa vlákna nemôžu používať v technických aplikáciách priamo. Vkladajú sa preto do matricových materiálov, aby vytvorili vláknové kompozity. V matrici môžu byť usporiadané rôznym spôsobom (Obr.20.) Matrica spája vlákna dohromady, slúži k prenosu namáhania do vlákien a chráni ich proti narušeniu okolím a poškodeniu pri spracovaní.





Obr. 20. Usporiadanie vlákien a) priebežné jednosmerne orientované vlákna, b) náhodne orientované krátke vlákna, c) ortogonálne (kolmé) vlákna, d) niekoľko vrstvé usporiadanie vlákien(8)

U zaťaženého kompozitného dielca je dôležité, aby predĺženie vystužujúcich vlákien bolo menšie, než predĺženie živicovej matrice a naopak ich tuhosť vyššia. Prenos napätia na rozhraní vlákno – matrice, ktorý je veľmi dôležitým faktorom z hľadiska únosnosti kompozitného dielca, je možné zlepšiť kalibrovaním vlákien a použitím špeciálnych spojovacích činidiel. Pre vystužovanie matric sa používa celá rada vlákien, ktoré sa líšia svojimi mechanickými vlastnosťami, spôsobom spracovania, rozsahom polotovarov z nich vyrobených a v cene. Najčastejšie využívanými vystužujúcimi vláknami sú sklenené vlákna, z ďalších je možné uviesť vysoko účinné organické i anorganické vlákna (Tab. 2.), prírodné vlákna a syntetické. Pokiaľ sú v živicovej matrici využité vystuženia z niekoľkých rôznych typov vlákien, jedná o tzv. hybridný kompozit.

Tab. 2. Vybrané vlastnosti niektorých vystužujúcich vlákien(9)

Vlákna	Hustota [g.cm <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti v ťahu [GPa]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Deformácia do lomu [%]
<b>Anorganické:</b>				
Azbest	2,56	160	3100	1,9
Sklo	2,54	70-85	2200-3500	2,5
Bórové vlákna	2,65	420	3500	0,8
SiC	2,60	250	2200	0,9

Uhlík	1,86	300-800	2700	0,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	3,2-3,9	300,414	1800-2000	0,3-0,8
<b>Organické:</b>				
Kevlar 49	1,45	130	2900	2,5
Kevlar 29	1,45	60	2700	5,0
Kevlar 129	1,44	120	3000	3,0
PE Spectra	0,97	172	3000	1,7

### Sklené vlákna

Sklené vlákna sú dominantnými vystužujúcimi vláknami preto, že majú vysokú pevnosť, vysokú tuhosť a najmä nízku cenu. Porovnanie sklenených vlákien s uhlíkovými, ktoré majú zo všetkých vystužujúcich materiálov výrazne najvyššiu tuhosť (modul pružnosti v ťahu  $E = 241 \text{ GPa}$ ) a ostatnými vláknami ukazuje ich výhody najmä v cene jednotlivých materiálov.

Sklené vlákna majú vysokú pevnosť v ťahu, kombinovanú s malými hodnotami pomerného predĺženia (3,5%), relatívne vysoký modul pružnosti a dobrú ohybovú pevnosť. Odolávajú pôsobeniu vysokých teplôt, majú nízku navlhavosť vodou, dobrú rozmerovú stabilitu a odolnosť voči pôsobeniu vonkajšieho prostredia. Najmä nízka navlhavosť umožňuje vyrábať výlisky s veľmi dobrými elektrickými vlastnosťami, ktoré sa nemenia ani za nepriaznivých poveternostných podmienok. (1)



Obr. 21 Sklené vlákno(11)

Väčšina sklenených vlákien sa vyrába z tzv. E-skla vyznačujúcim sa vysokým elektrickým odporom a dobrými tvárnymi vlastnosťami. Vlákna z E-skla majú slabú chemickú odolnosť proti kyselinám, alkáliam, dobre odolávajú vode a CaCl<sub>2</sub>. Vlákna sa vyrábajú ešte z tzv. A-skla používaného pre fľaše alebo okná, C-sklá, ktoré majú oproti E-sklu nižšiu

pevnosť, ale vyššiu odolnosť voči kyselinám, D-skla o nízkej dielektrickej konštante, ktoré je vyvinuté špeciálne pre radary, M-skla o vysokej pevnosti i výbornej odolnosti proti vode a kyselinám. Pre špeciálne účely sa vyrábajú aj iné sklá napr. L-sklo bohaté na oxid olova používané k ochrane proti radiačnému žiareniu. (5)

Tab. 3 Typické vlastnosti niektorých sklenených vlákien pri normálnej teplote(5)

Vlastnosť	E-sklo	A-sklo	C-sklo	D-sklo	M-sklo	S a R - sklo	Tave- ný kre- meň
Hustota $\rho$ [kg.dm <sup>-3</sup> ]	2,54	2,48	2,49	2,16	2,89	2,48	2,20
Teplota pri bode mäknutia [°C]	846	695- 720	750	770	-	970	1667
Modul pružnosti v ťahu [GPa]	72	74	-	54	112	88	75
Pevnosť v ťahu $R_m$ [MPa]	3500	3100	3200	2500	3500	4900	Nad 6000
Špecifické teplo [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	798	-	789	735	-	739	714

### Uhlíkové vlákna

V náročných technických aplikáciách patrí k najrozšírenejším vystužujúcim vláknám pre všetky typy matric. Veľkou prednosťou je kombinácia vysokej pevnosti, modulu pružnosti a tepelnej odolnosti s nízkou mernou hmotnosťou.

Uhlíkové vlákna sa z praktických dôvodov väčšinou delia podľa hodnôt modulu pružnosti a pevnosti. Vlákna získané pri teplote 900°C až 1500°C sú pevnejšie, nazývajú sa vysoko-pevnostné uhlíkové vlákna (označované HS=high strength). Ďalšou karbonizáciou HS vlákien pri teplote 2000°C až 2800°C sa získavajú vlákna grafitové, ktoré majú menšiu ťahovú pevnosť, sú drahšie než HS vlákna, ale majú vyšší modul pružnosti v ťahu (vysokomodulové vlákna HM= high modulus).(7)

Tab. 4. Vlastnosti uhlíkových vláken(10)

	Vysokopevnostné (HS)	Vysokomodulové (HM)
Hustota $\rho$ [kg.dm <sup>-3</sup> ]	1,79	1,8
Pevnosť v ťahu [MPa]	5400	2350
E-modul $R_m$ [GPa]	290	358
Ťažnosť [%]	1,7	0,6
Špec.el.odpor [ohm.cm <sup>-1</sup> ]	-	1x10E-3
Koef.tepl.roťažnosti [10E-6K]	-	-0,5
Tepelná vodivosť [W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	-	710

Medzi zaujímavé vlastnosti uhlíkových vláken ďalej patrí dobrá elektrická vodivosť a odolnosť proti únave. Dobre tlmí aj vibrácie. Ďalšia prednosť uhlíkových vláken je vysoká chemická odolnosť a predovšetkým nemennosť vlastností až do 2000°C, kedy vlákna z ostatných materiálov už svoje pôvodne výhodné vlastnosti úplne strácajú. Podmienkou je však ich ochrana proti oxidácii pri teplotách nad 500°C, čo musí zaistiť matrica kompozitu, ktorá v tomto prípade musí byť kovová. Súčasne vykazujú i nízky koeficient teplotnej rozťažnosti, tepelnú i elektrickú vodivosť. (5)

Kvalita a úroveň uhlíkových vláken neustále rastie a je možné očakávať ďalšie zlepšenia hodnôt pevnosti a tuhosti. Ich cena je však napr. v porovnaní so sklenenými vláknami desať až sto násobná.

### Aramidové vlákna

Sú synteticky vyrábané organické vlákna z aromatických polyamidov. Vlákna tohto typu boli prvýkrát predstavené na konci 60-tych rokov americkou firmou DuPont pod označením Kevlar. Ide o vysokomodulové vlákno, ktoré otvorilo nové konštrukčné možnosti, pretože kombinuje nízkumernú hmotnosť s vysokou pevnosťou v ťahu, vysokým E-modulom a nehorľavosťou. Má schopnosť tlmieť vibrácie nezávisle na použitej živici alebo orientácii vlákna, ktorá sa uplatňuje vo výrobe nepriestrelných viest alebo ochranných pancierov. Na

rozdiel od sklenených a uhlíkových vlákien sú aramidové vlákna citlivé na tlakové namáhanie a vlhkosť.

Veľké množstvo aplikácií sa pre aramidové vlákna otvorili v leteckom a kozmickom priemysle, pretože kompozitné dielce s aramidovou výstužou majú také vlastnosti, ktoré není možné zaistiť použitím žiadneho iného druhu vystužujúcich vlákien. Výrobcovia leteckej techniky ich využívajú najmä z dôvodu ich vysokej húževnatosti a odolnosti voči rázom a abrazívnemu opotrebeniu.

Aramidové výstuže sú bežne dodávané vo forme tkaných látok, úpletov, pruhov a prešívajúcich výrobkov. Ako matricu je možné pri výrobe vlákien použiť väčšinu komerčných živíc aj keď je zmáčavosť aramidových vlákien horšia než u sklenených alebo uhlíkových vlákien. Obrábanie bežne používanými reznými nástrojmi aramidových laminátov je obtiažne, pretože vlákna sú veľmi húževnaté. Vodným lúčom a laserom je možné aramidové kompozity obrábať bez väčších ťažkostí.(10)

Tab. 5. Vlastnosti komerčne vyrábaných PPA vlákien(20)

	<b>Kevlar 29</b>	<b>Kevlar 49</b>	<b>Kevlar 149</b>
Hustota [g.cm <sup>3</sup> ]	1,44	1,44	1,47
Pevnosť v ťahu [MPa]	2,8	2,8	2,8
Modul pružnosti [GPa]	62	124	186
Predĺženie [%]	3,5	2,5	1,9
Koeficient tepelnej rozťažnosti [10 <sup>-6</sup> °C]			
0-100°C	-	-2	-
100-200°C	-	-4,1	-
200-250°C	-	-5,3	-

### **Stručné porovnanie aramidových, uhlíkových a sklom vystužených kompozitov**

Vlastnosti najdôležitejších vystužujúcich vlákien sa líšia navzájom, ale značne tiež v závislosti na vlastnostiach matrice, v ktorej sú vlákna zabudované. Okrem anizotropie mechanických vlastností sú to predovšetkým hodnoty súčiniteľov teplotnej rozťažnosti, kde sú

rozdiely veľmi výrazné. U všetkých matric sú hodnoty súčiniteľov teplotnej rozťažnosti kladné s veľkosťou približne  $100 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , zatiaľ čo u sklenených vlákien je táto hodnota  $5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  a u aramidových, prípadne uhlíkových vlákien v pozdĺžnom smere sú hodnoty súčiniteľa rozťažnosti dokonca záporné ( $-2 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , prípadne  $-1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ). To umožňuje aplikáciu dielov s veľkou rozmerovou stálosťou pri striedavých teplotách.

Chemická odolnosť kompozitov je závislá vo väčšine prípadov na odolnosti matrice, v ktorej sú vlákna zabudované. Fázové rozhrania i samotné vlákna môžu byť však silno poškodené prenikajúcimi agresívnymi médiami. Uhlíkové vlákna sú v tomto prípade interne, zatiaľ čo sklenené a aramidové vlákna vykazujú v kyslom alkalickom prostredí pokles pevnosti. Uhlíkové vlákna sú elektricky vodivé, sklenené a aramidové vykazujú veľký elektrický odpor. (21)

Tab. 6. Všeobecné porovnanie niektorých vlastností kompozitov(21)

Vlastnosti	Kompozity		
	Vystužené sklom	aramidové	Uhlíkové
Hustota $\rho$	+-	++	+
Medza pevnosti v ťahu	+	+	+
E-modul	-	+	++
Medza pevnosti v tlaku	+	-	+
Rázová húževnatosť	+	+	-
Tlmenie	-	+	-
Chovanie pri statickom a dynamickom namáhaní	+	+	++
Dielektrické vlastnosti	++	++	-
Adhézia, príľnavosť	++	-	+
Nasiakavosť	+	-	+
Cena	++	+-	-

### 3.2.2 Matrice

Základnou funkciou matrice je prenos vonkajšieho zaťaženia na spevňujúcu fázu. Je požadovaná dobrá súdržnosť matrice s materiálom spevňujúcej fáze a často tiež nízka hmotnosť materiálu matrice. V porovnaní so spevňujúcou fázou má nižšie pevnostné vlastnosti

a väčšiu plasticitu. Spája jednotlivé častice spevňujúcej fáze, chráni pred vonkajšími vplyvmi a bráni rozvoju krehkého porušenia zloženého materiálu. (3)

Zásadným hľadiskom pre kvalitu kompozitu je zaistenie adhézie na fázovom rozhraní matrica-vlákno. Pre dosiahnutie lepšej fyzikálnej, prípadne chemickej väzby medzi vláknom a matricou sa naniesie na vlákno apretácia vhodná pre určitý druh matrice. Matrica musí mať vhodnú viskozitu a povrchové napätie aby vlákno zmočila úplne a bez bublín. (21)

### **Kovové matrice**

Najrozšírenejší z kovových matric je hliník a jeho zliatiny, horčík, titan a jeho zliatiny a niektoré zliatiny na báze niklu. Splňujú podmienky dobrej elektrickej vodivosti, tepelnej vodivosti, nehorlavosť, šmykovú pevnosť a tvárnosť (spomalujú mechanizmus rozvoja trhlin), odolnosť opotrebenia, vyššiu tepelnú odolnosť, možnosť povlakovania a spojovania.

### **Keramické matrice**

Sú významné pre použitie pri vysokých teplotách pre vynikajúcu pevnosť, odolnosť voči creepu a oxidácii. Keramické materiály majú obvykle dobrú chemickú odolnosť, malú tepelnú vodivosť a vysokú teplotu tavenia. Elektricky sú nevodivé. Hlavnou nevýhodou je ich značná krehkosť, neľahká obrobiteľnosť a veľká citlivosť na vnútorné defekty. Pre matricu sa väčšinou používajú oxidy, nitridy, karbidy rôznych prvkov, napr. mullit,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$ , sklo, aluminiumfosfát a grafit.

### **Polymérne matrice**

Majú najdlhšiu tradíciu (prvý patent v roku 1916) a pri výrobe kompozitov sa používajú najčastejšie. V porovnaní s kovmi majú polyméry nízku mernú hmotnosť, vysokú mernú pevnosť, sú odolné voči korózii, nevyžadujú povrchové úpravy, tlmia kmity, majú nízku tepelnú a elektrickú vodivosť. Podľa vlastností a výrobného postupu sa výrazne líšia podľa toho, či je polymér termoplast alebo reaktoplast (termoset). (10)

Pôvodne sa pre kompozity používali iba vystužené nenasýtené polyesterové (UP-R) alebo epoxidové (EP-R) živice. Tieto reaktívne živice tvoria dnes i väčšinu kompozitných aplikácií. Majú tú prednosť, že sú vo východiskovom stave nízkomolekulárne a väčšinou pri normálnej teplote v tekutom stave. Aj v prípade, že sú spracované vo forme taveniny, je ich viskozita nižšia než viskozita taveniny termoplastov. Viskozita reaktívnych liatych živíc sa

pohybuje pri teplote spracovania rádovo v stovkách mPa.s, zatiaľ čo u termoplastov dosahuje hodnôt  $10^3$  až  $10^5$  mPa.s. (Tab.7.)

Preto sa reaktoplasty ľahšie spracovávajú, ľahšie zmáčajú a lepšie presycujú vlákna. energetické nároky na presycovanie vlákien sú v porovnaní s termoplastami nižšie, pretože spracovanie prebieha pri podstatne nižších teplotách. Spracovateľské teploty termoplastov sú o mnoho vyššie a sú obmedzené teplotou rozkladu, ich viskozita pri spracovaní je v porovnaní s reaktoplastami sto až tisícnásobná.

Termosetické živice sa vytvrdzujú prídavkom katalyzátoru a urýchľovača, prípadne dodaním energie (teplo, žiarenie), tak získa kompozit svoje konečné vlastnosti. Tieto trojrozmerné zosieťované materiály dosahujú síce vysokých hodnôt pevnosti a tuhosti (E-modulu), ale sú často krehké a ich ťažnosť sa pohybuje v ráde percent. Zlepšenie húževnatosti je možné doceliť prídavkom modifikačných prísad.

Výhodou termoplastov oproti termosetom je práve ich húževnatosť. Len minimum termoplastových kompozitov dosahuje obdobných hodnôt E-modulu, tepelnej odolnosti a odolnosti proti chemickým vplyvom ako termosety. Výhodou termoplastov je, že v priebehu ich spracovania prebieha iba roztavenie a stuhnutie matrice a nie chemický proces, ktorý by ovplyvnil akosť výrobku alebo narušoval životné prostredie. Termoplast presycuje vlákna v roztavenej fáze, čo je vzhľadom k rádovo vyššej viskozite problematickejší proces než u termosetických živíc. Preto sú potrebné zariadenia, ktoré urýchľujú presycovanie pôsobením vonkajších síl. Toto presycovanie neprebieha, na rozdiel od reaktívnych živíc spracovávaných v kvapalnom stave, priamo u výrobcu, ale samostatnom výrobnom postupe, podobne ako u prepregov. (21)

*Tab. 7. Porovnanie viskozít termoplastových tavenín a kvapalných reaktívnych živíc pri typických spracovateľských teplotách(21)*

<b>Matrica</b>	<b>Teplota spracovania</b>	<b>Viskozita pri teplote spracovania</b>
Nevystužená nenasýtená polyesterová živica (UP-R) vytvrdzovaná za studena	10 až 40°C	stovky mPa.s
Nenasýtená polyesterová živica (UP-R) vytvrdzovaná za tepla	≈140°C	≈ 1000mPa.s
Nevystužená epoxidová živica (EP-R) vytvrdzovaná za tepla	napr.130°C	Stovky mPa.s



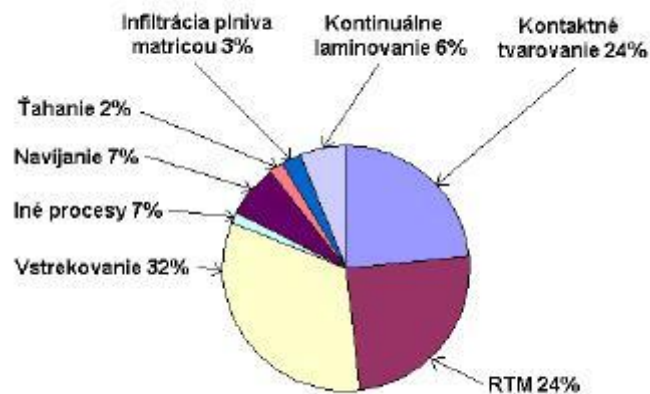
Polypropylén (PP)	200 až 270°C	10 <sup>3</sup> Pa.s
Polyéteréterketon (PEEK)	≈350 až 400°C	10 <sup>3</sup> až 10 <sup>4</sup> Pa.s

Tab. 8 Vlastnosti najčastejšie používaných organických matric(10)

Matrica	Hustota [g.cm <sup>3</sup> ]	Modul pružnos- ti [GPa]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Deformácia [%]
<b>Reaktoplasty</b>	1,10-1,67	1,3-6,0	20-180	1-30
Epoxidy	1,1-1,4	2,1-6,0	35-90	1-10
Polyestery	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	1-5
Fenoly	1,3	4,4	50-60	1-3
Polyamidy	1,2-1,9	3,0-3,1	80-190	2-40
<b>Termoplasty</b>	0,9-1,45	1,0-4,0	20-250	5-150
PP	0,90	1,1-1,5	28-41	10-700
PA	1,42	2,8-3,4	76-83	60-300
PC	1,21	2,1-2,8	62-76	110-130
PEEK	1,31	3,8	70	50-150

### 3.3 Výroba vláknitých kompozitov

Vláknité polymérne kompozity sa vyrábajú viacerými technologickými postupmi (Obr.22.). Výber vhodnej technológie pre danú aplikáciu je podmienený predovšetkým požadovanými mechanicko-fyzikálnymi vlastnosťami. Rozhodujúcu úlohu pri rozširovaní aplikačných možností vláknitých kompozitov má okrem výberu vlákna a matrice obsah, orientácia a dĺžka vlákien (aspektívny pomer). Zatiaľ čo v prípade kompozitov s dlhými vláknami sú kompozity vyrábané prostredníctvom technológií ktoré umožňujú orientáciu, resp. priestorové usporiadanie vlákien, v kompozitoch s krátkymi vláknami je orientácia vlákien nežiaduca.

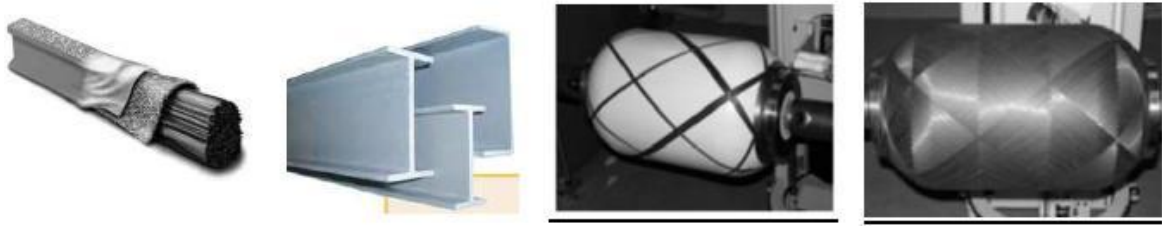


Obr. 22 Technologické postupy výroby vláknitých kompozitov(20)

Na výrobu kompozitov s dlhými vláknami sa takmer výhradne používajú reaktoplastické matrice a preto je vo väčšine prípadov výroba kompozitov súčasťou výroby finálneho výrobku.

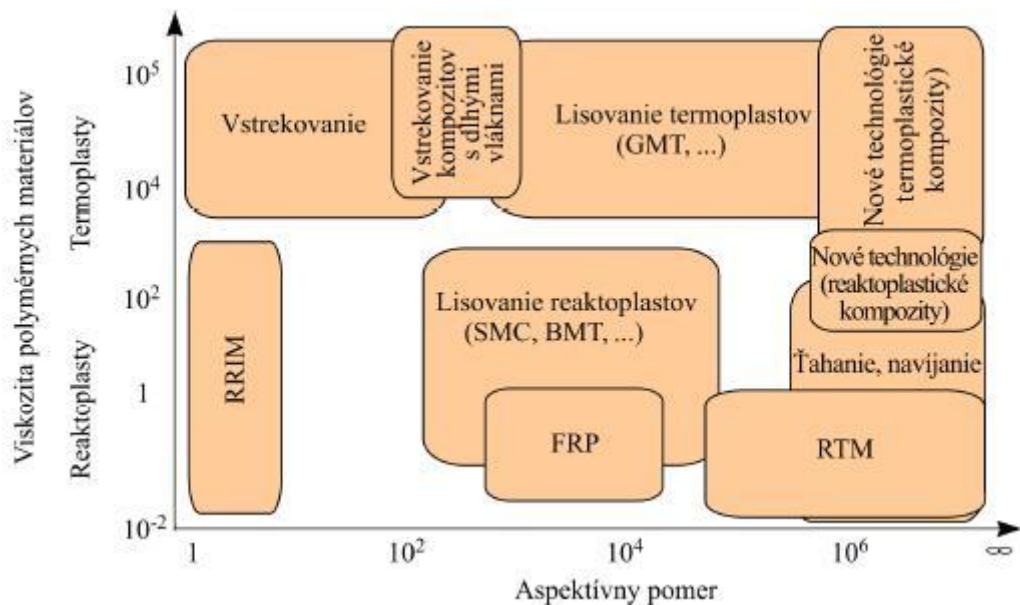
Najrozšírenejšie technologické postupy výroby vláknitých kompozitov s reaktoplastickou matricou sú:

- **Ručné** (kontaktné tvarovanie, kontinuálne tvarovanie, sprejovanie). Reaktoplastická matrica sa nanáša na orientované vlákna, resp. tkaniny. Výhodou je vysoký obsah vlákien a nízke náklady, medzi nevýhody patrí malá produktivita, prácnosť a obmedzené aplikačné možnosti (veľkoplošné výrobky).
- **Automatické** (vyťahovanie angl. pultrusion, navíjanie angl. filament winding, reaktívne vstrekovanie RRIM-reaction reinforced injection molding)
- **Vytlačanie** (angl. extrusion)
- **Vstrekovanie** (IM angl. injection molding)



Obr. 23 Polotovary a výrobky vláknitých kompozitov pripravených vyťahovaním a navíjaním(20)

Na výber technologického postupu výroby vláknitých kompozitov má rozhodujúci vplyv nielen dĺžka vlákien, ale aj viskozita polymérnej matrice (Obr.24.). Rozdiely medzi výrobnými postupmi na báze reaktoplastických a termoplastických kompozitov sa so zdokonaľovaním výrobných technológií postupne vyrovnávajú. V súčasnosti sú známe postupy, ktoré umožňujú prípravu vláknitých kompozitov s reaktoplastickými matricami tzv. reaktívnym vstrekaním (RRIM, angl. reaction reinforced injection molding). Na druhej strane technológie, ktoré sa v minulosti takmer výhradne požívali pre kompozity s reaktoplastickou matricou (lisovanie) sa postupne začínajú používať aj pre termoplastické kompozity.

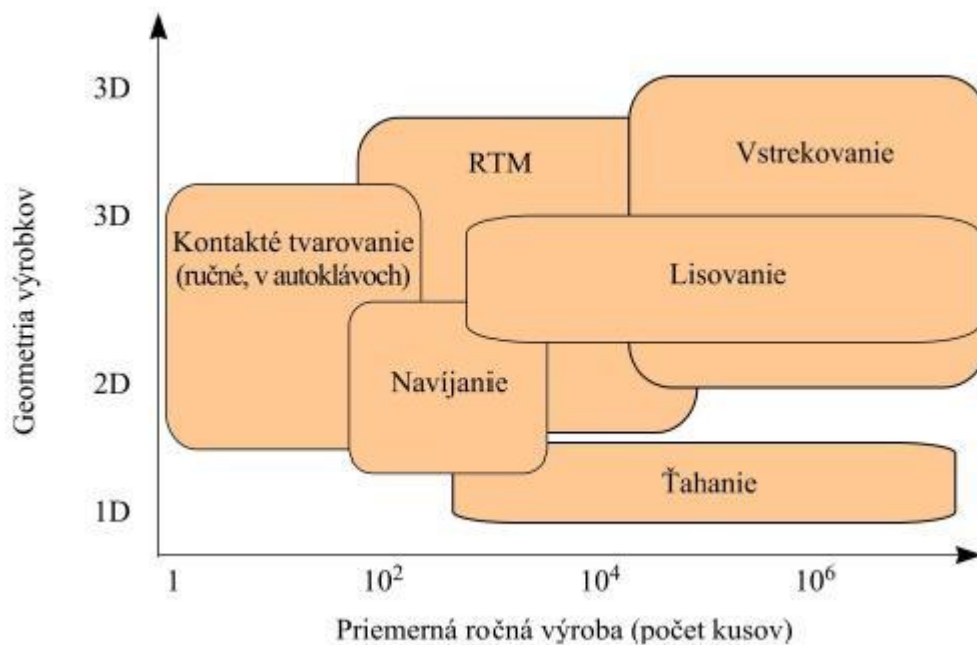


Obr. 24. Vplyv aspektívneho pomeru na výber technologického postupu výroby vláknitých kompozitov(20)

Medzi výhody kompozitov pripravených ťahaním (pultrúziou) patrí vysoký obsah vlákien a vysoká produktivita. Zvýšenie pevnosti výrobkov v smere kolmom na os vlákien sa do-

siahne použitím tkaním a fólií. Navíjanie je vhodný technologický postup na výrobu objemných nádrží.

Medzi najrozšírenejšie technologické postupy výroby vláknitých kompozitov s termoplastickou maticou patrí vytlačovanie a vstrekovanie. Výber spracovateľskej technológie je determinovaný predovšetkým požiadavkami na geometriu výrobku (1D,2D,3D, aspektívny pomer) a produktivitu. Ako je zrejmé z Obr.25, z hľadiska týchto kritérií je najefektívnejšie vstrekovanie.



Obr. 25. Závislosť produktivity výrobných technológií od geometrie výrobkov(20)

Pri výbere spracovateľskej technológie je potrebné dôsledne zvážiť všetky faktory, ktoré ovplyvňujú výsledné vlastnosti kompozitov. Technológie, pri ktorých sa používajú jednosmerne orientované vlákna (navíjanie, vyťahovanie) umožňujú pripraviť kompozity s vysokým obsahom vlákien a teda aj veľmi dobrými mechanickými vlastnosťami. Ich nedostatkom je však vysoká anizotropia vlastností. Porovnanie výrobných technológií z pohľadu výsledných aplikačných vlastností je uvedené v tabuľke 19. Najlepšie vlastnosti (najvyšší obsah vlákien), ale aj najvýraznejšiu anizotropiu vlastností (najvyšší orientačný faktor) majú kompozity pripravené navíjaním a vyťahovaním. Technológie, pri ktorých sa používajú plošne, alebo priestorovo orientované tkaniny vykazujú nižší stupeň anizotropie vlastností, majú však aj nižší obsah vlákien teda aj horšie mechanické vlastnosti. (20)

Tab. 9. Vplyv výrobných technológií a formy vlákien na maximálny obsah vlákien v kompozite(20)

Usporiadanie a forma vlákien	Výrobná technológia	Faktor orientácie vlákien	Maximálny obsah vlákien
<b>1D roving</b>	Navíjanie, ťahanie	1,00	0,80
<b>2D roving</b>	Infiltrácia	1,00	0,65
<b>Neorientovaný roving</b>	RTM	0,31	0,60
<b>2D rohož</b>	RTM	0,30	0,55
<b>2D tkané textilie</b>	RTM	0,27	0,50
<b>Pravouhlé 3D tkaniny</b>	RTM	0,30	0,40
<b>Neorientovaný 2D roving</b>	SMC,RTM	0,30	0,30
<b>3D krátke sekané vlákna</b>	BMC, vstrekovanie	0,12	0,20

Tab. 10. Medzinárodné označenia výrobných technológií vláknitých polymérnych kompozitov(20)

Označenie	Anglický názov	Charakterizácia výrobných technológií
<b>Prepreg</b>	Preimpregnated fibres	Polotovary, pozostávajúce z jednosmerne orientovaných kontinuálnych vlákien alebo tkanín predimpregnovaných nevytvrdenými reaktoplastami, medzi výhody patrí vysoký obsah vlákien (60-90%), nevýhodou je obmedzená skladovateľnosť, najčastejšie sa používajú pri lisovaní
<b>BMC</b>	Bulk moulding compound	Zmes reaktoplastických matric a krátkych vlákien používaná pri lisovaní za studena
<b>SMC</b>	Sheet moulding compound	Plošné materiály používané pri lisovaní pri zvýšených teplotách obsahujú vlákna, disperzné plnivá, polyesterové živice, styren, stužujúce prísady.
<b>LPMC</b>	Low pressure moulding compound	Zmes pre nízkotlakové lisovanie
<b>IM</b>	Injection moulding	Vstrekovanie zmesi termoplastickej matrice a krátkych vlákien (<10mm) na vstrekovacom zariadení
<b>RTM</b>	Resin transfer moulding	Beztlaková impregnácia vlákien reaktoplastickou matricou v uzatvorenej dvojdielnej forme
<b>RRIM</b>	Reinforced reaction injection mo-	Súčasné vstrekovanie zmesí reaktoplastov a krátkych vlákien do uzatvorenej formy

	uldung	
<b>SRIM</b>	Structural reaction injection moulding	Vstrekovanie reaktoplastickej matrice do formy obsahujúcej orientované vlákna alebo tkaniny.

### Zhrnutie teoretickej časti

V teoretickej časti práce som sa zameril na oblasť frézovania, vznikajúcich rezných síl a následne na problematiku merania rezných síl. Stručne som vyobrazil prehľad kompozitných materiálov, ich štruktúru a spôsoby výroby.

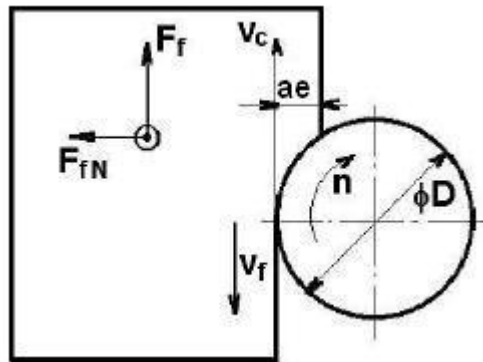
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT ZLOŽIEK REZNEJ SILY

### 4.1 Rezné podmienky

Experiment bol vykonávaný na vzorkách šiestich materiálov (kap. 4.2). Na materiáloch s označením A sa frézovalo 6 rezov rôznych širok (tab.11) a na materiáloch s označením B 4 rezy rôznych širok (tab.12).

Pri obrábaní vzorkov nesúsledným valcovým frézovaním boli použité nasledovné rezné podmienky.



Obr. 26 Rezné podmienky

- rezná rýchlosť  $v_c = 201 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$
- posuvová rýchlosť  $v_f = 1500 \text{ [mm/min]}$
- priemer nástroja  $D = 8 \text{ mm}$
- obrábanie bez chladenia
- vertikálna CNC frézka HWT C-442 od firmy AZK

Tab. 11 Parametre frézky

Otáčky vretena	2000-25000 ot/min
Programovateľná rýchlosť posuvu	Max. 3m/min
Programovateľný krok	0,00625mm
Maximálny upínací priemer nástroja	10mm
Veľkosť upínacej plochy	500mmx500mm-8mm T-drážky
Motor vretena	1000 W



Formát NC programov	ISO,APT, HGPL
---------------------	---------------

Tab. 12. Šírka rezov  $a_e$  (materiály A)

Šírka rezu $a_e$	Rezy					
	Rez 1	Rez 2	Rez 3	Rez 4	Rez 5	Rez 6
	10%D	20%D	30%D	40%D	50%D	60%D
	0,8mm	1,6mm	2,4mm	3,2mm	4mm	4,8mm

Tab. 13 Šírka rezov  $a_e$  (materiály B)

Šírka rezu $a_e$	Rezy			
	Rez 1	Rez 2	Rez 3	Rez 4
	20%D	30%D	40%D	50%D
	1,6mm	2,4mm	3,2mm	4mm

**CNC Program pre frézovanie materiálov A so šiestimi rezmi:**

N10 M06 D8 T1 Z0

N15 M03 S8000

N20 G00 X3.2 Y-10 Z1

N25 G00 X3.2 Y-10 Z-6

N30 G01 X3.2 Y100 Z-6 F1500

N40 G00 X4 Y100 Z1

N50 G00 X4 Y-10 Z1

N60 G00 X1.6 Y-10 Z-6

N70 G01 X1.6 Y100 Z-6 F1500

N80 G00 X4 Y100 Z1

N90 G00 X4 Y-10 Z1

N100 G00 X-0.8 Y-10 Z-6

N110 G01 X-0.8 Y100 Z-6 F1500

N120 G00 X4 Y100 Z1

N130 G00 X4 Y-10 Z1

N140 G00 X-4 Y-10 Z-6

N150 G01 X-4 Y100 Z-6 F1500

N160 G00 X4 Y100 Z1

N170 G00 X4 Y-10 Z1

N180 G00 X-8 Y-10 Z-6

N190 G01 X-8 Y100 Z-6 F1500

N200 G00 X4 Y100 Z1

N210 G00 X4 Y-10 Z1

N220 G00 X-12.8 Y-10 Z-6

N230 G01 X-12.8 Y100 Z-6 F1500

N240 G00 X4 Y100 Z1

N250 G00 X4 Y-10 Z1

N260 M03

**CNC Program pre frézovanie materiálov B so štyrmi rezmi:**

N10 M06 D8 T1 Z0

N15 M03 S8000

N20 G00 X2.4 Y-10 Z1

N25 G00 X2.4 Y-10 Z-18

N30 G01 X2.4 Y50 Z-18 F1500

N40 G00 X4 Y50 Z1

N50 G00 X4 Y-10 Z1

N60 G00 X0 Y-10 Z-18

N70 G01 X0 Y50 Z-18 F1500

N80 G00 X4 Y50 Z1

N90 G00 X4 Y-10 Z1

N100 G00 X-3.2 Y-10 Z-18

N110 G01 X-3.2 Y50 Z-18 F1500

N120 G00 X4 Y50 Z1

N130 G00 X4 Y-10 Z1

N140 G00 X-7.2 Y-10 Z-18

N150 G01 X-7.2 Y50 Z-18 F1500

N240 G00 X4 Y50 Z1

N250 G00 X4 Y-10 Z1

N260 M03

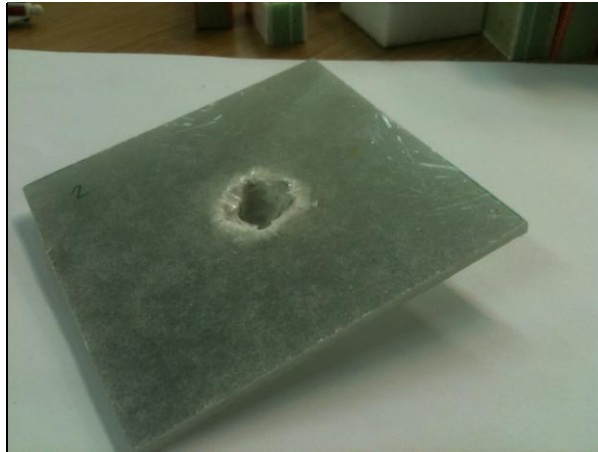
## 4.2 Charakteristika použitých materiálů

Ako vzorky pre experiment boli použité 2 druhy materiálov. Jedným boli vláknovo vystužené kompozity s matricou z polyesterovej živice (materiály A, tab.13) a druhým boli dosky so sklenenými vláknami a PET penou (materiály B, tab.14).

### Materiály A

Tab. 14 Popis materiálov A

Mat.	Popis/výroba
A1	Polyesterová živica, 6x sklená rohož (220g/m <sup>2</sup> ) Ručné laminovanie, vytvrdenie pri izbovej teplote
A2	Polyesterová živica, 6x sklená rohož (220g/m <sup>2</sup> ) Ručné laminovanie pod vákuovou fóliou
A3	Polyesterová živica, 4x sklená rohož (220g/m <sup>2</sup> ) + bidiagonálna sklená výstuž (980g/m <sup>2</sup> )



Obr. 27 Materiál A2

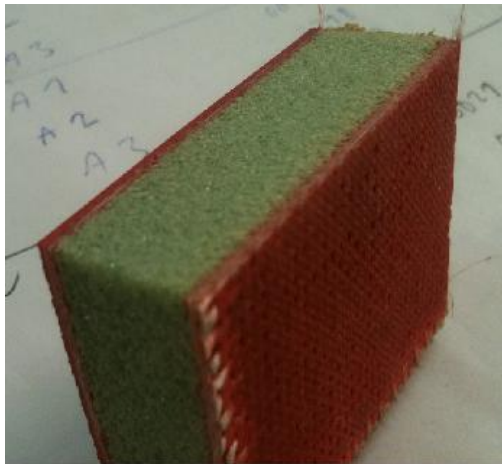
Tab. 15 Záznam z mechanickej skúšky materiálov A na padostroj

	A1	A2	A3
Teoretická nárazová rýchlosť [m/s]	2,938	2,938	2,938
Nominálna energia [J]	0	0	0
Menovitá energia [J]	99,96	99,96	99,96
Fmax [N]	9945,2	9201,98	13502,36
Def Fmax [mm]	4,53	4,58	5,51
Wm [J]	22,07	20,85	37,88
Vpoč. [m/s]	2,94	2,93	2,93
Vkonc. [m/s]	1,77	1,95	-0,59
Pokles rýchlosti [%]	39,84	33,41	120,03
Výška pádu [mm]	440	440	440
Ip [mm]	5,92	4,85	9,01
Fp [N]	4972,6	4600,99	6751,18
<b>Ep [J]</b>	<b>31,09</b>	<b>22,79</b>	<b>72,18</b>
<b>Wcelk. [J]</b>	<b>72,94</b>	<b>62,05</b>	<b>97,61</b>

**Materiály B**

Tab. 16 Popis materiálov B

<b>Materiál B1</b>	<b>Materiál B2</b>
rozmer 33×65x18	rozmer 33×65x21
gelcoat ortho RAL9010-0,5mm	gelcoat ortho RAL9010-0,5mm
5 sklenených tkanín AEROGLOSS 220 g/cm <sup>2</sup> -1,1mm	7 sklenených tkanín AEROGLOSS 220 g/cm <sup>2</sup> -1,5mm
PVC pena hrúbka 15 mm	PVC pena hrúbka 8 mm
6 sklenených tkanín AEROGLOSS 220 g/cm <sup>2</sup> -1,4mm	7 sklenených tkanín AEROGLOSS 220 g/cm <sup>2</sup> -1,5mm
odtrhová tkanina	PVC pena hrúbka 8 mm
živica orthoftalová AROPOL M105TB	7 sklenených tkanín AEROGLOSS 220 g/cm <sup>2</sup> -1,5mm
Tužidlo Butanox M-50 1,5 %	živica orthoftalová AROPOL M105TB
	Tužidlo Butanox M-50 1,5 %



Obr. 28 Materiál B1



Obr. 29 Materiál B2

**4.3 Použité nástroje**

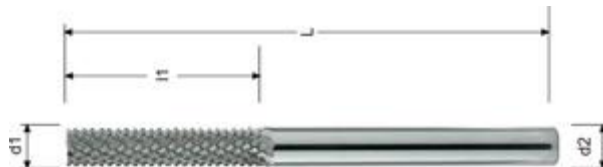
Pre frézovacie skúšky zamerané na sledovanie jednotlivých zložiek reznej sily boli použité nasledovné nástroje.

**Fréza č. 1**

Obr. 30 Fréza č.1 (22)

Tab. 17 Fréza č.1-Parametre

Výrobca/označenie	Nuova Cumet/5010.080
Priemer	8mm
Celková dĺžka/pracovná dĺžka	63mm/25mm
Norma	DIN6535-HA
Materiál	Spekaný karbid+diamantový povlak
Prevedenie	Vysoko výkonné krížové ozubenie pre obrábanie plastov zosilených vláknami pri hrubovaní.
Možné smery frézovania	

**Fréza č.2**

Obr. 31 Fréza č.2 (22)

Tab. 18 Fréza č.2 - Parametre

Výrobca/označenie	Nuova Cumet/5010.080
Priemer	8mm
Celková dĺžka/pracovná dĺžka	60mm/25mm
Norma	DIN6535-HA
Materiál	Spekaný karbid
Prevedenie	Pre obrábanie-GFK,CFK,grafit, hliník,meď
Možné smery frézovania	

**Fréza č.3**

Obr. 32 Fréza č. 3 (22)

Tab. 19 Fréza č.3 - Parametre

Výrobca/označenie	Nuova Cumet/400T.080
Priemer	8mm
Celková dĺžka/pracovná dĺžka	60mm/22mm
Norma	DIN6535-HA
Materiál	Spekaný karbid+povlak AlTiN
Prevedenie	Pre obrábanie-ocel<60HRC,liatina,titan,neželezné materiály
Možné smery frézovania	

**Fréza č.4**

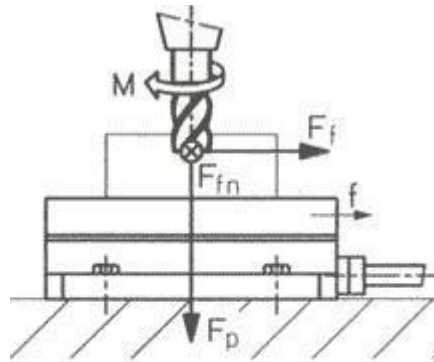
Obr. 33 Fréza č.4 (22)

Tab. 20 Fréza č.4 - Parametre

Výrobca/označenie	Nuova Cumet/700.080
Priemer	8mm
Celková dĺžka/pracovná dĺžka	60mm/25mm
Norma	DIN6535-HA
Materiál	Spekaný karbid
Prevedenie	Pre obrábanie-hliník<6%Si, plasty, mosadz
Možné smery frézovania	

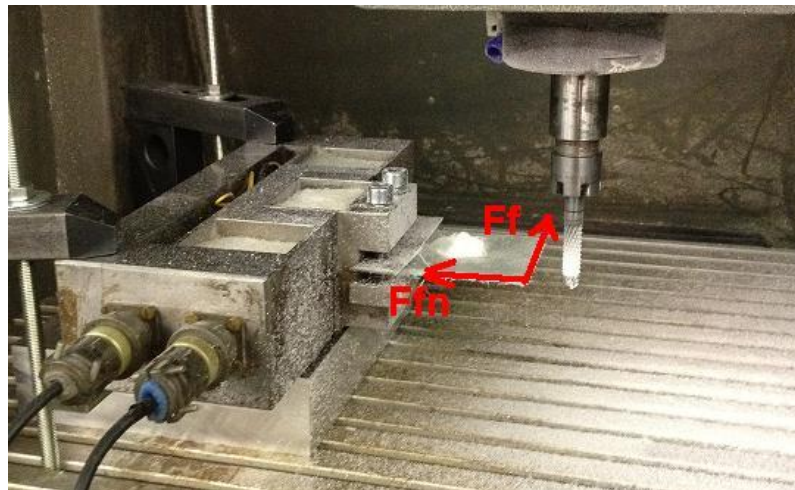
#### 4.4 Rozbor silového namáhania fréz

Pre meranie zložiek reznej sily pri frézovaní bol použitý 2 zložkový tenzometrický dynamometer s prevodníkom Spider 8.



$F_f$ -postvová zložka reznej sily (feed force)  
 $F_{fn}$ -kolmá zložka posuvovej sily (normal feed force)  
 $F_p$ -axiálna zložka reznej sily (passive force)

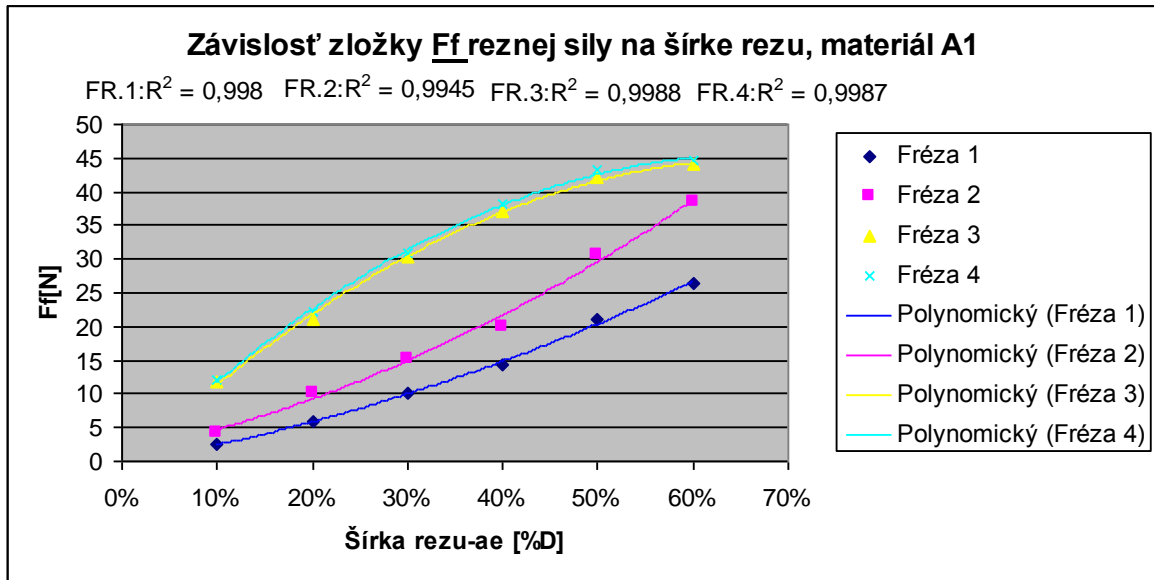
Obr. 34 Symbolika označovania zložiek rezných síl



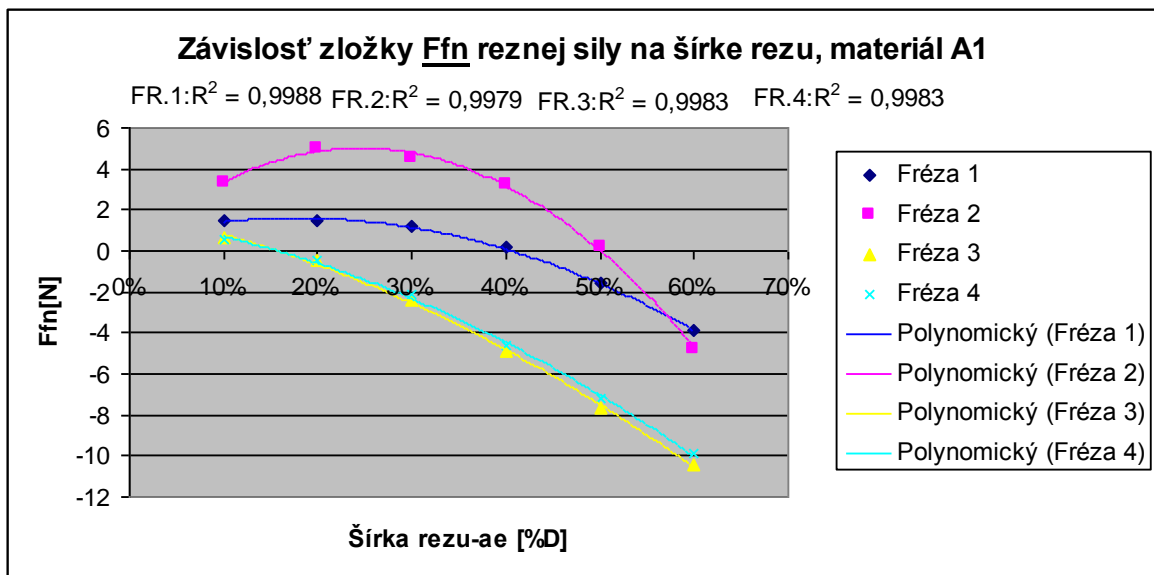
Obr. 35 Dynamometer s náčrtom zložiek rezných síl



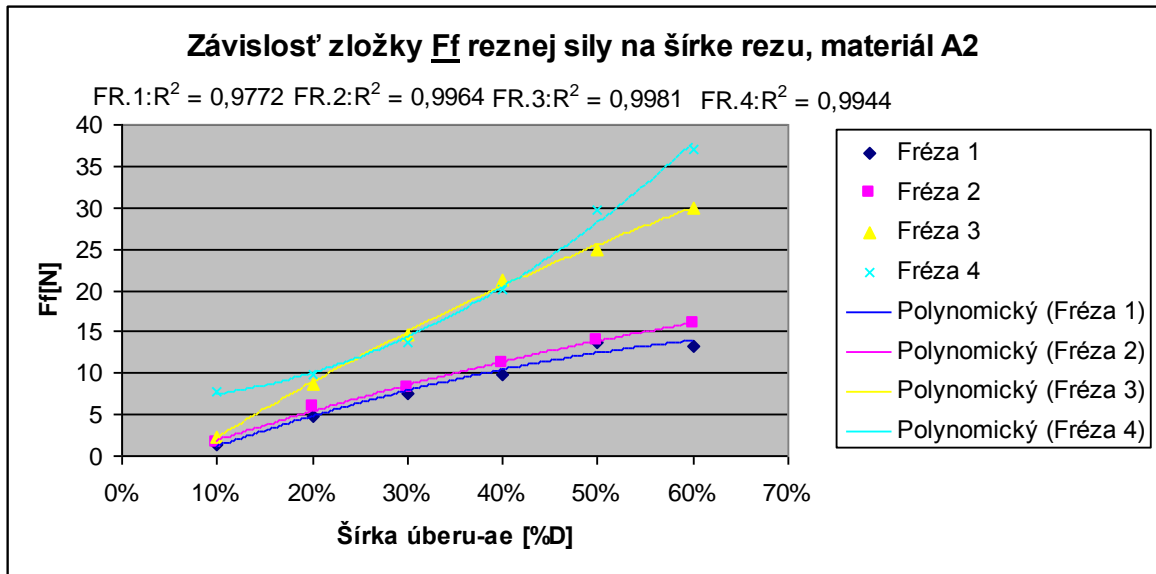
Jednotlivé zložky boli zo záznamu dynamometru vyhodnocované z vybranej oblasti časového priebehu a pomocou riadiaceho softwaru vypočítané pre každý záznam priemerné hodnoty  $F_{fN}$  a  $F_f$ . Tie boli následne spracované do grafov v závislosti na šírke rezu  $a_e$  pre každý materiál.



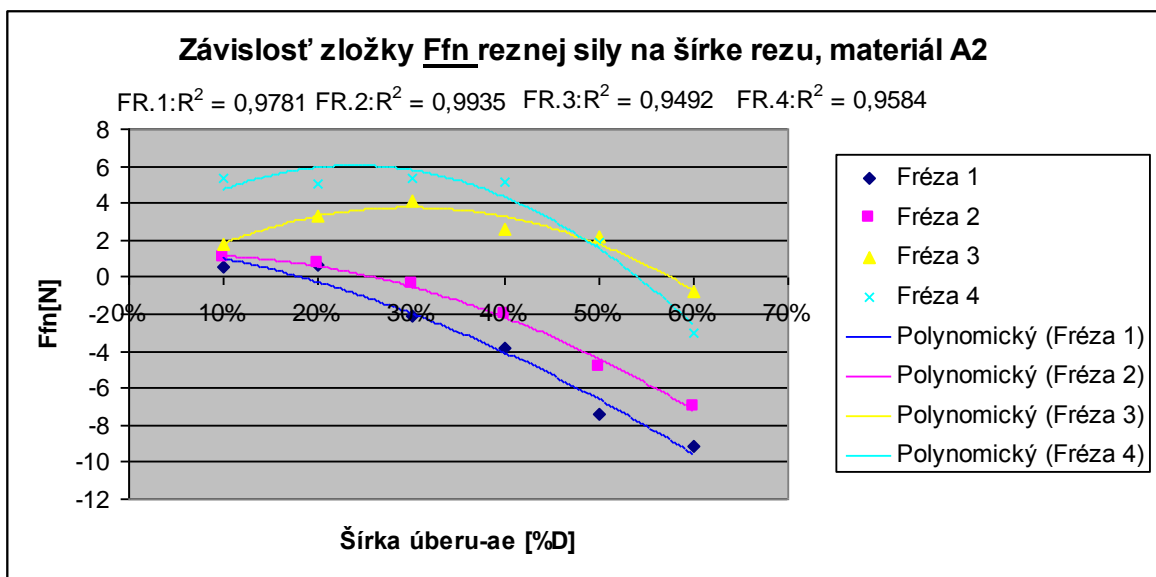
Obr. 36 Graf zložky  $F_f$  pre materiál A1



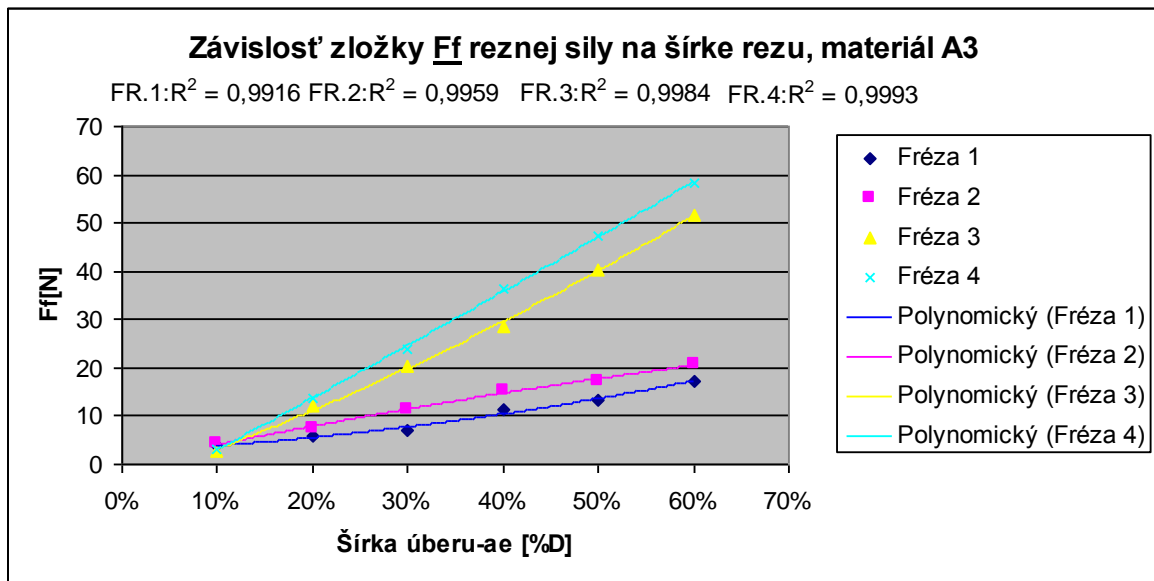
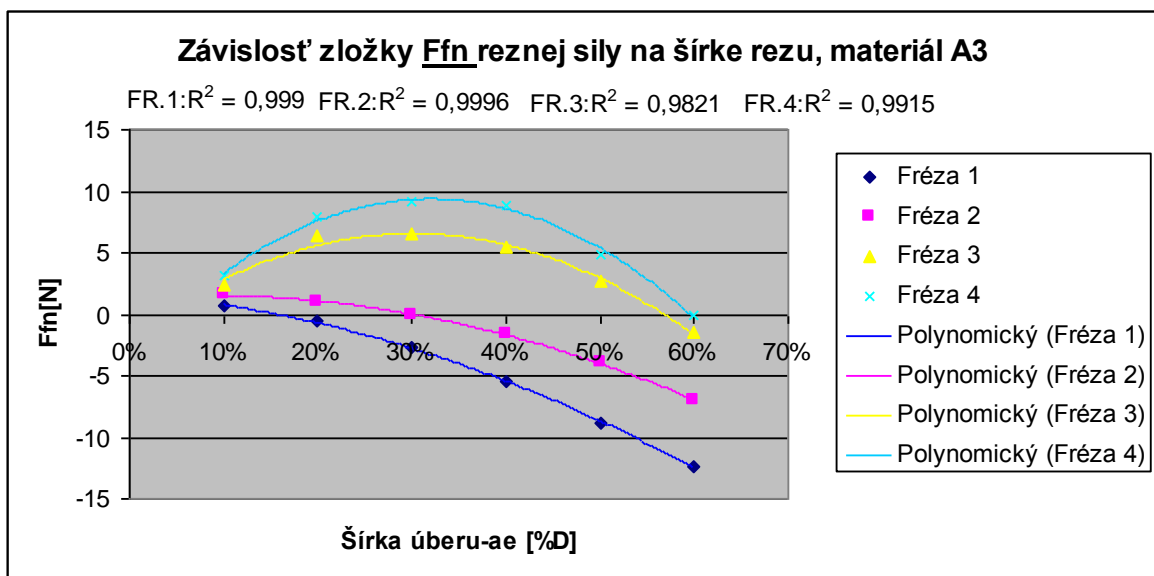
Obr. 37 Graf zložky  $F_{fn}$  pre materiál A1



Obr. 38 Graf zložky  $F_f$  pre materiál A2



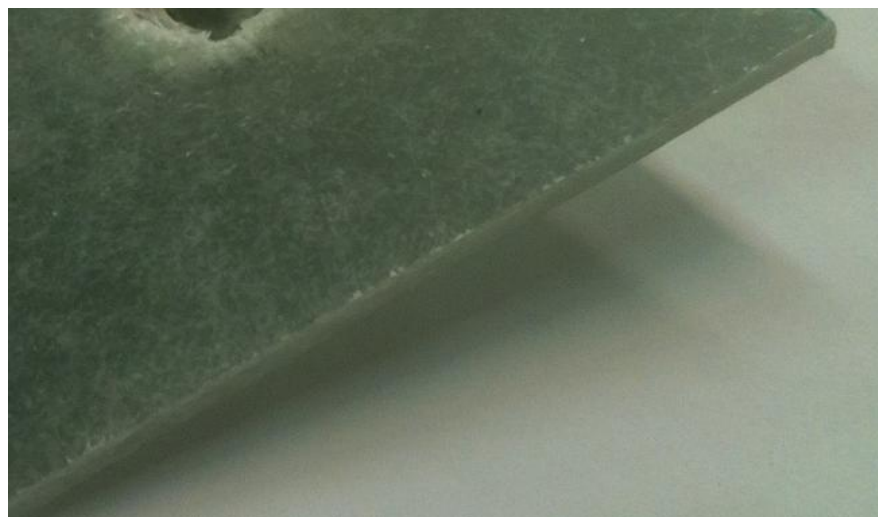
Obr. 39 Graf zložky  $F_{fn}$  pre materiál A2

Obr. 40 Graf zložky  $F_f$  pre materiál A3Obr. 41 Graf zložky  $F_{fn}$  pre materiál A3

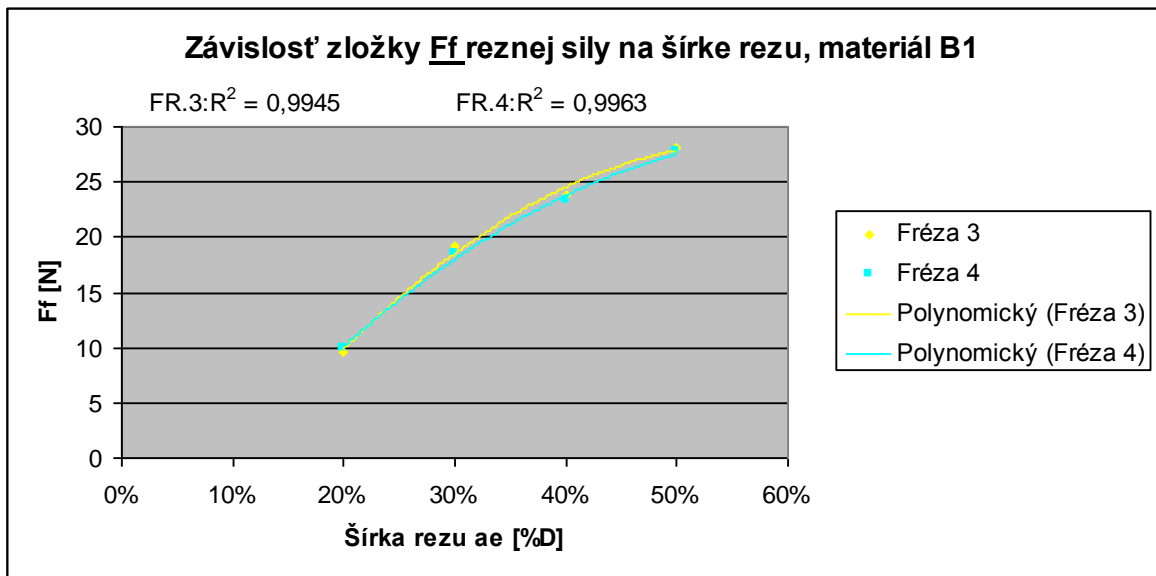
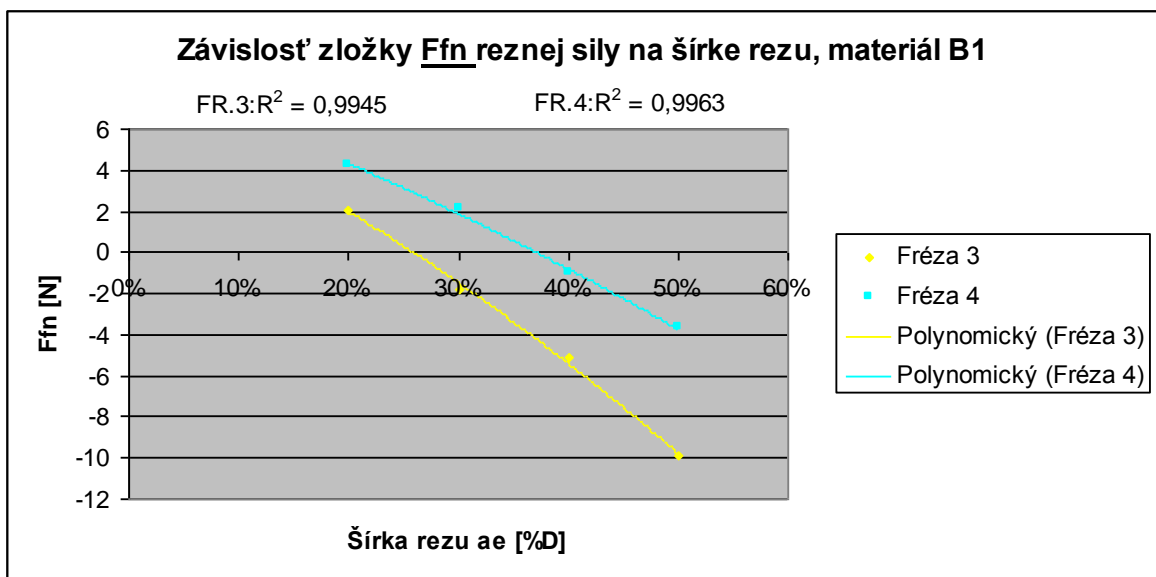
Z dôvodu nadmerných vibrácií pri použití fréz č. 3 a 4, ktoré znemožňovali obrábanie boli otáčky vretena frézky zvýšené na 12000 ot/min. Z grafov jej zrejme, že najnižšie zložky reznej sily pri frézovaní vykazovali frézy č.1 a 2, ktoré sú vďaka svojej špeciálnej geometrii doporučené pre obrábanie tohto typu materiálu. Ich konštrukcia zaisťuje elimináciu porušenia vrstiev materiálu a zlepšuje akosť povrchu na výstupe nástroja z obrobku. Pri experimente bol zjavný vplyv geometrie nástroja a počet zubov frézy na obrobený povrch.

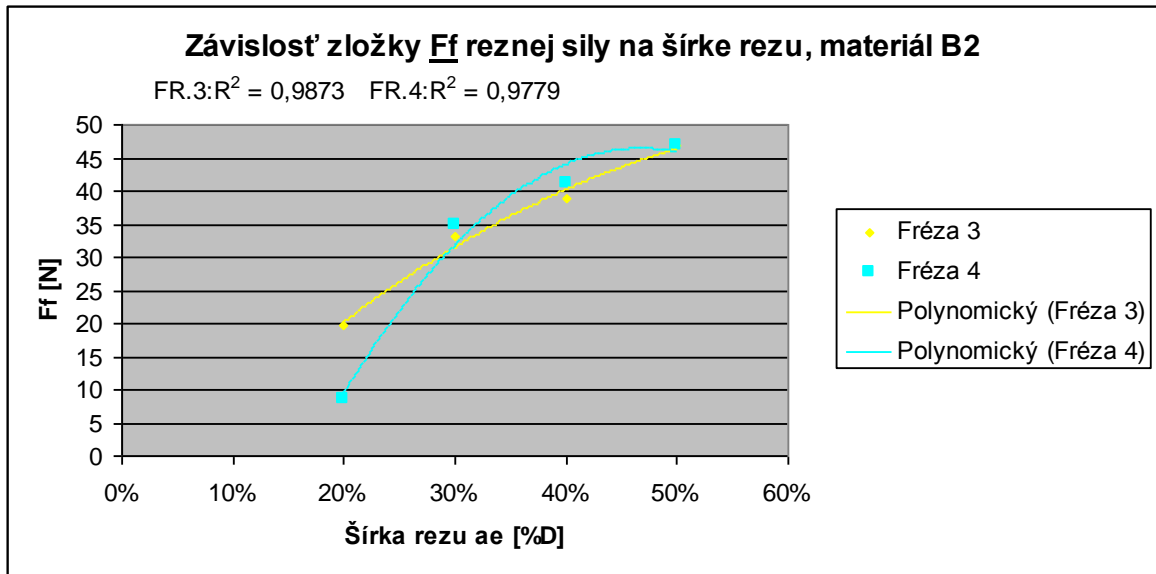


*Obr. 42 Obrobený povrch frézou č. 3 a 4, materiál A*

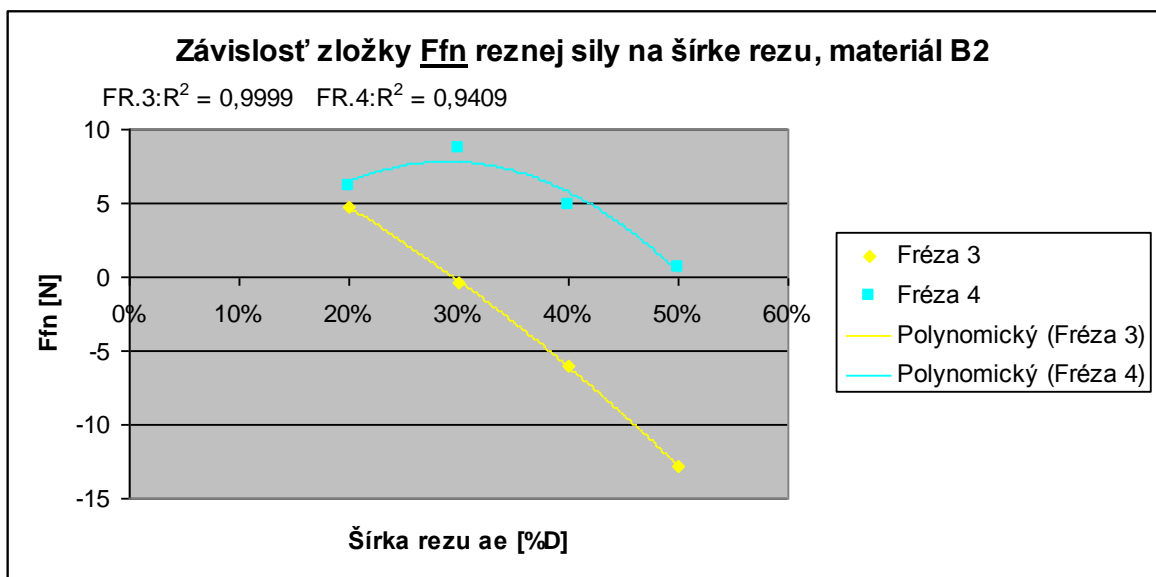


*Obr. 43 Obrobený povrch frézou č.1, materiál A*

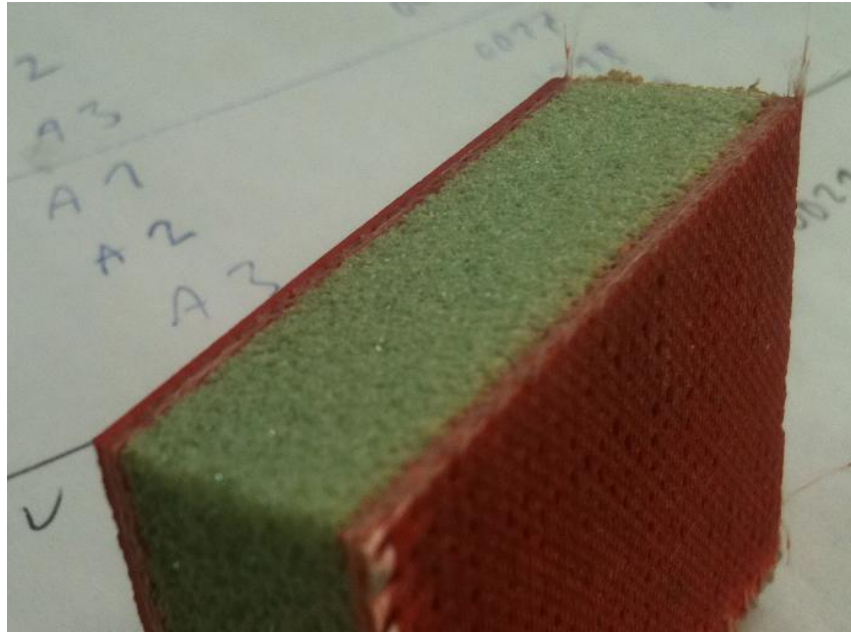
Obr. 44 Graf složky  $F_f$  pre materiál B1Obr. 45 Graf složky  $F_{fn}$  pre materiál B1



Obr. 46 Graf složky  $F_f$  pre materiál B2



Obr. 47 Graf složky  $F_{fn}$  pre materiál B2



*Obr. 48 Obrobený povrch frézou č.3, materiál B1*



*Obr. 49 Obrobený povrch frézou č.4, materiál B1*

Taktiež pri obrábaní materiálov B bol zjavný rozdiel kvality obrobeného povrchu podľa počtu zubov frézy. Fréza č. 4 s dvoma zubmi zanechala nerovnomerný povrch s vytrhanými časťami PET peny a neodrezanými vláknami výstuže.

## ZÁVER

Kompozitné materiály s matricou na bázy živice alebo polyméru patria do skupiny materiálov so špecifickými vlastnosťami, ktorých použitie spolu s požiadavkami na nástroje narastá. Obrábanie kompozitných materiálov je zložité a voľba vhodných rezných nástrojov si vyžaduje dôkladný postup. Vzájomnou kombináciou matrice a vystužujúcich vlákien je možné dosiahnuť rozdielných mechanických vlastností, ktoré je treba zohľadniť pri výbere vhodného rezného nástroja. Okrem samotného nástroja majú dôležitý vplyv na kvalitu obrobeneho povrchu aj rezné podmienky. Na zaistenie požadovaného rezu je nutné správne zvoliť parametre ako sú posuv a otáčky stroja. Ak nástroj nereže správne, dochádza k delaminácii alebo k lomu vlákien.

Frézovanie je menej frekventovanou obrábacou operáciou pre výrobu dielcov z vláknovo vystužených kompozitov. Sú ním vyrábané rovinné plochy, drážky a výrezy rôznych tvarov. Z nástrojov sú používané čelné, valcové, alebo špeciálne frézy. Trieska pri frézovaní kompozitov sa oddeľuje od obrábaného materiálu vo forme mikroskopických prachových častíc, ktoré sa vytvárajú z matrice aj z vystužujúcich vlákien.

V práci som sa presvedčil, že obrábanie vláknovo vystužených kompozitov je zložitou technologickou operáciou a voľba vhodných nástrojov a rezných podmienok si vyžaduje precízny a selektívny postup.

Z experimentu je zreteľné že vhodnejšie pre obrábanie tohto druhu materiálov sú viacbrité nástroje, ktoré vykazovali nižšie hodnoty zložiek rezných síl, ako aj omnoho lepšiu akosť obrobeneho povrchu. Pri obrábaní 4-britou frézou (fréza č.3) a 2-britou frézou (fréza č.4) vznikali veľké vibrácie, ktoré mali za následok väčšie hodnoty zložiek rezných síl a obrobeneý povrch bol veľmi nekvalitný. Dochádzalo tu k vytrhávaniu častíc (PET peny pri materiáloch B) a k nedokonalému rezu vlákien. Vlákna pôsobia na nástroj silným abrazívnym účinkom, to znamená, že pre dosiahnutie vyššej trvanlivosti nástroja je vhodné voliť nástroje s vysokou odolnosťou voči oteru (diamant). Počas môjho experimentu som neznamenal hmotnostný úbytok opotrebenia fréz.



**ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY**

- [1] HUMÁR, A. *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů*. 1.vyd. BRNO: VUTI-UM, 2004. 26s. ISBN 80-214-2740-X.
- [2] KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologické obrábění*. 1.vyd. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-1996-2.
- [3] MÍŠEK, B. *Kompozity*. 1. vyd. BRNO: Technický dozorčí spolek- Sekce materiálů a svařování, 2003. 81s. ISBN 80-80903386-0-7.
- [4] HUMÁR, A. *Technologie 1*. [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia v oboru "Strojírenská technologie" VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138s. URL:<<http://www.ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory>>.
- [5] MACHEK, V. *Nauka o materiálu*. 4.část, *Polymery a kompozity s polymerní matricí*. 1. vyd. PRAHA: Nakladatelství ČVUT, 2008. 86s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [6] MRÁZ, P.; TALÁČKO, J. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. 1. vyd. PRAHA: Nakladatelství ČVUT, 2006. 226 s. ISBN 80-01-03540-9.
- [7] BODNÁROVÁ, L. *Kompozitní materiály ve stavebnictví*. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 122 s. ISBN 80-214-2266-1.
- [8] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*. 1.vyd. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 392s. ISBN 80-7204-130-4.
- [9] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů* 1.vyd. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [10] MACHALOVA, Veronika. *Řezné síly při frézování vláknově vyztužených kompozitů*. BRNO, 2008. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav Strojírenské Technologie. Dostupný také z WWW:<[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6672](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6672)>
- [11] KOMPOZITY [online]. [cit.2012-02-12]. URL:<<http://www.quido.cz/objevy/kompozity.htm>>.
- [12] HUMÁR, A. *Vláknově vyztužené kompozity*. MM, 1999.68-70s. ISBN 1212-2572.

- [13] HAVEL-COMPOSITES, *Technologie*. [online]. [cit. 2012-02-12].  
URL:<<http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-technologie-jejich-popis-a-schemata.html>>.
- [14] KOŘÍNEK, Z, *Kompozity*. [online]. [cit.2012-02-13].  
URL:<<http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>>
- [15] MURPHY, J.: *The Reinforced Plastics Handbook*. Elsevier Science Ltd. Oxford, United Kingdom, Second Edition, 1998. 674 p. ISBN-1 85617 348 8.
- [16] ĎAĎO, S. *Senzory měřící obvody*. 2. vyd. PRAHA: Vydavatelství ČVUT, 1999. 315.s  
ISBN 80-01-02057-6.
- [17] *Měření sil, momentu, indikace okamžité polohy*. [online]. [cit.2012.02.09].  
URL:<[http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni\\_mechanika/MERENI\\_SIL.pdf](http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni_mechanika/MERENI_SIL.pdf)>
- [18] *Snímače tlaku*. [online]. [cit. 2012-02-18]. URL:  
<<http://odbornecasopisy.cz/download/automa/2007/au100723.pdf>>.
- [19] *Tenzometry HBM* [online]. [cit.2012-02-09].  
URL:<<http://www.hbm.cz/Aplikace/tenzometry.pdf>>.
- [20] LIPTÁKOVÁ, T.:*Polymérne technické materiály*. [online]. [cit. 2012-02-18]. URL:  
<[http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/10/polymerne\\_konstrukcne\\_materialy.pdf](http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/10/polymerne_konstrukcne_materialy.pdf)>.
- [21] EHRENSTEIN, G.:*Polymerní kompozitní materiály*. 1.vyd.PRAHA:Nakladatelství SCIENTA, 2009.351s.ISBN 978-80-86960-29-6.
- [22] Nuova Cumet [online]. [cit. 2012-05-10]. URL: <<http://nuovacumet.it>>

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

$v_c$	m/min	Rezná rýchlosť
$f_n$	mm/ot	Posuv na otáčku
$v_f$	m/min	Posuvová rýchlosť
$h_i$	mm	Menovitá hrúbka triesky
$f_z$	mm	Posuv na zub
$F_f$	N	Posuvová zložka reznej sily
$F_{f_n}$	N	Kolmá zložka posuvovej sily
$A_{d_i}$	mm	Menovitý prierez triesky
$b_i$	mm	Menovitá šírka triesky
$F_{c_i}$	N	Rezná sila
PET		polyestery
EP		Epoxidy
PIM		polyimidy
PP		Polypropylén
PA		Polyamid
PC		Polykarbonát
PEEK		Polyétereterketon
UP-R		Polyesterové živice
EP-R		Epoxidové živice
BMC		Bulk moulding compound
SMC		Sheet moulding compound
LPMC		Low pressure moulding compound
IM		Injection moulding
RTM		Resin transfer moulding

## ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1. Valcové frézovanie: a) nesúsledné, b) súsledné (4)</i> .....	11
<i>Obr. 2. Čelné frézovanie (4)</i> .....	11
<i>Obr. 3. Prierez triesky pri valcovom frézovaní (4)</i> .....	13
<i>Obr. 4. Prierez triesky pri čelnom frézovaní (4)</i> .....	13
<i>Obr. 5 Rezné sily na zube valcovej frézy v pracovnej rovine <math>P_{fe}</math> (4)</i> .....	15
<i>Obr. 6. Vyváženie meranej sily známou gravitačnou silou (16)</i> .....	17
<i>Obr. 7. Prstencový pružný člen (16)</i> .....	18
<i>Obr. 8. Piezoelektrický jav u kryštálov kremeňa(18)</i> .....	19
<i>Obr. 9. Usporiadanie prstencov kryštálov (10)</i> .....	19
<i>Obr. 10. Schéma tenzometrického snímania síl (19)</i> .....	20
<i>Obr. 11 Polovodičové tenzometre (19) Obr. 12 Kovové tenzometre(19)</i> .....	20
<i>Obr. 13 Magnetostrikčný snímač(10)</i> .....	21
<i>Obr. 14. Magnetoanizotropný snímač(10)</i> .....	21
<i>Obr. 15. Zloženie: matrica - vlákno(15)</i> .....	24
<i>Obr. 16 Typy väzieb tkanín- saténová, plátňová, keprová(10)</i> .....	26
<i>Obr. 17 Materiálové skupiny pre výrobu kompozitov(3)</i> .....	26
<i>Obr. 18. Fázové rozhranie vlákno – matrica(13)</i> .....	29
<i>Obr. 19. Orietácie vlákien(13)</i> .....	29
<i>Obr. 20. Usporiadanie vlákien a) priebežné jednosmerne orientované vlákna, b) náhodne orientované krátke vlákna, c) ortogonálne (kolmé) vlákna, d) niekoľko vrstvé usporiadanie vlákien(8)</i> .....	33
<i>Obr. 21 Sklené vlákno(11)</i> .....	34
<i>Obr. 22 Technologické postupy výroby vláknitých kompozitov(20)</i> .....	42
<i>Obr. 23 Polotovary a výrobky vláknitých kompozitov pripravených vyťahovaním a navíjaním(20)</i> .....	43
<i>Obr. 24. Vplyv aspektívneho pomeru na výber technologického postupu výroby vláknitých kompozitov(20)</i> .....	43
<i>Obr. 25. Závislosť produktivity výrobnnej technológie od geometrie výrobkov(20)</i> .....	44
<i>Obr. 26 Rezné podmienky</i> .....	48
<i>Obr. 27 Materiál A2</i> .....	52
<i>Obr. 28 Materiál B1</i> .....	
<i>Obr. 29 Materiál B2</i> .....	53

Obr. 30 Fréza č.1 (22) .....	54
Obr. 31 Fréza č.2 (22) .....	54
Obr. 32 Fréza č. 3 (22) .....	55
Obr. 33 Fréza č.4 (22) .....	55
Obr. 34 Symbolika označovania zložiek rezných síl .....	56
Obr. 35 Dynamometer s náčrtom zložiek rezných síl .....	56
Obr. 36 Graf zložky $F_f$ pre materiál A1 .....	57
Obr. 37 Graf zložky $F_{fn}$ pre materiál A1 .....	57
Obr. 38 Graf zložky $F_f$ pre materiál A2 .....	58
Obr. 39 Graf zložky $F_{fn}$ pre materiál A2 .....	58
Obr. 40 Graf zložky $F_f$ pre materiál A3 .....	59
Obr. 41 Graf zložky $F_{fn}$ pre materiál A3 .....	59
Obr. 42 Obrobený povrch frézou č. 3 a 4, materiál A .....	60
Obr. 43 Obrobený povrch frézou č.1, materiál A .....	60
Obr. 44 Graf zložky $F_f$ pre materiál B1 .....	61
Obr. 45 Graf zložky $F_{fn}$ pre materiál B1 .....	61
Obr. 46 Graf zložky $F_f$ pre materiál B2 .....	62
Obr. 47 Graf zložky $F_{fn}$ pre materiál B2 .....	62
Obr. 48 Obrobený povrch frézou č.3, materiál B1 .....	63
Obr. 49 Obrobený povrch frézou č.4, materiál B1 .....	63

**ZOZNAM TABULIEK**

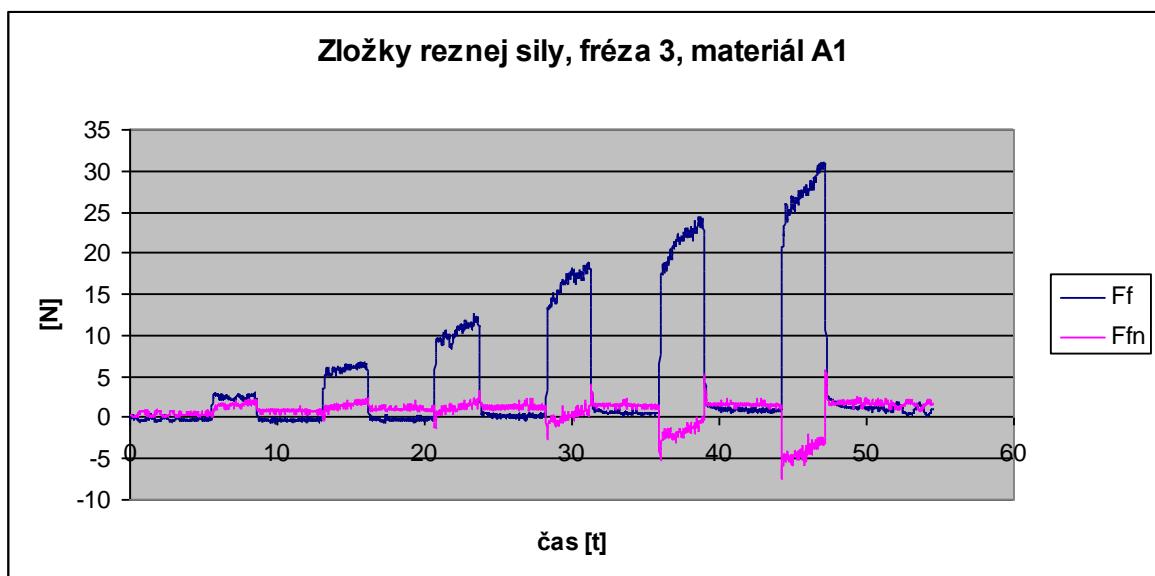
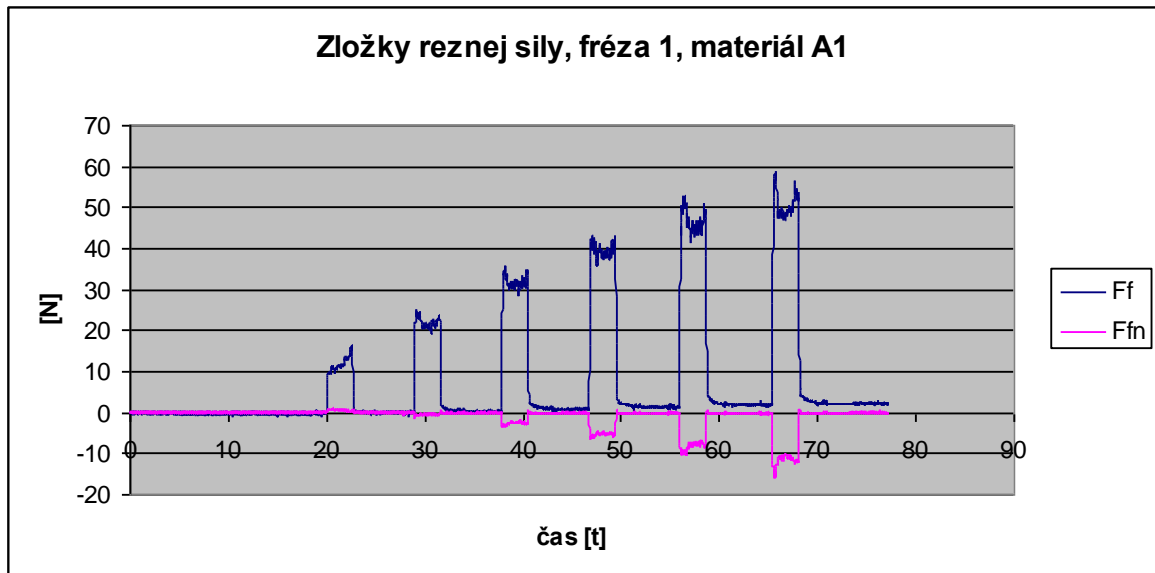
<i>Tab. 1. Porovnanie vlastností vystužujúcich vlákien a konvenčných materiálov(3).....</i>	31
<i>Tab. 2. Vybrané vlastnosti niektorých vystužujúcich vlákien(9).....</i>	33
<i>Tab. 3 Typické vlastnosti niektorých sklenených vlákien pri normálnej teplote(5).....</i>	35
<i>Tab. 4. Vlastnosti uhľíkových vlákien(10).....</i>	36
<i>Tab. 5. Vlastnosti komerčne vyrábaných PPA vlákien(20).....</i>	37
<i>Tab. 6. Všeobecné porovnanie niektorých vlastností kompozitov(21).....</i>	38
<i>Tab. 7. Porovnanie viskozít termoplastových tavenín a kvapalných reaktívnych živíc pri typických spracovateľských teplotách(21).....</i>	40
<i>Tab. 8 Vlastnosti najčastejšie používaných organických matric(10).....</i>	41
<i>Tab. 9. Vplyv výrobnéj technológie a formy vlákien na maximálny obsah vlákien v kompozíte(20).....</i>	45
<i>Tab. 10. Medzinárodné označenia výrobných technológií vláknitých polymérnych kompozitov(20).....</i>	45
<i>Tab. 11 Parametre frézky.....</i>	48
<i>Tab. 12. Šírka rezov <math>a_e</math> (materiály A).....</i>	49
<i>Tab. 13 Šírka rezov <math>a_e</math> (materiály B).....</i>	49
<i>Tab. 14 Popis materiálov A.....</i>	51
<i>Tab. 15 Záznam z mechanickej skúšky materiálov A na padostrojí.....</i>	52
<i>Tab. 16 Popis materiálov B.....</i>	53
<i>Tab. 17 Fréza č.1-Parametre.....</i>	54
<i>Tab. 18 Fréza č.2 - Parametre.....</i>	54
<i>Tab. 19 Fréza č.3 - Parametre.....</i>	55
<i>Tab. 20 Fréza č.4 - Parametre.....</i>	55

## ZOZNAM PRÍLOH

Príloha I: Záznamy z merania- zložky rezných síl

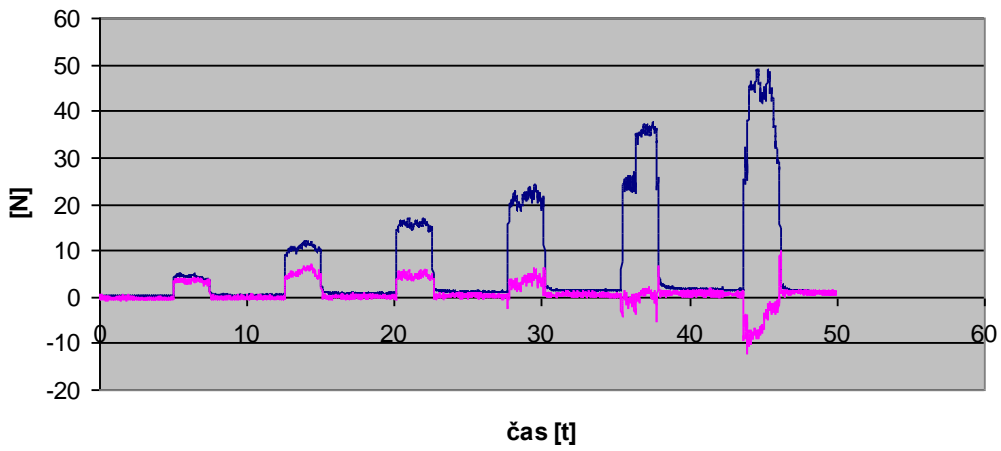
# PRÍLOHA P I: ZÁZNAMY Z MERANIA-ZLOŽKY REZNÝCH SÍL

## Materiály A

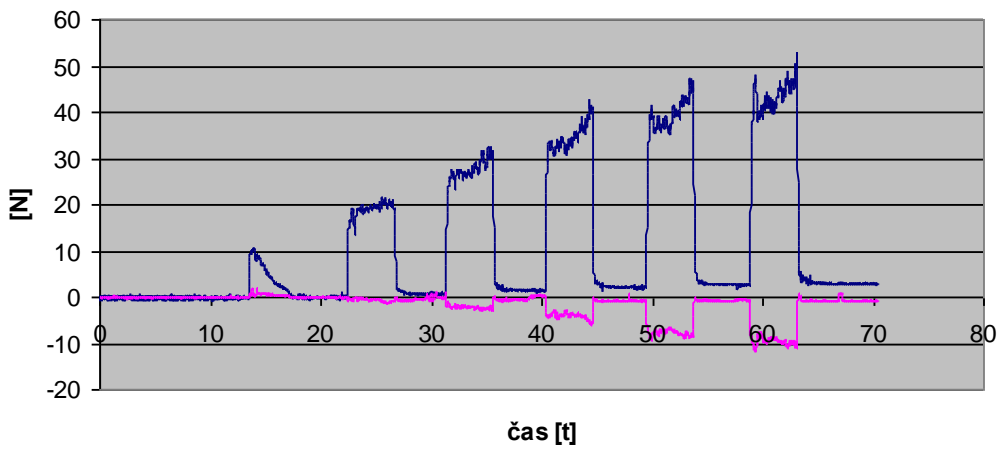




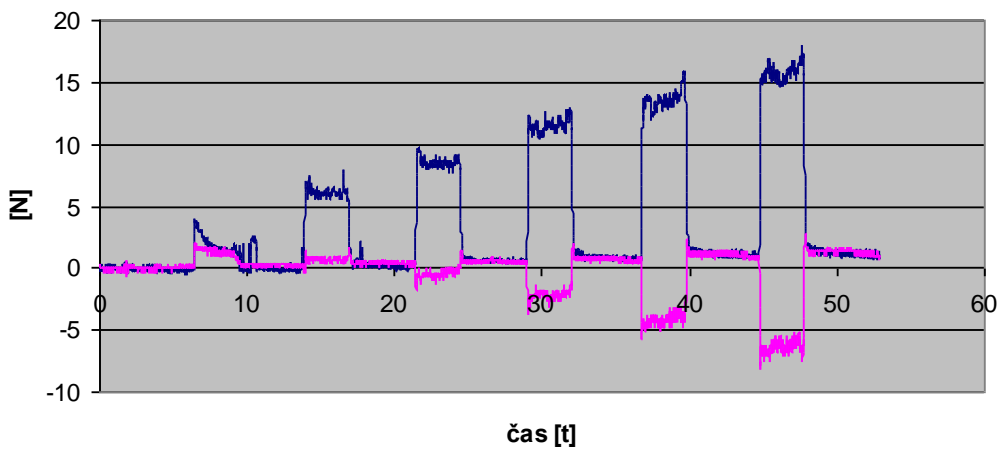
Zložky reznej sily, fréza 4, materiál A1



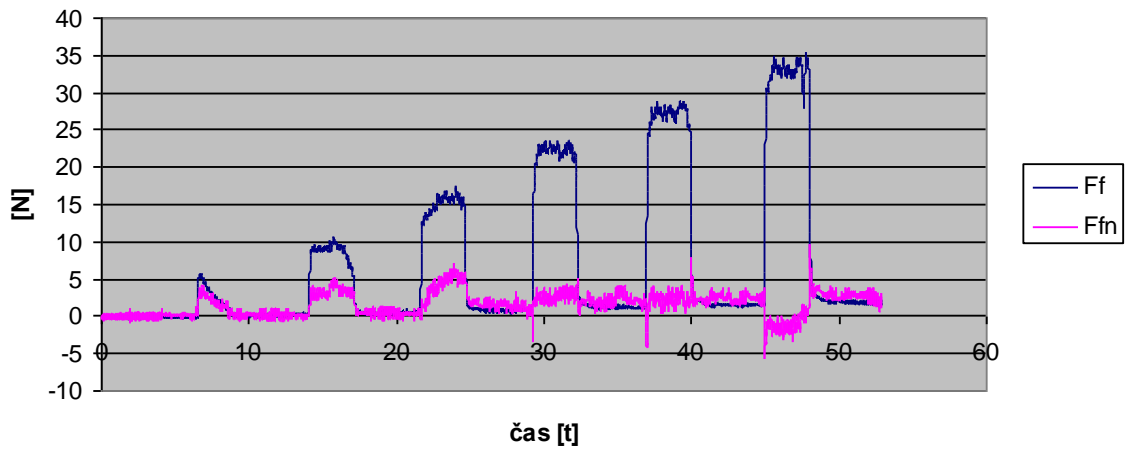
Zložky reznej sily, fréza 1, materiál A2



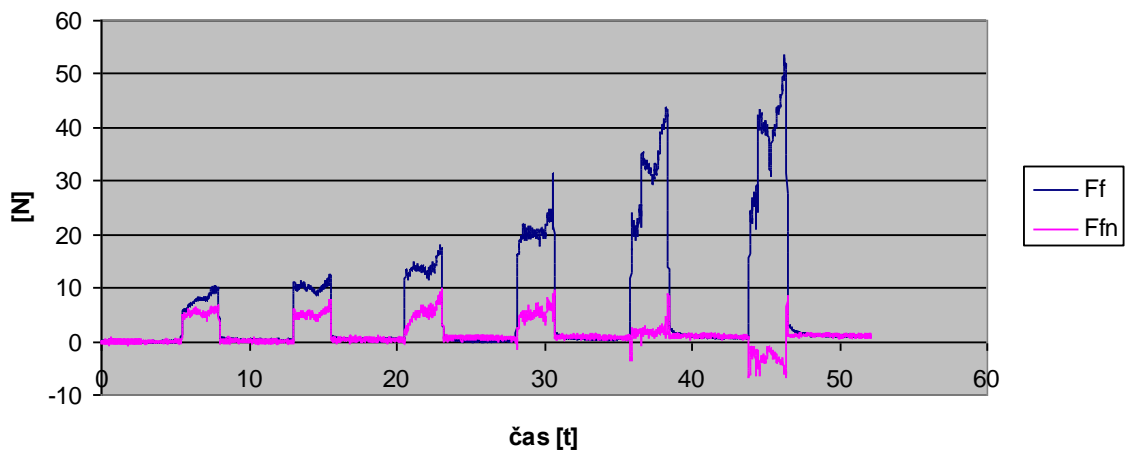
Zložky reznej sily, fréza 2, materiál A2



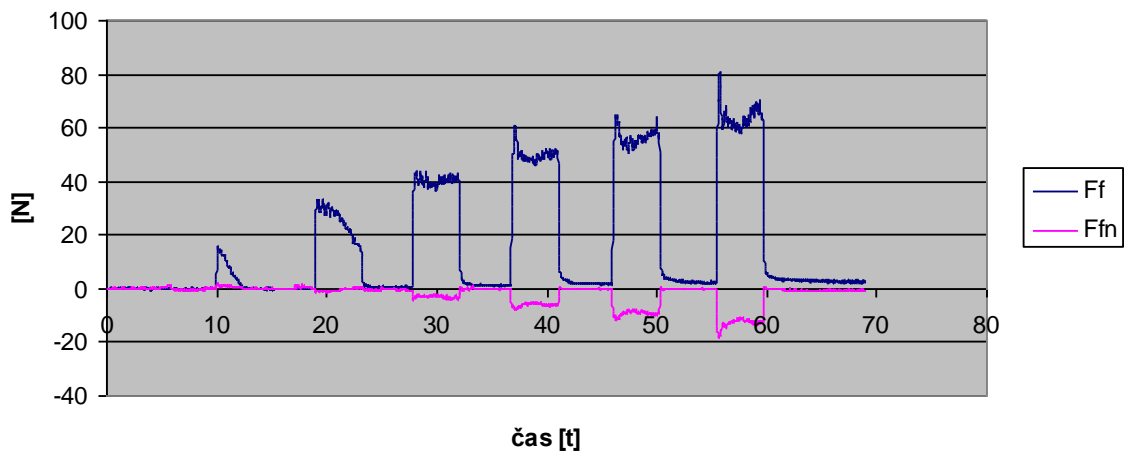
Zložky reznej sily, fréza 3, materiál A2



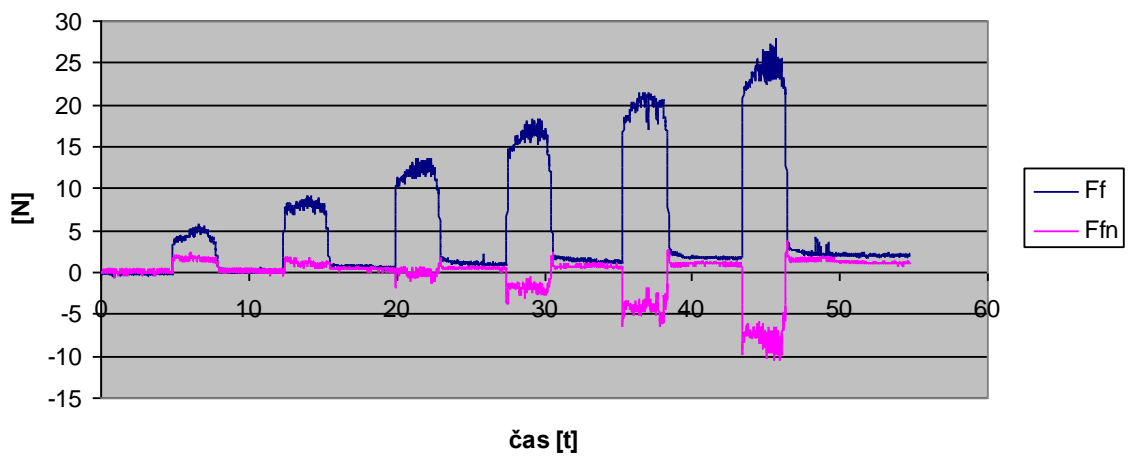
Zložky reznej sily, fréza 4, materiál A2



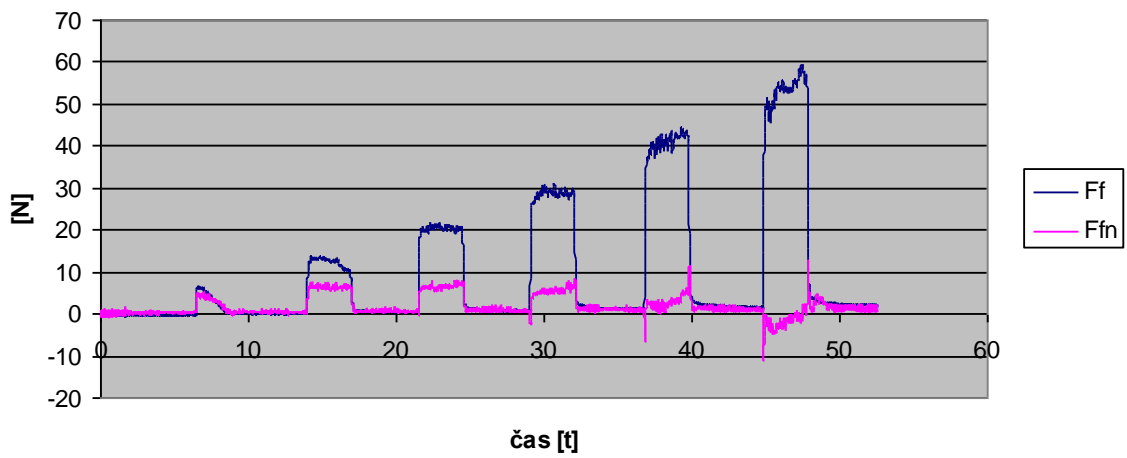
Zložky reznej sily, fréza 1, materiál A3



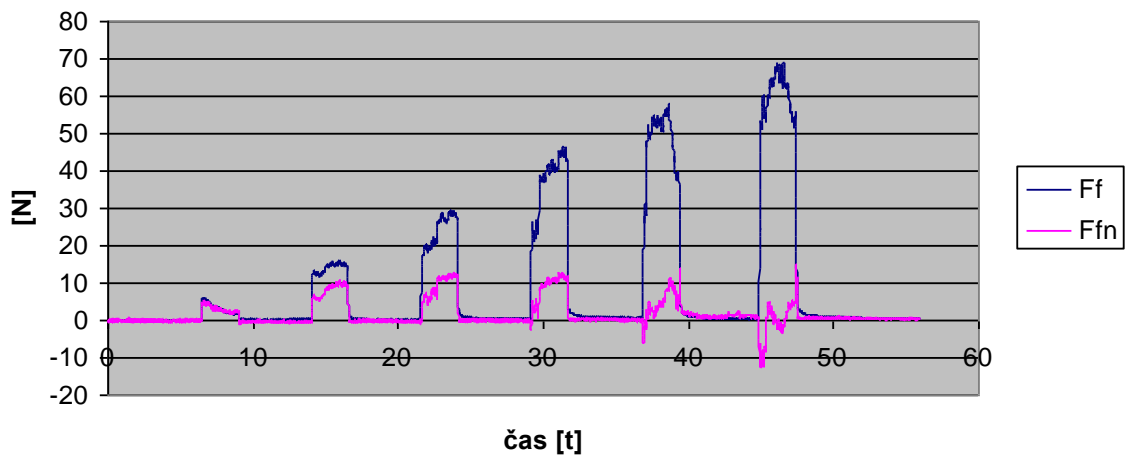
Zložky reznej sily, fréza 2, materiál A3



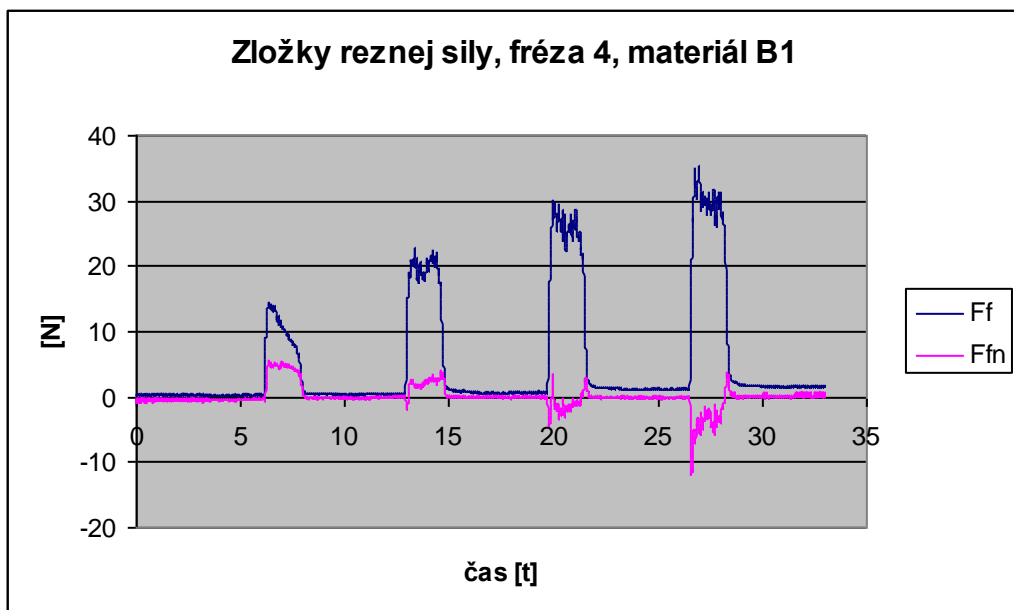
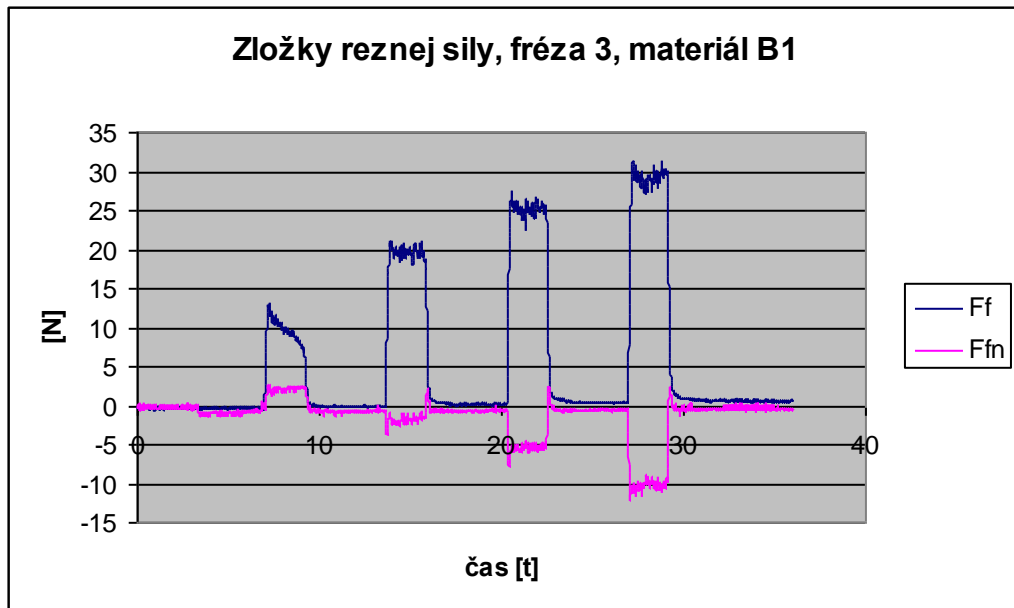
Zložky reznej sily, fréza 3, materiál A3



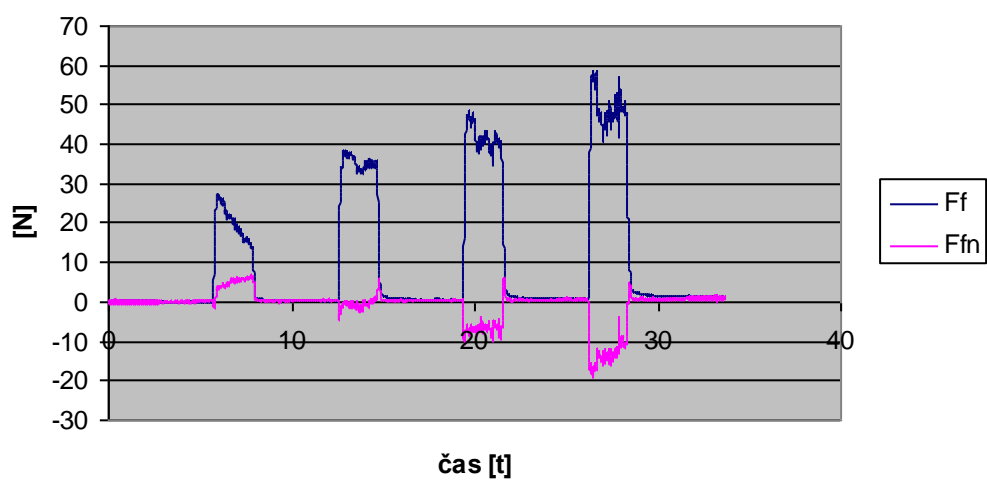
Zložky reznej sily, fréza 4, materiál A3



## Materiály B



Zložky reznej sily, fréza 3, materiál B2



Zložky reznej sily, fréza 3, materiál B2

